ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ -
АО «КОНЦЕРН «ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ»
«ЭЛЕКТРОПРИБОР»

МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
«АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ»

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ»

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ ГРУППА РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА
ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ

НАВИГАЦИЯ
И
УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ

МАТЕРИАЛЫ
XXI КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

Научный редактор
доктор технических наук, профессор О. А. Степанов

Под общей редакцией
академика Российской академии наук
В. Г. Пешехонова

Санкт-Петербург
2019

Навигация и управление движением. Материалы XXI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием / Науч. редактор д.т.н., проф. О.А.Степанов / Под общ. ред. академика РАН В.Г.Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019. 394 с.
ISBN 978-5-91995-064-6

Настоящий сборник содержит материалы XXI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», организованной ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» при активном участии Международной общественной организации «Академия навигации и управления движением» (МОО «АНУД»), Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» и Санкт-Петербургской группы Российского национального комитета по автоматическому управлению.

Конференция проходила 19−22 марта 2019 г. в ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». В сборник включены четыре обзорные лекции и доклады, рекомендованные к опубликованию программным комитетом. Материалы конференции, начиная с первой конференции, которая состоялась в 1999 г., включены в базу Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

д.т.н., проф. О.А. Степанов	–	Председатель АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
д.т.н., проф. А.А. Бобцов	–	Университет ИТМО, С.-Петербург
д.т.н. А.М. Боронахин	–	Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
д.ф.-м.н., проф. Е.И. Веремей	–	Санкт-Петербургский государственный университет
к.т.н. А.С. Ковалев	–	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург
к.т.н. А.С. Кремлев	–	Университет ИТМО, С.-Петербург
к.т.н. А.В. Лопарев	–	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, ГУАП, С.-Петербург
д.т.н., проф. А.А. Пыркин	–	Университет ИТМО, С.-Петербург
д.т.н., проф. В.Я. Распопов	–	Тульский государственный университет
д.т.н., проф. Ю.В. Филатов	–	Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
д.т.н., проф. И.Б. Фуртат	–	Институт проблем машиноведения РАН, Университет ИТМО, С.-Петербург
к.т.н. С.Ю. Шевченко	–	Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
к.т.н. Е.В. Шевцова	–	Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

к.т.н. Ю.А. Литвиненко	–	**Председатель**, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
к.т.н. Д.П. Елисеев	–	**заместитель председателя,** АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
к.т.н. А.В. Моторин	–	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
к.т.н. А.Ю. Соколов	–	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Н.Л. Гора	–	—“—
С.Д. Пешехонова	–	—“—
Н.Г. Скиданов	–	—“—
М.А. Тит	–	—“—

ISBN 978-5-91995-064-6

© ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019
© Международная общественная организация «Академия навигации и управления движением», 2019

С О Д Е Р Ж А Н И Е

От оргкомитета XXI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» 12

Обзорные доклады

Ф.Л. Черноусько
Управление движением твердого тела при помощи вспомогательной внутренней массы 15

А.А. Голован
Задача стендовой калибровки инерциально-измерительных блоков 18

А.В. Моторин
Комплексная обработка навигационных измерений в условиях неопределенности моделей полезных сигналов и погрешностей 30

ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

А.С. Томилова
Оптимизация робастных свойств системы управления при ограничениях на качество переходного процесса 37

В.И. Царик
Управление колебаниями неполноприводной системы «Шар на качелях» 40

А.А. Богер, С.Н. Тимаков
Об управлении группировкой спутников-осветителей на солнечно-синхронных орбитах 43

Е.А. Воробьева, А.В. Богачев
Разработка нового алгоритма управления переориентацией космического аппарата для обеспечения требуемых параметров функционирования аппарата 45

M. Gaiser, G. Scholz, G.F. Trommer
Vehicle Dynamic Control Allocation for Path Following 48

А.Р. Даль, О.И. Борисов, Ф.Б. Карашаева
Робастное регулирование по выходу в задаче удержания положения надводного судна 50

М.А. Каканов, О.И. Борисов
Робастное управление с компенсацией интегрального насыщения в мобильных киберфизических системах 53

Е.А. Карпенко, О.В. Слита
Исследование системы управления теплотехническим объектом 55

И.А. Лебедев, В.Н. Честнов
Синтез регулятора многомерного объекта по инженерным показателям качества на основе упрощенной модели 57

И.Р. Белов
Лемма об ограниченности анизотропийной нормы дискретных нестационарных систем с мультипликативными некоррелированными шумами 60

Д.А. Марков
Управление двухроторной многомерной системой 63

А.А. Плотников
Адаптивное управление энергией мехатронного стенда «Вертолет» 66

П.Д. Бельков, А.В. Зыков
Разработка алгоритма стабилизации космического корабля во время работы корректирующих двигателей 69

Н.С. Бондарев, И.В. Семёнов, Д.В. Антонов
Система гироскопической стабилизации оптического луча прибора указателя глиссады 71

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

М.С. Николаев
Неградиентный алгоритм автономной навигации мобильного робота для поиска и отслеживания изолинии скалярного поля 74

Е.С. Скосарев, С.А. Колюбин
Исследование алгоритмов энергоэффективного позиционного управления для роботов-манипуляторов с гибким звеном 77

О.Б. Шагниев, С.Ф. Бурдаков
Интеллектуализация управления роботом с силомоментным очувствлением при контактных операциях 80

И.С. Фомин, С.Р. Орлова, А.В. Бахшиев
Исследование нейронных сетей для обнаружения объектов в задаче автономной навигации беспилотного транспортного средства 83

Д.А. Степаненко, Д.М. Семенов, С.А. Плотников
Управление мобильным роботом на основе нейрообратной связи 86

Д.А. Галкина
Согласованное управление формацией морских роботизированных надводных объектов 89

К.А. Гордиевич, А.А. Кречин, И.В. Шестаков, А.А. Синишин
Макет мультиагентной системы для симуляции взаимодействия подводных роботов 91

D.S. Iarosh, A.V. Kornilova
Multiagent System of Mobile Robots for Robotic Football 94

П.А. Коновалов, Г.В. Ренева, И.Ю. Широколобов
Алгоритмы мультиагентного взаимодействия и навигации в команде роботов-футболистов 97

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

А.М. Афанасьева, Е.В. Драницына
Сравнение дискретных алгоритмов решения задачи ориентации 100

Р.Л. Новиков, С.А. Носков
Система визуального наблюдения для контроля качества намотки волоконного контура 103

В.А. Ботнев
Метод определения точек пересечения ортодромического отрезка с локсодромическим на поверхности сфероида 105

А.А. Прутько, С.Н. Атрошенков
Результаты проведения оптимального по расходу топлива разворота крупногабаритной орбитальной станции 107

М.А. Антонова
Анализ эксплуатационных характеристик вторичных химических источников тока для электропитания систем навигации, управления и связи 109

М.В. Верещагин, Р.В. Кулешов, Е.Н. Карташев
Внедрение технологии виртуализации аппаратного обеспечения корпоративной вычислительной сети АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» 112

М.Р. Мясников
Разработка модели оценки стоимости высокотехнологичных программных продуктов 114

А.А. Аристов, М.А. Епринцев, Л.С. Мамедова
Исследование технологии взаимной навигации и ориентации малых космических аппаратов в группе 116

М.С. Сидорова
Имитационное моделирование приемо-передающего тракта дальномерного модуля радиотехнической системы локальной навигации 119

А.А. Кумарин
Построение автомата вычисления синуса и косинуса в модуле слежения за сигналом программного навигационного приемника 122

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ В ШКОЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ

Г.М. Выдревич, Н.Г. Тен
Позиционирование роботов в рамках робототехнического проекта «Колобок» 125

М.Н. Михайлов
Методы позиционирования автономных автомобилей 128

М.Р. Лазарев, М.П. Трудов
Система пожаротушения малых очагов возгорания в лесной местности 130

И.К. Бакшеев, А.А. Вяземский, С.К. Иванов, С.Д. Молчанов, А.С. Папасимеониди
Разработка дополнительных миссий спутников CanSat для участия в чемпионате «воздушно-инженерная школа» 132

И.В. Дымашевская, А.В. Шерстинова, К.А. Кучерова, Д.А. Самсонов, В.В. Перлюк
Система траекторного управления полетом макета микроспутника CanSat на участке свободного падения 135

Р.А. Фомичев, А.А. Ладанов, Г.Г. Мадоян, М.Р. Канзафаров
Обучение разработке алгоритма стабилизации квадрокоптера на многофункциональном контроллере «Трекдуино» на занятиях по основам робототехники 138

Д.Д. Куприянов, О.Л. Старинова
Моделирование процесса освещения околополярных районов Земли космическим аппаратом с солнечным парусом 140

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

О.С. Овчинникова, В.Д. Дишель
Методы компенсации влияния возмущений на точность начальной выставки бесплатформенной инерциальной навигационной системы 142

В.И. Полосков
Учет особенностей движения объекта при выработке параметров с использованием акселерометров и датчиков угловых скоростей.....145

В.В. Засорин, Б.Л. Шарыгин
Исследования влияния токов потребления гиромоторов на точностные характеристики двухстепенных поплавковых гироскопов.....148

А.С. Алексеенко, А.А. Краснов
Анализ погрешностей системы косвенной стабилизации гравиметра.....151

Н.Г. Скиданов
Анализ погрешностей прогноза положения неуправляемого гироскопа в задаче калибровки.....154

Д.С. Кукушкин
Гироскопический измеритель угловой скорости с жидким ферромагнитным ротором.....158

Р.С. Пальков
Способ определения резонансной частоты пьезоэлектрического акселерометра с помощью сигнала «белый шум».....161

В.П. Батищев
Низкочастотный стенд для калибровки пьезоэлектрических и индукционных акселерометров и сейсмоприемников.....163

Д.А. Савкин, Р.С. Ефремов, Н.Г. Скиданов
Апробация применения отечественного микромеханического гироскопа для определения курса с помощью модуляционного вращения.....166

Я. Дурукан, М.А. Рыбина, М.М. Шевелько
Состояние и перспективы разработки чувствительных элементов на объемных акустических волнах для датчиков угловой скорости.....169

Е.А. Захарова, А.Н. Шевченко
Экспериментальное исследование зависимости качества резонанса в квантовом датчике вращения от распределения щелочного металла по газовой ячейке.....172

В.В. Чалков, А.Н. Шевченко
Исследование остаточной намагниченности магнитного экрана квантового датчика вращения по сигналам параметрического резонанса цезия.....175

А.А. Авиев
Математическая модель движения элементов в оптико-электронной измерительной системе для лазерного гироскопа.....178

А.Б. Мухтубаев, С.М. Аксарин
Исследование влияния точечного поляризационного преобразования в контуре волоконно-оптического гироскопа на его сигнал.....181

МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ, СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

С.В. Павлова, Р.Г. Люкшонков
Оптимизация конфигурации электродов микромеханического гироскопа и законов формирования напряжений на них.....183

А.В. Старцева, А.С. Ковалев, Р.С. Ефремов
Исследование влияния параметров клеевого соединения на характеристики микромеханического гироскопа.....186

Н.В. Можгова, А.В. Лукин
Нелинейная динамика микромеханического акселерометра в условиях поступательных вибраций и акустических помех 189

А.В. Лукин
Нелинейная динамика балочных микромеханических резонаторов при лазерном термооптическом возбуждении колебаний....192

К.А. Строганов, Е.М. Бакулин, В.Д. Лукьянов
Экспериментальное исследование чувствительного элемента электромеханического акселерометра на основе акустоэлектронной метки микроволнового диапазона....195

А.В. Большакова
Анализ показаний микромеханических акселерометров, установленных на железнодорожном вагоне 198

ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ

И.С. Смирнов, Я.В. Беляев, Н.Н. Невирковец
Детерминированный алгоритм проектирования операционного усилителя для интегральной схемы акселерометра....201

А.А. Михтеева
Алгоритмы цифровой коррекции и самотестирования аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения....204

Л.Е. Андреев, С.Е. Миронов
Иерархическое структурно-топологическое проектирование макроблоков сверхбольших интегральных схем в технологически инвариантной концепции....206

А.А. Названов, М.С. Енученко
10-разрядный фибоначчиевый ЦАП 209

О.А. Козачёк, М.В. Дружинина, Н.А. Николаев
Исследование электромеханических систем на базе LABVIEW 212

С.А. Александрова, О.В. Слита, Е.А. Карпенко
Закон управления мостовым повышающим преобразователем напряжения с мягким переключением на основе изменения частоты коммутации транзисторов 214

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМИ АППАРАТАМИ

Д.А. Чергинец, В.А. Антипов, А.О. Овчаров
Система слежения за движущимся объектом для квадрокоптера 217

М.Ю. Шавин, Д.А. Притыкин
Экстренное управление квадрокоптером с поворотными роторами при отказе двух смежных двигателей 219

Ю.С. Зайцева
Подавление колебаний в контуре управления «оператор – беспилотный летательный аппарат»....222

А.В. Савкин, Л.А. Колганов, Е.Л. Чехов
Синтез программно-алгоритмического обеспечения навигации и управления движением автономного необитаемого подводного аппарата 224

Н.Е. Чечулина
Алгоритм оценивания параметров внешнего возмущения 227

Ю.В. Сухарев, В.Г. Никитин
Исследование влияния параметров акселерометров на качество управления малогабаритным беспилотным летательным аппаратом 230

Т.А. Лучкина
Алгоритмы повышения точности автономного функционирования информационно-измерительной системы определения угловой ориентации подвижного объекта 233

Д.Ю. Лившиц, И.К. Кузьменко, А.А. Серанова
Оценка надежности лазерной системы посадки для беспилотных летательных аппаратов 236

БОРТОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

В.А. Масталиева
Компьютерное моделирование приборов контроля и управления миниатюрной замкнутой биосистемой.....239

Е.В. Лукоянов, А.М. Грузликов
Автоматизация процедуры построения тестов для распределенной вычислительной системы реального времени..... 242

Д.В. Костыгов, А.М. Грузликов
Отказоустойчивая и энергоэффективная вычислительная система на кристалле.....245

А.С. Сатуленков, Ю.П. Иванов
Современные графические средства отображения навигационной информации 248

Т.А. Манвелова, Н.Н. Иванов
Разработка макета коммутационной платы нового поколения.....250

В.К. Салыкин
Оконечное устройство беспроводной сети LORA 253

ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Д.В. Антонов, И.Б. Челпанов
Пути повышения эффективности работы системы гиростабилизации оптической глиссады 255

А.Н. Артемьев
Анализ точности вычисления вариации Аллана для дискретной винеровской последовательности..... 259

М.И. Слукина, Ю.А. Литвиненко
Идентификация параметров температурной погрешности двухстепенного поплавкового гироскопа методами нелинейной фильтрации..... 262

В.Т. Ле, К.Д. Во, Со Тар
Алгоритм идентификации нестационарных линейно изменяющихся во времени параметров 265

В.Т. Ле, К.Д. Во, Со Тар
Алгоритм идентификации частоты смещенного синусоидального сигнала с нестационарными амплитудой и смещением..... 268

И.А. Лень
Система оптимизации распределения наблюдателей между источниками сигналов 271

А.Н. Сергеенко
Применение алгоритма, основанного на дезоксирибонуклеиновых вычислениях, для решения оптимизационной задачи..... 274

В.А. Шулепов, С.М. Аксарин, В.Е. Стригалев
Стабилизация центральной длины волны излучения VCSEL с внешним резонатором на основе волоконных решеток Брэгга 277

М.М. Синетова, А.А. Ведяков, А.А. Пыркин
Синтез наблюдателей для нелинейных систем на основе динамического расширения модели 280

О.В. Зайцев
Прогноз дифференциальных поправок глобальных навигационных спутниковых систем с учетом ограничений 284

B. Ahi, S. Adelipour, M. Haeri
A Dual Mode Control Scheme for Global Stabilization of Multiple Integrators Subjected to Disturbance and Bounded Input 288

M. Fennel
Design of a Modular Bus System for Self-Driving Miniature Vehicles 291

А.С. Носов, В.А. Васильев
Анализ эффективности алгоритма комплексной обработки измерений в задаче уточнения координат с использованием датчика и карты поля 293

А.С. Носов, А.В. Моторин
Оценивание аномалии силы тяжести в морских условиях с отбраковкой измерений 296

Р.У. Титов, А.В. Моторин
Методы решения задачи построения и использования карты и возможности их реализации с использованием карт гравитационного поля 299

А.В. Голубков
Об оценке объема банка конкурирующих фильтров Калмана в задаче диагностики режима движения объекта на основе гибридной стохастической модели 302

И.Ю. Меркулова
Использование технического зрения в задачах прогнозирования движения объектов, особенности решения задачи прогнозирования для случая движения пешеходов 305

М.В. Тестов
Алгоритм формирования панорамных изображений с использованием нескольких зафиксированных камер 308

А.С. Дорофеев
Метод градиентной обратной связи в задаче обучения нейросетей 310

В.А. Васильев, А.Б. Торопов
Применение процедуры перевыборки в фильтре частиц для коррекции показаний навигационной системы с использованием карт геофизических полей 312

А.О. Костромитин, К.В. Муравьев, Л.Б. Лиокумович
Повышение точности волоконно-оптического гидрофона за счет использования алгоритма определения амплитуды фазовой модуляции по интерференционному сигналу 315

А.В. Леонова
Реконструкция изображений при ультразвуковой томографии 318

E.-M.S. Bansbach
Optimization of ship detection in Sentinel-1 SAR images using wavelet based multiscale analysis, a CFAR detector and feature analysis 321

А.С. Солонар, П.А. Хмарский
Траекторная обработка в радиолокаторах обзора с предварительной межобзорной селекцией движущихся целей на основе карт помех 327

П.А. Хмарский, А.С. Горбатко, А.Е. Бондаренко
Траекторный измеритель для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации.....330

С.В. Цуприк, А.С. Солонар
Статистический синтез устройства межкадрового корреляционного обнаружения–измерения объектов с адаптивным формированием эталонных изображений 333

В.В. Прокопович, А.В. Шафранюк
Исследование модели шумоизлучения морского объекта 336

Г.А. Подшивалов
Идентификация морских объектов, наблюдаемых по каналам шумопеленгования на пространственно разнесенные антенны 340

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИБОРОВ НАВИГАЦИИ

Д.Е. Усачев, Н.Н. Иванов
Исследование и анализ схем связи полимерного оптического волновода с источником/приемником излучения.....342

М.В. Павлова, О.С. Юльметова, А.Г. Щербак
Исследование процесса напыления тонкопленочного хромового покрытия на сферический узел.....345

М.Ю. Захарченко, А.С. Яковишин
Повышение долговечности подшипников качения путем релаксации остаточных внутренних напряжений.....347

М.А. Тит, А.Н. Бочаров, А.К. Мазеева, П.А. Кузнецов
Перспективы использования аддитивных технологий при изготовлении узлов гироприборов 350

А.М. Бибик, С.Н. Беляев
Исследование свойств износостойких покрытий нитрида титана на узлах гироскопических приборов.....353

К.С. Малашенков, Д.П. Елисеев
Результаты испытаний на растяжение металлических изделий, полученных аддитивным способом 356

А.С. Воронов, Г.Е. Кондрашкин
Возможность применения композиционных материалов в датчиках индукционных лагов.....359

Е.Г. Литуненко, А.В. Старцева, Б.Л. Шарыгин
Исследование серных включений в составе сплава ротора ДПГ методом сканирующей электронной микроскопии 362

А.А. Никонов, А.Н. Волков
Седиментационный анализ металлического порошка, используемого в аддитивных технологиях.....365

О.Н. Послянова, О.С. Юльметова, А.Г. Щербак
Исследование процесса лазерной обработки в гироприборостроении.....368

А.А. Никонов, А.Н. Волков
Выявление и отсеивание побочных продуктов, образующихся в порошке при процессе селективного лазерного сплавления 370

Я.Р. Капша, Л.Г. Кутлугульдина
Разработка модели корректировки дисбаланса сплошного ротора электростатического гироскопа 373

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Д.С. Гнусарев
Разработка комбинированной модели кварцевого маятникового акселерометра компенсационного типа в среде COMSOL с реализацией замкнутого контура управления и оптимизацией параметров прибора..... 375

И.В. Муратов
Численное исследование процессов нелинейного деформирования железобетонных конструкций на основе аналитических решений..... 378

Ю.А. Лавров, А.В. Соклаков
Оценка деформированного состояния и работоспособности оптического узла орбитального телескопа в условиях невесомости 381

А.И. Филимохина, В.С. Модестов, Р.В. Федоренко
Анализ устойчивости подкрепленной ребристой оболочки 384

Е.А. Шарина, Ю.И. Жуков
Микроэлектромеханическая система управления движением планирующего подводного аппарата..... 387

С.Б. Бекбауова, Н.А. Николаева
Оценка влияния внешних воздействий на характеристики кольцевого конфокального резонатора..... 389

В.И. Патлан, И.С. Разуваева
Сканирующее осциллирующее микрозеркало на основе электромагнетизма 392

Статистика конференций..... 394

ОТ ОРГКОМИТЕТА XXI КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ»

19–22 марта 2019 г. в ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» состоялась XXI конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием. Конференция проводится при активном участии Международной общественной организации «Академия навигации и управления движением» (МОО «АНУД»), Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербургской группы Российского национального комитета по автоматическому управлению. Информационная поддержка конференции осуществлялась журналами «Гироскопия и навигация», «Мехатроника, автоматизация, управление», «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики».

В работе XXI конференции приняли участие 389 человек. В программу конференции было включено 158 докладов, из которых 151 заслушан. Участники представляли 39 организаций из 11 городов и административных районов России: Долгопрудного, Казани, Королёва, Москвы, Пушкина, Санкт-Петербурга, Самары, Саратова, Серпухова, Сколково, Ульяновска. В работе конференции приняли участие молодые ученые из 6 стран: России, Германии, Белоруссии, Ирана, Вьетнама и Норвегии.

В рамках конференции были заслушаны обзорные лекции известных в своей области ученых:

1. Д.ф.-м.н., проф., академика РАН Ф.Л. Черноусько (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва) – «Управление движением твердого тела при помощи вспомогательной внутренней массы».
2. Действительного члена МОО «АНУД» д.ф.-м.н., проф. А.А. Голована (МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва) – «Задача стендовой калибровки инерциально-измерительных блоков».
3. Члена секции молодых ученых МОО «АНУД» к.т.н. А.В. Моторина (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург) – «Комплексная обработка навигационных измерений в условиях неопределенности моделей полезных сигналов и погрешностей».

Доклады на XXI конференции были распределены по 12 секциям, в том числе организована новая секция «Навигация и управление беспилотными аппаратами».

Секция 1. Теория и системы управления
Секция 2. Навигация и управление в робототехнических системах
Секция 3. Прикладные задачи навигации и управления движением
Секция 4.Навигация и управление движением в школьных проектах
Секция 5.Гироскопические системы и чувствительные элементы
Секция 6.Микромеханические датчики, системы и технологии
Секция 7.Электроника, микроэлектроника и системы на кристалле
Секция 8.Навигация и управление беспилотными аппаратами
Секция 9.Бортовые вычислительные системы
Секция 10.Обработка измерительной информации
Секция 11.Технологии изготовления приборов навигации
Секция 12.Современные методы компьютерного моделирования

Отличительной чертой XXI конференции стало включение в программу докладов на английском языке. Так, на секции 1 состоялись 2 доклада: «Vehicle Dynamic Control Allocation for Path Following» М. Гайзера, Г. Шольца и Г.Ф. Троммера из Технологического института г. Карлсруэ (Германия) и «Obstacle avoidance and asymptotic stability simultaneously for a quadrotor» А. Миршамси, А. Нобахти из Технологического университета им. Шарифа, г. Тегеран (Иран). На секции 2 состоялся доклад «Multiagent System of Mobile Robots for Robotic Football», представленный Д.С. Ярошем и А.В. Корниловой (Санкт-Петербургский государственный университет), на секции 10 – доклад «A Dual Mode Control Scheme for Global Stabilization of Multiple Integrators Subjected to Disturbance and Bounded Input», представленный коллегами из Ирана Б. Ахи, С. Аделипур, М. Хаери (Технологический университет им. Шарифа, г. Тегеран), и доклад из Германии «Design of a Modular Bus System for Self-Driving Miniature Vehicles» молодого ученого М. Феннеля (Технологический институт г. Карлсруэ).

Третий год в рамках конференции была организована секция «Навигация и управления движением в школьных проектах». В 2019 году количество выступающих увеличилось: состоялось 9 докладов школьников с 4 по 11 класс. Среди них учащиеся ПФМЛ №239, ЦДЮТТ Московского района, молодежного творческого форума «Китеж плюс», школы №644, клуба образовательной робототехники «Роботрек» (г. Пушкин), а также Молодежной аэрокосмической школы (г. Самара). Как и во «взрослых» секциях, некоторые доклады были прочитаны на английском языке. Самыми юными участниками конференции были ученики 4 и 5 классов из г. Пушкина, которые выступили в режиме web-конференции. Эти школьники посещают клуб образовательной робототехники «Роботрек», где под руководством выпускника базовой кафедры ИНС Университета ИТМО (сейчас Институт ИНС) 2018 г. Р.А. Фомичева выполняют различные проекты. Все представленные школьниками работы вызвали неподдельный интерес и привлекли внимание не только своим содержанием, но и эффектной демонстрацией.

Впервые в рамках конференции было организовано собрание секции молодых ученых международной общественной организации «Академия навигации и управления движением». Основная цель собрания, проводившегося в формате круглого стола, заключалась в обмене мнениями и обсуждении проблемы, связанной с подготовкой статей и докладов для высокорейтинговых журналов и конференций. На собрании состоялись выступления четырех докладчиков: президента МОО «АНУД» академика РАН В.Г. Пешехонова «О перспективах развития секции молодых ученых», члена секции молодых ученых МОО «АНУД» д.т.н. О.С. Юльметовой (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»), которая рассказала об опыте подготовки публикаций для высокорейтинговых журналов, действительного члена МОО «АНУД» д.т.н., проф. Н.В. Кузнецова (Санкт-Петербургский государственный университет) «Международные конференции ближе, чем кажутся» и вице-президента МОО «АНУД» д.т.н., проф. О.А. Степанова «Журналы с открытым доступом. Опыт рецензирования». Все выступления сопровождались активной дискуссией среди участников конференции. В целом опыт проведения собрания секции молодых ученых МОО «АНУД» в рамках конференции был признан успешным, а организация аналогичных собраний на последующих конференциях – целесообразной.

По итогам конференции было проведено традиционное награждение премиями памяти выдающихся ученых, работавших в ЦНИИ «Электроприбор». В этом году были вручены две премии. Премии имени д.т.н., проф. С.Ф. Фармаковского удостоен О.Б. Шагниев за доклад «Интеллектуализация управления роботом с силомоментным очувствлением при контактных операциях» (авторы: О.Б. Шагниев, С.Ф. Бурдаков, СПбПУ Петра Великого, С.-Петербург); Премия имени д.т.н. А.С. Анфиногенова была вручена А.С. Воронову за доклад «Возможность применения композиционных материалов в датчиках индукционных лагов» (авторы: А.С. Воронов, Г.Е. Кондрашкин, Университет ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург).

В каждой секции авторы лучших докладов награждены дипломами, денежными премиями и памятными подарками:

- дипломами I степени – 7 участников;
- дипломами II степени – 9;
- дипломами III степени – 11;
- дипломами за лучший студенческий доклад – 6;
- дипломами за лучший школьный доклад – 2.

Лучшие доклады, рефераты которых опубликованы в настоящем сборнике, рекомендованы для участия в Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам или для публикации в журналах, входящих в перечень ВАК и оказывающих информационную поддержку конференции.

В настоящий сборник включено 127 докладов молодых ученых, 3 обзорных лекции.

Председатель оргкомитета
к.т.н. Ю.А. Литвиненко

▪ ОБЗОРНЫЕ ДОКЛАДЫ ▪

УДК 681.51

Ф.Л. ЧЕРНОУСЬКО
(Институт проблем механики РАН, Москва)

УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПРИ ПОМОЩИ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЙ ВНУТРЕННЕЙ МАССЫ

Приводится краткий обзор исследований по динамике и управлению движением мобильных систем, содержащих вспомогательные подвижные внутренние массы.

Перемещение движущихся объектов, в частности мобильных роботов, по поверхностям и в пространстве может осуществляться на основе различных принципов. Наиболее распространенными способами перемещения, или локомоции, являются перемещения при помощи внешних движителей: колёс, конечностей (ног), гусениц, винтов или пропеллеров. Наряду с этими способами перемещение может происходить путем целенаправленного изменения конфигурации системы. Такие типы движения, используемые в мобильных робототехнических системах, могут имитировать локомоции некоторых животных и насекомых: ползание змей и червей, плавание рыб и др.

Иной принцип перемещения, который не имеет прямых аналогов в живой природе, – это способ перемещения, основанный на специальных движениях вспомогательных внутренних масс относительно основного тела. Этот принцип использован в целом ряде работ применительно к мобильным микророботам [1–3] и роботам, движущимся внутри труб [4]. Некоторые вопросы движения мобильных роботов по поверхностям рассмотрены в книге [5].

Особенностью данного способа перемещения является отсутствие каких-либо внешних подвижных элементов. Поэтому мобильные роботы, основанные на этом принципе, могут быть герметичными. Это делает их особенно полезными для движения в агрессивных средах, а также в ранимых средах, в частности внутри живых организмов. При этом такие роботы, конечно, нуждаются в источниках энергии, которые могут располагаться внутри или вне корпуса робота. В последнем случае должна быть обеспечена передача энергии (обычно через электромагнитное поле) извне к корпусу робота.

Мобильные роботы, движение которых основано на перемещении вспомогательных внутренних масс, называют капсульными роботами, или вибророботами. В последние годы им посвящено большое число публикаций в разных странах, по капсульным роботам проводятся специальные заседания на международных научных конференциях. Широко обсуждаются вопросы применения капсульных роботов для технической и медицинской диагностики.

В данной работе приводится краткий обзор исследований по динамике и управлению движениями мобильных систем с внутренними массами, выполненных в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук [6–19]. В этих исследованиях начиная с 2005 г. были изучены механические модели капсульных роботов, оценены возможные скорости их перемещения в разных средах и построены оптимальные способы перемещения.

Простейшей моделью капсульного робота является двухмассовая система, состоящая из основного тела (корпуса) массы M и внутреннего подвижного тела массы m. Эти тела могут перемещаться прямолинейно и поступательно вдоль некоторого направления. Между телами имеет место силовое взаимодействие, осуществляемое актюатором и обеспечивающее движение внутренней массы относительно корпуса. Помимо сил взаимодействия, которые являются внутренними для данной системы, на корпус действуют внешние силы сопротивления, в качестве которых рассматриваются силы сухого трения или силы сопротивления, зависящие от направления и скорости движения корпуса. Наиболее часто рассматриваются линейный и квадратичный законы сопротивления, причем коэффициенты этих законов могут быть различны для движений «вперед» и «назад» (анизотропное сопротивление).

Предполагается, что внутреннее тело совершает периодические движения относительно корпуса, причем его перемещение относительно корпуса ограничено величиной L. В качестве управляющих воздействий могут рассматриваться относительная скорость или ускорение внутреннего тела, на которые наложены ограничения. Корпус робота при этом движется с периодически изменяющейся скоростью, и оценивается средняя скорость его перемещения.

Для различных законов внешнего сопротивления, упомянутых выше, построены оптимальные законы относительного движения внутреннего тела, при которых достигается наибольшая средняя скорость [7, 8]. Так, в случае сухого трения наибольшая средняя скорость составляет [7]

$$V_1 = 0.545\sqrt{\mu kLg}, \quad V_2 = 0.707\sqrt{\mu kLg}, \quad \mu = m/\ M + m \ ,$$

для случаев оптимального управления по скорости и по ускорению соответственно. Здесь k – коэффициент трения, g – ускорение силы тяжести. Заметим, что в случае управления по скорости корпус в течение периода движения перемещается как вперед, так и назад, а в случае управления по ускорению фаза движения вперед чередуется с фазой покоя.

Оптимальные прямолинейные движения в случае более общих законов сопротивления исследованы в [9]. Рассмотрены оптимальные движения системы, состоящей из корпуса и двух подвижных масс, одна из которых движется по горизонтали, а другая – по вертикали [10]. За счет оптимального управления двумя массами удается повысить среднюю скорость перемещения.

Полученные теоретические результаты получили подтверждение в экспериментальных исследованиях [11–13].

Значительно более сложные задачи возникают при исследовании двумерных движений систем с подвижными внутренними массами по плоскости. Исследовано перемещение твердого тела, содержащего внутренние массы, по горизонтальной плоскости при наличии сухого трения между телом и плоскостью [14]. Для двух вариантов конфигурации внутренних масс относительно корпуса построены способы управления, обеспечивающие перемещения твердого тела (корпуса) из заданного начального положения в произвольное конечное положение на плоскости. При построении в качестве составных элементов используются законы оптимального управления прямолинейными движениями. В результате доказана управляемость тела в плоскости посредством движения внутренних масс [14, 15].

Осуществление заданного перемещения мобильного робота в плоскости можно составить из отрезков прямолинейных поступательных движений, соединенных поворотными движениями. Если повороты реализуются достаточно быстро, то во время этих поворотных движений часто можно пренебречь действием внешних сил по сравнению с действием внутренних управляющих сил.

Таким образом, приходим к постановке задачи управления поворотом твердого тела посредством движения внутренней подвижной массы относительно тела при отсутствии внешних сил. В этом случае центр масс системы «корпус + внутренняя масса» остается неподвижным, а количество движения всей системы и ее кинетический момент сохраняются постоянными и равными нулю.

Для данной системы поставлены и решены задачи оптимального по быстродействию плоского поворота тела (корпуса) при ограничении на скорость движения подвижной массы относительно корпуса [16–18]. Решение получено в замкнутом виде для наиболее важного случая, когда внутренняя масса мала по сравнению с массой корпуса:

$$\mu = m/\ M + m \ << 1 \, .$$

Оптимальные траектории внутренней массы относительно корпуса являются дугами окружностей. На основе решений, полученных для малых μ, построены модифицированные решения, точно удовлетворяющие всем наложенным краевым условиям и пригодные для любых μ. В работе [19] построены точные решения, оптимальные по быстродействию и пригодные для любых μ. Эти решения выражаются в эллиптических интегралах.

Проведенный анализ динамики твердого тела, управляемого посредством внутренней массы, в случае отсутствия внешних сил представляет интерес не только для мобильных роботов, но также и для управления ориентацией космических аппаратов. В связи с этим исследованы задачи управления пространственным движением тела, несущего управляемую подвижную массу, в случае отсутствия внешних сил. Построены движения внутренней массы относительно тела, при которых осуществляется заданная переориентация тела в пространстве.

Эта переориентация может быть осуществлена как путем трех плоских поворотов тела вокруг его главных центральных осей инерции, так и путем одного поворота вокруг некоторой оси. Построены соответствующие движения внутренней массы, обеспечивающие заданную переориентацию.

Мобильные системы, движение которых управляется посредством вспомогательных подвижных внутренних масс, представляют определенный интерес для робототехники. На основе таких систем созданы мобильные роботы, используемые для технической и медицинской диагностики, для реализации микро- и нанoперемещений. Рассмотренный принцип перемещения может быть использован также для управления ориентацией космических и других движущихся аппаратов.

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации АААА-А17-117021310387-0) и при поддержке Программы № 29 Президиума РАН «Актуальные проблемы робототехнических систем».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Schmoeckel F., Worn H.** Remotely controllable mobile microrobots acting as nano positioners and intelligent tweezers in scanning electron microscopes (SEMs). *Proc. International Conference on Robotics and Automation, IEEE*, New York, 2001. P. 3903-3913.
2. **Fidlin F., Thomsen J.J.** Predicting vibration-induced displacement for a resonant friction slider. *European Journal of Mechanics, A, Solids*. 2001. V. 20. № 1. P. 155-166.
3. **Vartholomeos P., Papadopoulos E.** Dynamics, design and simulation of a novel micro-robotic platform employing vibration microactuators. *Journal of Dynamical Systems, Measurement and Control.* 2006. V. 128. № 1. P. 122-133.
4. **Gradetsky V., Solovtsov V., Kniazkov M., Rizzotto G.G., Amato P.** Modular design of electro-magnetic mechatronic microrobots. *Proc. 6th International Conference Climbing and Walking Robots CLAWAR*. Catania, Italy. 2003. P. 651-658.
5. **Zimmermann K., Zeidis I., Behn C.** Mechanics of Terrestrial Locomotion. Berlin: Springer. 2009. P. 289.
6. **Черноусько Ф.Л.** О движении тела, содержащего подвижную внутреннюю массу. *Доклады Академии наук.* 2005. Т. 405. № 1. С. 56-60.
7. **Черноусько Ф.Л.** Анализ и оптимизация движения тела, управляемого посредством подвижной внутренней массы. *Прикладная математика и механика*. 2006. Т. 70. № 6. С. 915-941.
8. **Черноусько Ф.Л.** Оптимальные периодические движения двухмассовой системы в сопротивляющейся среде. *Прикладная математика и механика*. 2008. Т. 72. № 2. С. 202-215.
9. **Болотник Н.Н., Фигурина Т.Ю., Черноусько Ф.Л.** Оптимальное управление прямолинейным движением системы двух тел в сопротивляющейся среде. *Прикладная математика и механика*. 2012. Т. 76. № 1. С. 3-22.
10. **Болотник Н.Н., Фигурина Т.Ю.** Оптимальное управление прямолинейным движением твердого тела по шероховатой плоскости посредством перемещения двух внутренних масс. *Прикладная математика и механика*. 2008. Т. 72. № 2. С. 216-229.
11. **Li H., Furuta K., Chernousko F.L.** A pendulum-driven cart via internal force and static friction. *Proc. International Conference "Physics and Control"*. St. Petersburg, Russia. 2005. P. 15-17.
12. **Li H., Furuta K., Chernousko F.L.** Motion generation of the Capsubot using internal force and static friction. *Proc. 45th IEEE Conference "Decision and Control"*. San Diego, USA. 2006. P. 6575-6580.
13. **Chernousko F.L.** Dynamics of a body controlled by internal motions. *Proc. IUTAM Symposium on Dynamics and Control of Nonlinear Systems with Uncertainty*. Nanjing, China. Dordrecht , Springer. 2007. P. 227-236.
14. **Chernousko F.L.** Two-dimensional motions of a body containing internal moving masses. *Meccanica*. 2016. V. 51. № 12. P. 3203-3209.
15. **Chernousko F.L.** Locomotion of multibody robotic systems: dynamics and optimization. *Theoretical and Applied Mechanics*. 2018. V. 45. № 1. P. 17-33.
16. **Черноусько Ф.Л.** Оптимальное управление движением двухмассовой системы. *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 480. № 5. С. 528-532.
17. **Chernousko F.L.** Optimal control of two-dimensional motions of a body by a movable mass. *IFAC PapersOnLine*. 2018. 51-2. P. 232-235.
18. **Chernousko F.L.** Optimal motions of bodies controlled by internal moving masses. *IFAC PapersOnLine*. 2018. 51-32.P.1-6.
19. **Шматков А.М.** Поворот тела за кратчайшее время перемещением точечной массы. *Доклады Академии наук*. 2018. Т. 481. № 5. С. 498-502.

F.L. Chernousko (Institute for Problems in Mechanics of Russian Academy of Sciences, Moscow). **Control of a rigid body motion by means of an auxiliary internal mass**

Abstract. The paper presents a short survey of research in dynamics and control of motions for mobile systems containing auxiliary movable internal masses.

УДК 531.3:681.5.01;531.3:62-50

А.А. ГОЛОВАН
(Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова)

ЗАДАЧА СТЕНДОВОЙ КАЛИБРОВКИ ИНЕРЦИАЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ

Обсуждаются методические аспекты задачи стендовой калибровки инерциально-измерительных блоков. За основу берется методика стендовой калибровки, предложенная Н.А. Парусниковым и развитая его коллегами и учениками. Приводится описание базовых моделей задачи – моделей инструментальных погрешностей инерциальных датчиков; плана калибровочных экспериментов, основанного на реализации по крайней мере трех циклов горизонтальных вращений блока; вариантов расширения методики для учета ряда значимых факторов в этой задачи.

Введение. Калибровка инерциальных датчиков – акселерометров (ньютонометров), датчиков угловых скоростей (ДУС) – является необходимым технологическим этапом при производстве инерциально-измерительных блоков (ИИБ) и бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), построенных на их основе.

Информационный смысл решения задачи калибровки состоит в оценке систематических составляющих априорно задаваемой модели погрешностей инерциальных датчиков с целью последующей их паспортизации и компенсации.

Помимо параметров инструментальных погрешностей в общую модель задачи калибровки включают параметры, отражающие геометрические погрешности: взаимные перекосы осей чувствительности датчиков; параметры конструктивного разнесения чувствительных масс акселерометров. Для динамичных объектов возможно требуется оценивать относительные запаздывания измерений датчиков. Возможен учет других возмущающих факторов.

На априорно задаваемые модели погрешностей накладываются температурные модели, когда некоторые параметры могут меняться при изменении температуры. Это обстоятельство следует учитывать при калибровке и при компенсации температурно зависимых погрешностей.

При проведении калибровочных экспериментов используются поворотные устройства - стенды: одноосные, двухосные, трехосные, возможно с термокамерами, возможно с регистрацией информации об угловых эволюциях установочной платформы – планшайбы стенда. Соответственно различают точные и грубые стенды, последние реализуют только вращение планшайбы.

На предприятиях, связанных с производством инерциальных датчиков и навигационных систем на их основе, специалистами предприятия решается в той или иной форме, на основе той или иной методики, задача калибровки ИИБ. Совсем не претендуя на полноту, отметим работы Г.И. Емельянцева и его коллег [1], Ландау Б.Е., В.З. Гусинского, Ю.А. Литмановича, Д.О. Тарановского и их коллег [2], [3], [4], К.К. Веремеенко и его коллег [5], Е.Ф. Поликовского и его коллег [6], [7], Ю.Г. Егорова и его учеников и коллег, см., например, [8], [9], С.Г. Николаева и его коллег [10]. Среди зарубежных авторов выделим работы Б.В. Климковича [11], [12], В.В. Аврутова [13], [14], P.G. Savage [15], [16], J.W. Diesel [17], D. H. Titterton [18].

В настоящее время сложились устойчивые подходы и методики калибровки. В главном, соответствующий план калибровочных экспериментов состоит из достаточно сложной последовательности статических положений ИИБ для калибровки, прежде всего блока акселерометров (см., например, [19, 20, 21]), последовательности вращений ИИБ (для калибровки блока ДУС). Реализация таких методик предполагает использование дорогостоящего стендового оборудования.

Особенность современного развития навигационных приложений, в частности, заключается в росте гражданских приложений, когда используются низкоточные или среднего класса точности инерциальные датчики. Такие проекты часто реализуются относительно небольшими компаниями, которые не могут себе позволить точные, а значит, дорогие стенды. Это же замечание относится и к научным, студенческим коллективам профильных кафедр университетов, занимающимися навигационными приложениями при использовании инерциальных датчиков.

Поэтому востребованной является методика калибровки, которая, с одной стороны, позволяет использовать для калибровки грубые стенды (а значит автоматически и точные стенды), а

также, которая может быть применима (с минимальными вариациями) для калибровки ИИБ или БИНС разного класса точности, в том числе, когда инерциальные датчики могут быть построены на различных физических принципах.

Такая методика впервые была сформулирована и изложена в 2009 г. Н.А. Парусниковым [22] и далее была развита им, его коллегами и учениками (Н.Б. Вавилова, А.В. Козлов, А.А Голован, И.Ю. Сазонов, И.А. Васинева, И.Е. Тарыгин [23–29]).

Основу методики составляет реализация на стенде трех циклов именно горизонтальных вращений блока. При этом достаточной для калибровки информацией служат показания самих инерциальных датчиков и, в этом смысле, ИИБ калибрует сам себя.

Было показано, что задача калибровки сводится к построению оценок вектора состояния линейной задачи оценивания при помощи фильтра Калмана. Компонентами вектора состояния служат параметры инструментальных погрешностей датчиков. Имеет место наблюдаемость оцениваемых параметров при реализации именно трех циклов горизонтальных вращений блока.

Изложение собственно методики калибровки предполагает описание:

- принятой модели инструментальных и геометрических погрешностей калибруемых датчиков инерциально-измерительного блока или БИНС;
- модели компенсации оцененных инструментальных и геометрических погрешностей инерциальных датчиков;
- плана угловых калибровочных движений планшайбы стенда;
- постановки задачи оценивания и используемых алгоритмов оценивания параметров.

Задача калибровки инерциально-измерительных блоков. Основу построения рабочего алгоритма калибровки служит математическая модель инструментальных погрешностей первичной инерциальной информации - инструментальных погрешностей ньютонометров, датчиков угловых скоростей.

Приведем такую модель, которая получила определенное распространение, она удобна для иллюстрации описываемого метода калибровки. Модель позволяет также конкретизировать понятие «приборный трехгранник».

Математическая модель инструментальных погрешностей инерциальных датчиков. При установке ньютонометров и ДУС на платформе, которая в свою очередь, жестко крепится на корпусе объекта, стараются сделать так, чтобы оси чувствительности акселерометров и ДУС составляли ортогональные трехгранники. И эти трехгранники совпадали бы друг с другом. Точно выполнить такую установку практически невозможно. Трехгранники не строго ортогональны и рассогласованы друг с другом. Но тогда требуется уточнение понятия приборного трехгранника. Ниже, в качестве примера, приводится описание одного из вариантов введения приборного трехгранника *Mz*.

Ось Mz_1 выберем так, чтобы она совпадала с направлением оси чувствительности ньютонометра, который назван первым. Ось Mz_2 выберем в плоскости, образованной осями чувствительности первого и второго ньютонометров так, чтобы ось Mz_2 была ортогональна оси Mz_1. Ось Mz_3 составляет с осями Mz_1, Mz_2 правый ортогональный трехгранник. Угол между осью чувствительности второго ньютонометра и осью Mz_2 и пространственный угол между осью чувствительности третьего ньютонометра и осью Mz_3 предполагаются малыми. В качестве точки M выбирается положение чувствительной массы первого ньютонометра.

Обозначим через χ^1, χ^2, χ^3 орты осей чувствительности ньютонометров, заданные своими проекциями на оси приборного трехгранника. В нашем случае получим:

$$\chi^1 = (1, \quad 0, \quad 0)^T, \ \chi^2 = (\Gamma_{21}, \quad 1, \quad 0)^T, \ \chi^3 = (\Gamma_{31}, \quad \Gamma_{32}, \quad 0)^T.$$

Здесь Γ_{21}, Γ_{31}, Γ_{32} – малые углы, характеризующие перекосы осей чувствительности ньютонометров.

Тогда для произвольного вектора l_χ, заданного своими проекциями в трехграннике, связанном с осями чувствительности ньютонометров, справедливо соотношение:

$$l_\chi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \Gamma_{21} & 1 & 0 \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & 1 \end{pmatrix} l_z.$$

Предполагается, что собственные инструментальные погрешности каждого из ньютонометров включают в себя погрешность нулевого сигнала (погрешность нуля), погрешность масштабного коэффициента (погрешность масштаба) и высокочастотную составляющую, которая считается белым шумом. Тогда вектор инструментальных погрешностей ньютонометров

$$\Delta f_z = f_z^{'} - f_z = \left(\Delta f_{z_1}, \quad \Delta f_{z_2}, \quad \Delta f_{z_3}\right)^T,$$

где $f_z^{'}$ – измерение блока ньютонометров, описывается соотношением

$$\Delta f_z = \Delta f_z^0 + \Gamma f_z + \Delta f_z^s, \tag{1}$$

где $\Delta f_z^0 = \left(\Delta f_{z_1}^0, \quad \Delta f_{z_2}^0, \quad \Delta f_{z_3}^0\right)^T$ – вектор погрешностей нулей,

$$\Gamma = \begin{pmatrix} \Gamma_{11} & 0 & 0 \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & 0 \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \Gamma_{21} & 0 & 0 \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \Gamma_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \Gamma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \Gamma_{33} \end{pmatrix},$$

$\Delta f_z^s = \left(\Delta f_{z_1}^s, \quad \Delta f_{z_2}^s, \quad \Delta f_{z_3}^s\right)^T$ – высокочастотные погрешности типа белого шума.

Пусть $\omega_z^{'}$ – измерения блока ДУС:

$$\omega_z^{'} = \omega_z - \nu_z,$$

где ω_z – вектор абсолютной угловой скорости приборного трехгранника Mz, ν_z – погрешность ДУС, знак минус в этой формуле выбран для согласования уравнений ошибок платформенных и бескарданных ИНС.

Для погрешностей $\nu_z = \left(\nu_{z_1}, \quad \nu_{z_2}, \quad \nu_{z_3}\right)^T$ принимается аналогичная (1) модель:

$$\nu_z = \nu_z^0 + \Theta\omega_z + \nu_z^s. \tag{2}$$

Физический смысл величин

$$\nu_z^0 = \begin{pmatrix} \nu_{z_1}^0 \\ \nu_{z_2}^0 \\ \nu_{z_3}^0 \end{pmatrix}, \ \Theta = \begin{pmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & \Theta_{13} \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & \Theta_{23} \\ \Theta_{31} & \Theta_{32} & \Theta_{33} \end{pmatrix}, \ \nu_z^s = \begin{pmatrix} \nu_{z_1}^s \\ \nu_{z_2}^s \\ \nu_{z_3}^s \end{pmatrix}$$

понятен без пояснений.

Все параметры моделей (1), (2), за исключением $\Delta f_z^s, \nu_z^s$ - неизвестные постоянные величины. Как уже отмечалось, модели (1), (2) получили достаточное распространение на практике, но вместе с тем они никак не учитывают, например, такие возмущающие факторы, как:

- возможное конструктивное разнесение чувствительных масс ньютонометров;
- возможное относительное запаздывание измерений датчиков;
- вариации параметров, обусловленных изменчивостью температуры;
- дрейфы ДУС, зависящие от перегрузки;
- чувствительность масштабных коэффициентов к знаку измеряемого параметра.

Для иллюстрации метода это не важно. С практической точки зрения, учет перечисленных выше факторов приводит к некоторой модификации плана вращений стенда и некоторых моделей задачи (описываемых ниже), оставляя в качестве главного план из трех горизонтальных вращений.

Модель компенсации оцененных инструментальных погрешностей инерциальных датчиков. Пусть $\Delta\tilde{f}_z^0, \tilde{\Gamma}, \tilde{\nu}_z^0, \tilde{\Theta}$ – оценки параметров инструментальных погрешностей инерциальных датчиков, полученные алгоритмом калибровки. Тогда

$$\tilde{f}_z = \left(I + \tilde{\Gamma}\right)^{-1}\left(f_z^{'} - \Delta\tilde{f}_z^0\right) \simeq \left(I - \tilde{\Gamma}\right)\left(f_z^{'} - \Delta\tilde{f}_z^0\right),$$
$$\tilde{\omega}_z = \left(I + \tilde{\Theta}\right)^{-1}\left(\omega_z^{'} + \nu_z^0\right) \simeq \left(I - \tilde{\Theta}\right)\left(\omega_z^{'} + \nu_z^0\right),$$

где $\tilde{f}_z, \tilde{\omega}_z$ – «поправленные» показания инерциальных датчиков, I – единичная матрица.

Программные движения платформы стенда. Чтобы получить оценки $\Delta\tilde{f}_z^0, \tilde{\Gamma}, \tilde{\nu}_z^0, \tilde{\Theta}$ перечисленных выше параметров $\Delta f_z^0, \Gamma, \nu_z^0, \Theta$ моделей (1), (2) погрешностей инерциальных датчиков, необходимо обеспечить такой эксперимент, в котором отдельные составляющие модели погрешностей инерциального измерительного блока проявлялись бы так, чтобы эффекты от них можно было разделить и оценить количественно с требуемой точностью. Такой эксперимент был предложен Н.А. Парусниковым [22]. Он состоит из вращений вокруг каждой из приборных осей, при которых ось вращения близка к горизонту:

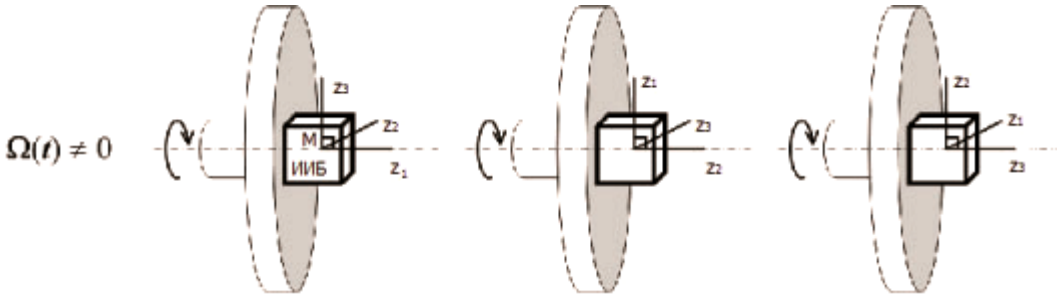


Рис.1. План калибровочный вращений.

Обозначим через A_{zx} матрицу ориентации приборного трехгранника *Mz* относительно географического трехгранника *Mx*, ориентированного по сторонам света: первая ось Mx_1 направлена на Восток, вторая Mx_2 – на Север, третья Mx_3 направлена по географической вертикали места вверх.

Имеет место кинематическое уравнение Пуассона:

$$\dot{A}_{zx} = \hat{\omega}_z A_{zx} - A_{zx}\hat{u}_x, \quad A_{zx}\left(t_0\right), \tag{3}$$

где ω_z – вектор абсолютной угловой скорости трехгранника *Mz* в собственных осях, u_x – вектор угловой скорости вращения Земли в осях *Mx*, $A_{zx}(t_0)$ – начальное значение матрицы ориентации, $\hat{\omega}_z$ – кососимметрическая матрица, поставленная в соответствие вектору $\omega_z = \left(\omega_{z_1}, \quad \omega_{z_2}, \quad \omega_{z_3}\right)^T$:

$$\hat{\omega}_z = \begin{pmatrix} 0 & \omega_{z_3} & -\omega_{z_2} \\ -\omega_{z_3} & 0 & \omega_{z_1} \\ \omega_{z_2} & -\omega_{z_1} & 0 \end{pmatrix}.$$

Так, если ось вращения стенда лежит в плоскости горизонта и направлена на Восток, то в первом цикле вращения имеем

$$A_{zx} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\chi & \sin\chi \\ 0 & -\sin\chi & \cos\chi \end{pmatrix}, \quad \chi = \int_{t_0}^{t} \Omega(t)dt, \quad \chi\left(t_0\right). \tag{4}$$

Здесь $\chi(t)$ – угол, на который поворачивается (против часовой стрелки) платформа стенда.

В данном случае векторы $\omega_z(t), f_z(t)$ примут вид:

$$\omega_z(t)=\begin{pmatrix}\Omega(t)\\ u\cos(\varphi-\chi)\\ u\sin(\varphi-\chi)\end{pmatrix},\ f_z(t)=g\begin{pmatrix}0\\ \sin\chi\\ \cos\chi\end{pmatrix}, \tag{5}$$

где u – модуль угловой скорости вращения Земли, g – значение удельной силы тяжести в точке M, φ – географическая широта места.

Тем самым векторы $\omega_z(t), f_z(t)$ модулируются при вращении планшайбы стенда.

Постановка задачи оценивания в калибровке. Рассмотрим кинематическое уравнение Пуассона для модельной матрицы ориентации A_{yx} – числового образа матрицы A_{zx}:

$$\dot{A}_{yx}=\hat{\omega}_z^{'}A_{yx}-A_{yx}\hat{u}_x,\ \ A_{yx}(t_0), \tag{6}$$

где $\omega_z^{'}$ – измерения блока ДУС, u_x – известный вектор угловой скорости вращения Земли в осях географического трехгранника с известной ориентацией в азимуте, $A_{yx}(t_0)$ – начальное значение матрицы ориентации A_{yx}, определяемое алгоритмами начальной выставки ИИБ на неподвижном основании (возможно с привлечением информации об азимутальной ориентации оси вращения стенда).

Матрица ориентации A_{yx} определяет ориентацию модельного трехгранника *My* относительно *Mx*. Введем матрицу A_{zy} взаимной ориентации приборного *Mz* и модельного *My* трехгранников. В линейном приближении ее будем характеризовать вектором малого поворота $\beta_y=\left(\beta_{y_1},\ \beta_{y_2},\ \beta_{y_3}\right)^T$:

$$A_{zy}=I+\hat{\beta}_y, \tag{7}$$

для которого справедливо следующее уравнение – кинематическое уравнение ошибок:

$$\dot{\beta}_y=\hat{\omega}_z^{'}\beta_y+\nu_z. \tag{8}$$

При помощи показаний $f_z^{'}$ блока акселерометров сформируем вектор измерений z_y:

$$z_y=f_z^{'}-f_y,\ f_y=A_{yz}f_x,\ f_x=\left(0,\ \ 0,\ \ g\right)^T. \tag{9}$$

В линейном приближении получим

$$z_y=\begin{pmatrix}z_{y_1}\\ z_{y_2}\\ z_{y_3}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0 & -f_{y_3} & f_{y_2}\\ f_{y_3} & 0 & -f_{y1}\\ -f_{y_2} & f_{y_1} & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\beta_{y_1}\\ \beta_{y_2}\\ \beta_{y_3}\end{pmatrix}+\Delta f_z. \tag{10}$$

Если использовать вместо векторов β_y, z_y их проекции β_x, z_x на оси географического трехгранника *Mx*

$$\beta_x=A_{yx}^T\beta_y,\ z_x=A_{yx}^Tz_y, \tag{11}$$

то получим аналогичные (8), (10) уравнения

$$\dot{\beta}_x=\hat{u}_x\beta_x+A_{yx}^T\nu_z,\ \ z_x=\begin{pmatrix}0 & -g & 0\\ g & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\beta_{x_1}\\ \beta_{x_2}\\ \beta_{x_3}\end{pmatrix}+A_{yx}^T\Delta f_z. \tag{12}$$

Переход от уравнений 8), (10) к уравнениям (11), (12), по сути, означает переход от использования моделей в осях «быстрого» трехгранника *Mz* к моделям, записанным в осях «медленного» трехгранника *Mx*.

Здесь выделим, что в (12) коэффициентом при угловых ошибках β_{x_1}, β_{x_2} служит «большая» величина *g*.

Введем вектор состояния *x*:

$$x = \left(\beta_{x_1} \cdots \beta_{x_3}, \nu^0_{z_1} \cdots \nu^0_{z_3}, \Delta f^0_{z_1} \cdots \Delta f^0_{z_3}, \Gamma_{11} \cdots \Gamma_{33}, \Theta_{11} \cdots \Theta_{33}\right)^T. \tag{13}$$

Тогда соотношения (11), (12) можно переписать в матричном виде

$$\dot{x} = Ax + q,\ z_z = Hx + w, \tag{14}$$

где

$$A = \begin{pmatrix} \hat{u}_x & A^T_{yx} & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},\ H = \begin{pmatrix} 0 & -g & 0 & 0 & 0 & 0 & & \cdots \\ g & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A^T_{yx} & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & \cdots \end{pmatrix}, \tag{15}$$

q, w – стохастические составляющие.

Далее при соответствующих гипотезах на *q, w* (нулевое математическое ожидание, нормальное распределение, априорные ковариации) ставится задача оценки вектора состояния *x* при помощи измерений z_x. Задача оценивания (14), переписанная эквивалентным образом в дискретной форме, может решаться при помощи фильтра Калмана, используя численно устойчивую реализацию фильтра методом квадратного корня из ковариационной матрицы.

Замечание. Для грубых инерциальных измерительных блоков при интегрировании уравнения ориентации (6), угловые ошибки $\beta_{y_1}, \beta_{y_2}, \beta_{y_3}$ могут выйти по величине за пределы допустимости применения линеаризации. В этом случае при счислении матрицы ориентации вводится A_{yx} обратная связь по текущим оценкам ошибок ориентации:

$$A_{yx} \to \left(I + \hat{\tilde{\beta}}_y\right) A_{yx},$$

где $\to$ обозначает замену старого значения новым.

Задача калибровки, поставленная как задача оценивания (14) неизбежно ставит вопрос о том, может ли такая задача быть принципиально решена. Ответ на этот вопрос дает соответствующий анализ наблюдаемости. Такой анализ, с положительным ответом на поставленный вопрос, был проведен [23, 24], причем наблюдаемость подтверждалась также ковариационным анализом.

Качественные рассуждения в проведенном анализе наблюдаемости сводились к тому, что если измеряется комбинация *z*(*t*) вида

$$z(t) = x_1 + x_2 \cos\chi + x_3 \sin\chi + x_4 \cos 2\chi + x_5 \sin 2\chi + \cdots,$$

где $\chi = \Omega t,\ \Omega = const$, и если в интервале наблюдения укладывается по крайнем мере один период $\frac{2\pi}{\Omega}$, то величины $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, \cdots$ наблюдаемы.

Полученные качественные выводы о наблюдаемости компонент вектора состояния задачи калибровки указывали на необходимость проведения трех циклов именно горизонтальных вращений.

Расширение калибровочных моделей. Описанный выше план трехцикловых горизонтальных вращений, приведенные модели задачи калибровки как задачи оценивания, служат нулевым приближением, отправной точкой для моделей реальной калибровки. Это связано, в частности, с тем, что:

- не всегда возможно обеспечить соосность оси вращения стенда с каждой из приборных осей ИИБ;

- всегда имеет место отнесение ИИБ как единого целого от оси вращения стенда, причем, в разных циклах вращения это отнесение может быть разным. Кроме того, может иметь место внутреннее разнесение чувствительных масс акселерометров;
- может иметь место временная рассинхронизация измерений ДУС и акселерометров;
- возможно использование угловых измерений от точного поворотного стенда;
- возможно использование для калибровки выходных позиционных, скоростных, угловых данные инерциального счисления БИНС;
- калибруемые параметры могут зависеть от температуры.

Некоторые из перечисленных выше особенностей практической калибровки них не вызывают необходимость изменения характера вращения, однако, в любом случае, не требуется строго выдерживать какие-либо значения параметров калибровочных экспериментов.

Далее приводится краткий обзор дополнительных составляющих для некоторых из описанных выше моделях.

Отнесения приведённой чувствительной массы M от центра вращения. При выводе модели (12) предполагалось, что точка M совпадает с центром вращения стенда. На практике такое условие трудновыполнимо, что влечёт за собой методическую погрешность в указанном уравнении. Она является существенной для точных систем, при быстрых вращениях и при значительном отнесении точки M от центра вращения. Приведём соответствующие поправки. Пусть центр вращения имеет координаты s_1, s_2, s_3 в приборных осях. Они могут быть измерены по конструкторской документации на ИИБ (или БИНС), поворотный стенд и технологическую оснастку. Однако нередки ситуации, когда по документации невозможно либо затруднительно определить эти координаты с достаточной точностью. Тогда требуется учесть в модели измерений поправки к известным значениям координат.

В уравнении (12) появляется дополнительное слагаемое:

$$z_x = \cdots + A_{yx}^T \left(-\hat{\omega}_z^{'2} + \hat{\dot{\omega}}_z^{'} \right) \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix}. \tag{16}$$

Неизвестные смещения s_1, s_2, s_3 добавляются в вектор состояния x (13). Если при смене оси вращения измерительных блок переустанавливается, то следует осуществить реинициализацию значений s_i и ковариации для них. Необходимо учесть также, что второе слагаемое (производная угловой скорости) в правой части (16) следует учитывать только тогда, когда по показаниям ДУС или информации стенда можно достаточно надежно оценить угловое ускорение, например численным дифференцированием.

Рассинхронизация ДУС и акселерометров. В случае, если между показаниями гироскопов и акселерометров имеется, например, общая постоянная временная задержка τ, то она включается в состав калибруемых параметров. В этом случае уравнение (12) дополняется членом:

$$z_x = \cdots + A_{yx}^T \omega_z^{'} \begin{pmatrix} f_{z_1}^{'} \\ f_{z_2}^{'} \\ f_{z_3}^{'} \end{pmatrix} \tau. \tag{17}$$

Параметр τ наблюдаем только при наличии нескольких различных значений угловой скорости при вращении.

Наличие угловых измерений от точного поворотного стенда. При калибровке часто используют точные поворотные стенды, предоставляющие точные измерения углов поворота осей стенда. Как показала практика обработки экспериментальных данных, включение этой информации в алгоритм оценивания имеет целый ряд преимуществ:

- ускоряется оценка дрейфов ДУС;

- становится возможной оценка ориентации приборного трёхгранника Mz относительно планшайбы поворотного стенда.

В измерения (12) добавляются измерения z_4, z_5, z_6, связанные с рассогласованием модельной матрицы ориентации A_{yx} и матрицы, полученной по информации об углах поворота осей стенда. Имеем

$$\begin{pmatrix} 1 & z_6 & -z_5 \\ -z_6 & 1 & z_4 \\ z_5 & -z_4 & 1 \end{pmatrix} \simeq A_{yz}^T A^{"T}, \tag{18}$$

где $A^{"}$ – матрица ориентации, вычисленная по угловым измерениям стенда.

Обозначим через $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ неизвестные малые углы поворота приборной системы координат Mz относительно трехгранника, связанного с планшайбой стенда. Добавим $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ в вектор состояния x (13). Тройка новых измерений (\18) связана с компонентами нового вектора состояния следующим образом:

$$\begin{pmatrix} z_4 \\ z_5 \\ z_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{pmatrix} - A_{yx}^T \begin{pmatrix} \beta_{x_1} \\ \beta_{x_2} \\ \beta_{x_3} \end{pmatrix}. \tag{19}$$

Следует учесть, что в реальности не удается удовлетворительно синхронизировать показания поворотного стенда с данными инерциальных датчиков. Поэтому использовать измерения (19) приходится только тогда, когда стенд неподвижен. Это означает, что в план эксперимента необходимо включить интервалы неподвижности ИИБ в нескольких различных положениях. Показания датчиков на этих же положениях могут также использоваться для контроля точности калибровки акселерометров.

Температурные коэффициенты. Большинство калибруемых параметров инерциальных датчиков зависят от температуры. Стандартный подход к калибровке этих зависимостей предполагает проведение калибровочных экспериментов в отдельных температурных точках. Однако установление допустимого уровня температурного равновесия при переходе от одной температурной точки к другой зачастую требует значительного времени.

Задачу калибровки можно расширить за счет введения зависимостей инструментальных погрешностей датчиков от температуры и производной температуры по времени. При этом в эксперименте должны быть созданы условия для изменяющейся температуры.

Обозначим через $T_{f_1}, T_{f_2}, T_{f_3}$ показания термодатчиков блока акселерометров. Тогда модель (1) дополняется, например, слагаемыми

$$\Delta f_z = \cdots + \begin{pmatrix} T_{f_1} & 0 & 0 \\ 0 & T_{f_2} & 0 \\ 0 & 0 & T_{f_3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k_{\Delta f_1} \\ k_{\Delta f_2} \\ k_{\Delta f_3} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_{\Gamma_1 1} & 0 & 0 \\ 0 & K_{\Gamma_2 2} & 0 \\ 0 & 0 & K_{\Gamma_3 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f'_{z_1} \\ f'_{z_2} \\ f'_{z_3} \end{pmatrix} + \cdots \tag{20}$$

где $k_{\Delta f_i}, K_{\Gamma_i i}, (i = 1,2,3)$ – неизвестные температурные коэффициенты соответственно нулевого сигнала и масштабного коэффициента i-го акселерометра.

Аналогичная модель ($k_{\nu_i}, K_{\Theta_i i}, (i = 1,2,3)$) вводится для погрешностей датчиков угловой скорости и все указанные параметры добавляются в вектор состояния x.

Для наблюдаемости температурных коэффициентов достаточно, чтобы температура инерциальных датчиков изменялась линейно независимо с угловой скоростью вращения планшайбы стенда, что имеет место на практике. Особенности калибровки температурных коэффициентов описаны в [27, 28].

Калибровка при использовании вторичной (выходной) навигационной информации. Рассмотрим ситуацию, когда при калибровке БИНС функционирует в навигационном режиме и начальная выставка системы осуществлена. Исходной информацией для калибровки служат модельные (выходные) значения координат и составляющих скорости. Из рассмотрения исключается вертикальный канал БИНС.

Сначала рассмотрим случай, когда точка *M* лежит на оси вращения стенда. Тогда задачу калибровки можно рассматривать как задачу коррекции БИНС при помощи позиционной (координаты точки M известны) и скоростной информации (относительная скорость равна нулю).

Модель задачи коррекции составляют уравнения ошибок БИНС, например, для случая относительно-свободной ориентации опорного географического трехгранника *Mx*. Необходимый фрагмент уравнений ошибок БИНС в этом случае имеет вид [29, 30]:

$$\begin{aligned}
&\Delta\dot{y}_1 = \delta V_1,\ \ \Delta\dot{y}_2 = \delta V_2,\\
&\delta\dot{V}_1 = \ \ 2u_{x_3}\delta V_2 - g\beta_{x_2} - \omega_0^2\Delta y_1 + a_{11}\Delta f_{z_1} + a_{21}\Delta f_{z_2} + a_{31}\Delta f_{z_3},\\
&\delta\dot{V}_2 = -2u_{x_3}\delta V_1 + g\beta_{x_1} - \omega_0^2\Delta y_2 + a_{12}\Delta f_{z_1} + a_{22}\Delta f_{z_2} + a_{32}\Delta f_{z_3},\\
&\dot{\beta}_{x_1} = \ \ u_{x_3}\beta_{x_2} - u_{x_2}\beta_{x_3} + a_{11}\nu_{z_1} + a_{21}\nu_{z_2} + a_{31}\nu_{z_3},\\
&\dot{\beta}_{x_2} = -u_{x_3}\beta_{x_1} + u_{x_1}\beta_{x_3} + a_{12}\nu_{z_1} + a_{22}\nu_{z_2} + a_{32}\nu_{z_3},\\
&\dot{\beta}_{x_3} = \ \ u_{x_2}\beta_{x_1} - u_{x_1}\beta_{x_2} + a_{13}\nu_{z_1} + a_{23}\nu_{z_2} + a_{33}\nu_{z_3},
\end{aligned} \tag{21}$$

Здесь Δy_1, Δy_2 – полные ошибки местоположения, приведенные к осям модельного географического трехгранника, являющегося числовым образом опорного географического трехгранника Mx; $\delta V_1, \delta V_2$ – динамические ошибки определения горизонтальных составляющих V_1, V_2 относительной скорости движения; $\beta_{x_1}, \beta_{x_2}, \beta_{x_3}$ – кинематические ошибки; $a_{ij}, (i,j=1,2,3)$ - элементы матрицы A_{yx}, Δf_{z_i}, $\nu_{z_i}, (i=1,2,3)$ - погрешности акселерометров (1) и ДУС (2).

Вектор коррекции $z = \left(z_{y_1}, z_{y_2}, z_{V_1}, z_{V_2}\right)^T$ формируется в следующем виде

$$\begin{aligned}
&z_{y_1} = \Delta y_1,\ z_{y_2} = \Delta y_2,\\
&z_{V_1} = V_1^{'} = \delta V_1,\ z_{V_2} = V_2^{'} = \delta V_2,
\end{aligned}$$

где $V_1^{'}$, $V_2^{'}$ – компоненты выходной линейной скорости, они же динамические ошибки БИНС, поскольку точка *M* предполагается пока неподвижной относительно Земли.

Из уравнений ошибок (21) можно исключить первые два уравнения, а третье и четвертое очевидным образом модифицировать

$$\begin{aligned}
&\delta\dot{V}_1 = \ \ 2u_{x_3}\delta V_2 - g\beta_{x_2} - \omega_0^2 z_{y_1} + a_{11}\Delta f_{z_1} + a_{21}\Delta f_{z_2} + a_{31}\Delta f_{z_3},\\
&\delta\dot{V}_2 = -2u_{x_3}\delta V_1 + g\beta_{x_1} - \omega_0^2 z_{y_2} + a_{12}\Delta f_{z_1} + a_{22}\Delta f_{z_2} + a_{32}\Delta f_{z_3}.
\end{aligned}$$

К моделям величин z_{V_1}, z_{V_2} должны быть добавлены регуляризирующие фиктивные шумы w_{V_1}, w_{V_2}.

Введем вектор состояния *x* (схожий с (13)):

$$x = \left(\delta V_1, \delta V_2, \beta_{x_1} \cdots \beta_{x_3}, \nu_{z_1}^0 \cdots \nu_{z_3}^0, \Delta f_{z_1}^0 \cdots \Delta f_{z_3}^0, \Gamma_{11} \cdots \Gamma_{33}, \Theta_{11} \cdots \Theta_{33}\right)^T. \tag{22}$$

Тем самым, задача опять сводится к построению оценок вектора состояния *x* линейной динамической системы при помощи вектора измерений *z*, линейно зависящего от компонент вектора состояния. То есть, задача калибровки, решаемая при помощи первичных измерений инерциальных датчиков, и задача калибровки, решаемая при помощи выходной (вторичной) позиционной, скоростной информации БИНС, информационно это одна и та же задача.

Очевидно, что точность калибровки при помощи вторичной информации будет менее высокой по сравнению с точностью калибровки при помощи первичной информации, если рассматривать эту точность в одни и те же моменты времени. Однако это обстоятельство устраняется за счет увеличения времени калибровки.

Учет отстояния приведенного центра БИНС от оси вращения платформы. При калибровке при помощи вторичной информации также, как и в случае первичной информации, приходится учитывать возможное отстояние приведенного центра БИНС от оси вращения платформы стенда. Величина расстояния приведенного центра БИНС от оси вращения может достигать величин порядка десяти сантиметров и более. Очевидно, для позиционных составляющих вектора коррекции эта величина несущественная, но для скоростных составляющих она требует учета.

Обозначим через *N* проекцию точки *M*, с которой связывается приведенный центр БИНС, на ось вращения платформы. Введем вектор $\rho = \left(\overline{MN}\right)_z = \left(\rho_{z_1},\ \rho_{z_2},\ \rho_{z_3}\right)^T$, заданный своими проекциями на оси приборного трехгранника *Mz*. Тогда дополнительной информацией о скорости точки *M* будет не нулевая скорость, как в случае расположения ее на оси вращения, а следующая величина:

$$V_z = \widehat{\Omega}_z \rho_z , \tag{23}$$

где Ω_z – относительная угловая скорость приборного трехгранника *Mz*.

С учетом того, что $V_x = A_{zx}^T V_z$, получим следующие выражения для компонент вектора коррекции:

$$\begin{aligned} z_{V_1} &= \delta V_1 - \left[\left(a_{31}\Omega_{z_2} - a_{21}\Omega_{z_3}\right)\rho_{z_1} + \left(a_{11}\Omega_{z_3} - a_{31}\Omega_{z_1}\right)\rho_{z_2} + \left(-a_{11}\Omega_{z_2} + a_{21}\Omega_{z_1}\right)\rho_{z_2}\right] + w_1^s, \\ z_{V_2} &= \delta V_2 - \left[\left(a_{32}\Omega_{z_2} - a_{22}\Omega_{z_3}\right)\rho_{z_1} + \left(a_{12}\Omega_{z_3} - a_{32}\Omega_{z_1}\right)\rho_{z_2} + \left(-a_{12}\Omega_{z_2} + a_{22}\Omega_{z_1}\right)\rho_{z_2}\right] + w_2^s. \end{aligned} \tag{24}$$

В том случае, когда $\rho_{z_1},\ \rho_{z_2},\ \rho_{z_3}$ неизвестны, их необходимо добавить в вектор оцениваемых параметров.

В модели (24) вполне допустимо вместо Ω_z использовать вектор абсолютной ω_z угловой скорости приборного трехгранника *Mz*, либо показания ДУС ω'_z поскольку угловая скорость собственного вращения стенда на порядки превосходит угловую скорость вращения Земли. Другой вариант – использование данных об угловой скорости вращения стенда, если такая информации доступна.

Заключение. В работе методологически описан подход к постановке задачи динамической стендовой калибровки ИИБ или БИНС. Основу методики составляет реализация на стенде трех циклов горизонтальных вращений блока.

Отражены две главных особенности метода:

- калибровка осуществляется именно для системы в сборе;
- в качестве основной информации при калибровке служат показания самих калибруемых датчиков – ньютонометров и ДУС.

Показано, что задача калибровки сводится к решению линейной стохастической задачи оценивания при помощи фильтра Калмана. Главными достоинствами метода являются:

- возможность калибровки на грубых одноосных стендах;
- отсутствие жестких требований к плану операций, их последовательности и параметрам движения;
- широкие возможности расширения модели задачи путем включение в нее дополнительных параметров, существенных для систем различного класса точности, а также инструментальных погрешностей стенда.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Емельянцев Г.И., Блажнов Б.А., Драницына Е.В., Степанов А.П.** О калибровке измерительного модуля прецизионной БИНС и построении связанного с ним ортогонального трёхгранника // Гироскопия и навигация, 2016, № 1(92). С. 36–48.
2. **Ландау Б.Е., Гуревич С.С., Емельянцев Г.Н., Левин СЛ., Одинцов Б.В., Романенко С.Г.** Результаты калибровки электростатических гироскопов в бескарданной инерциальной системе ориентации // Юбилейная XV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам — СПб, 2008, с.122-129.
3. **Гусинский В.З., Лесючевский В.М., Литманович Ю.А., Столбов А.А.** Алгоритм калибровки трехосного блока акселерометров, предназначенного для использования в БИНС. // Гироскопия и навигация. 2000. -№ 4. - С. 86.
4. **Тарановский Д.О.** Стендовая калибровка блока маятниковых поплаковых акселерометров корабельной инерциальной навигационной системы // *Гироскопия и навигация*. 2008. № 4 (63). 65 с
5. **Веремеенко К.К. Галай И.А.** Разработка алгоритма калибровки инерциальной навигационной системы на двухосном испытательном стенде // Труды МАИ №63
6. **Браславский Д.А., Поляковский Е.Ф., Якубович А.М.** Метод калибровки трехосного блока акселерометров. Заявка на изобретение № 2422425,23 с приоритетом от 24 ноября 1976 г.
7. **Измайлов Е.А., Лепе С.Н., Молчанов А.В., Поликовский Е.Ф.** Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Сборник материалов Юбилейной XV Санкт-Петербургской конференции по интегрированным навигационным системам. С Пб., 2008.
8. **Егоров Ю.Г., Шаймарданов И.Х., Дзуев А.А., Некрасов А.В.** Итерационная процедура калибровки чувствительных элементов БИНС. // Авиакосмическое приборостроение 2018 .- № 2 .- С. 3 – 17
9. **Егоров Ю.Г., Попов Е.А.** Исследование минимально избыточных программ калибровки триады акселерометров // *Авиакосмическое приборостроение*. 2016. № 6. С. 3-8
10. **Nikolaev S. G., Golota A. V.** Strapdown Inertial Navigation System Calibration // 2017 2nd International Ural Conference on Measurements (UralCon) : proceedings, South Ural State Univ. (nat. research univ.), Chelyabinsk, Russ. Federation, Oct. 16-19, 2017. / Inst. of Electrical and Electronics Eng. (IEEE). - New York : IEEE, 2017. - P. 68-73.
11. **Климкович Б.В., Толочко А.М.** Определение запаздываний в измерительных каналах при калибровке БИНС в инерциальном режиме // Гироскопия и навигация, 2015, №4 (91). С. 55-66
12. **Климкович Б.В., Толочко А.М.** Учет size-эффекта при калибровке БИНС // Гироскопия и навигация, 2015, №1. С. 82-93
13. **Автуров В.В.** Испытания инерциальных приборов: Учебное пособие / НТУУ «КПИ», 2016. – 205 с.
14. **Автуров В.В.** О скалярной калибровке блока гироскопов и акселерометров. Киев: Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Серія: Приладобудування., 2010. № 40. С. 10 – 17.
15. **Savage P. G.** Improved strapdown inertial system calibration procedures. Part 1 - procedures and accuracy analysis. //Strapdown Associates, Inc. Maple Plain, MN 55359 USA WBN-14020-1 www.strapdowassociates.com October 20, 2017
16. **Savage P. G.** Improved strapdown inertial system calibration procedures. Part 2 - analytical derivations //Strapdown Associates, Inc. Maple Plain, MN 55359 USA WBN-14020-2 www.strapdowassociates.com **October 20, 2017**
17. **Diesel J.W.** Calibration of a Ring Laser Gyro Inertial Navigation System // Proceedings of the 13-th Biennal Guidance Test Symposium, 6–8 October 1987, Holloman AFB, New Mexico. AD-TR-87-08. – USA. – 6585th Test group, Central inertial guidance test facility. – 1987. – Vol. I. – P. S01A 1-37.
18. **Titterton D. H., Weston J. L.** Strapdown Inertial Navigation Technology - 2nd Edition. Reston, USA : The Institution of Electrical Engineers, 2004 г.
19. **Бобрик Г.И., Матасов А.И.** Оптимальное гарантированное оценивания параметров блока ньютонометров. // Известия РАН, МТТ, 1993, № 8. С. 8–14.
20. Акимов П.А., Деревянкин А.В., Матасов А.И. Гарантирующий подход и L1-аппоксимация в задачах оценивания параметров БИНС при стендовых испытаниях. Изд-во Моск. Ун-та, 2012, - 296 с.
21. Болотин Ю.В., Голиков В.П., Ларионов С.В., Требухов А.В. Алгоритмы калибровки платформенной инерциальной навигационной системы. // Гироскопия и навигация, 2008, №3 . С. 13-27
22. **Парусников Н.А.** Задача калибровки бескарданной инерциальной навигационной системы на стенде. // Известия РАН. МТТ, 2009, № 4.
23. **Вавилова Н. Б., Парусников Н. А., Сазонов И. Ю.** Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем при помощи грубых одностепенных стендов. // Современные проблемы математики и механики, 2009, том 1. С. 212-223.
24. **Вавилова Н. Б., Сазонов И. В.** Калибровка бескарданной инерциальной навигационной системы в сборе на грубых стендах с одной степенью свободы. // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика", 2012, том 1, № 4. С. 64-66
25. **Козлов А. В., Сазонов И. Ю., Вавилова Н. Б., Парусников Н. А.** Калибровка инерциальных навигационных систем на грубых стендах с учетом разнесения чувствительных масс ньютонометров. // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 2013,г. Санкт-Петербург,ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". С. 104-107.

26. **Вавилова Н. Б., Васинёва И. А., Парусников Н. А.** О стендовой калибровке авиационных бескарданных инерциальных навигационных систем. // Электронный журнал "Труды МАИ", 2015, № 84.
27. **Козлов А.В., Тарыгин И.Е., Голован А.А., Шаймарданов И.Х., Дзуев А.А.** Калибровка инерциальных измерительных блоков с оценкой температурных зависимостей по эксперименту с переменной температурой: результаты калибровки БИНС-РТ // Сборник материалов XXIV Санкт-Петербургской конференции по интегрированным навигационным системам, 2017, С-Пб, Государственный научный центр РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". стр. 225–228.
28. **Козлов А.В., Тарыгин И.Е., Голован А.А.** Калибровка инерциальных измерительных блоков на грубых стендах с оценкой температурных зависимостей по эксперименту с переменной температурой // Сборник материалов XXI Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам.– СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. – С. 319–322.
29. **Голован А.А., Парусников Н.А.** Математические основы навигационных систем. Часть I. Математические модели инерциальной навигации. М.: "МАКС Пресс Москва", 2011.
30. **Голован А.А., Парусников Н.А**. Математические основы навигационных систем. Часть II. Математические модели инерциальной навигации. М.: "МАКС Пресс Москва", 2012.

A.A. Golovan (Lomonosov Moscow State University, Moscow). **The problem of inertial measurement unit calibration on a test bench.**

Abstract. In the paper the methodical aspects of inertial measurement unit calibration on a test bench are discussed. The method of calibration proposed by N. A. Parusnikov and developed by his colleagues is used as a reference basic method. Paper presents models of instrumental errors of inertial sensors; plan of calibration experiments that consists at least of three cycles of horizontal rotations of an inertial measurement unit. Some important details for expanding of the mentioned method are also presented.

УДК 681.51

А.В. МОТОРИН
(Университет ИТМО, ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

КОМПЛЕКСНАЯ ОБРАБОТКА НАВИГАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МОДЕЛЕЙ ПОЛЕЗНЫХ СИГНАЛОВ И ПОГРЕШНОСТЕЙ

Анализируются особенности постановок задач комплексной обработки навигационных измерений. Приводится классическая стохастическая постановка такой задачи и ее решение в рамках байесовского подхода с использованием фильтра Калмана и нелинейных фильтров. Обсуждается проблема получения моделей полезных сигналов и погрешностей, а также методы ее решения. Кратко описывается алгоритм идентификации моделей в рамках байесовского подхода. Показано, что на его основе может быть решена адаптивная задача оценивания в условиях неопределенности моделей полезных сигналов и погрешностей.

Введение. В настоящее время при создании навигационных систем, как правило, предполагается использование информации от множества датчиков и средств коррекции, что позволяет существенно повысить точность и надежность разрабатываемых систем [1–8]. Для совместной обработки поступающей навигационной информации в таких системах широкое применение получили алгоритмы стохастической фильтрации, в частности, фильтр Калмана (ФК) [9, 10] и различные его модификации [11–14], либо более сложные алгоритмы, основанные, например, на методе Монте-Карло и методе точечных масс и позволяющие учесть нелинейный характер задачи [13–17]. Построение алгоритмов стохастической фильтрации опирается на предположение о случайном характере погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции, что, в свою очередь, требует задания их моделей в виде случайных процессов или последовательностей. Вопрос получения таких моделей во многом остается актуальным и в настоящее время.

В связи с этим в настоящей работе анализируются особенности постановок задач комплексной обработки навигационной информации. Обсуждаются особенности применения байесовских линейных и нелинейных алгоритмов оценивания. Иллюстрируются возможности применения адаптивных байесовских алгоритмов в задачах обработки навигационной информации.

Комплексная обработка навигационных измерений. Наиболее широкое распространение при комплексной обработке навигационной информации в настоящее время получил ФК. Начиная с применения в навигационных комплексах для кораблей и подводных лодок, лунной космической программы в 60-70 годах прошлого века [18, 19], ФК в настоящее время применяется вплоть до мобильных приложений (рис. 1). При этом математическая постановка задачи фильтрации [4, 9] формулируется достаточно абстрактно. ФК предназначен для получения оптимальной байесовской оценки n-мерного случайного вектора состояния x_i, описываемого системой разностных уравнений:

$$x_i = \Phi_i x_{i-1} + \Gamma_i w_i, \tag{1}$$

по m-мерным измерениям вида

$$y_i = H_i x_i + v_i, \tag{2}$$

где Φ_i, H_i, Γ_i – известные матрицы, w_i, v_i – дискретные центрированные белые шумы с известными матрицами ковариаций, не коррелированные между собой и вектором состояния. Каким же образом может быть определен вектор состояния, матрицы Φ_i, H_i, Γ_i и матрицы ковариаций шумов w_i, v_i в реальных приложениях к задачам обработки навигационной информации? Для того чтобы понять это, рассмотрим простой пример. На рис. 1 справа показаны зоны пешей доступности для пешехода.

Их расчет основан на априорном знании средней скорости движения пешехода. Например, средний пешеход за 5 минут может оказаться в радиусе ближнего круга, а за 10 – в радиусе дальнего, но маловероятно, что дальше. Уже основываясь на этой информации, можно построить стохастическую модель (1).

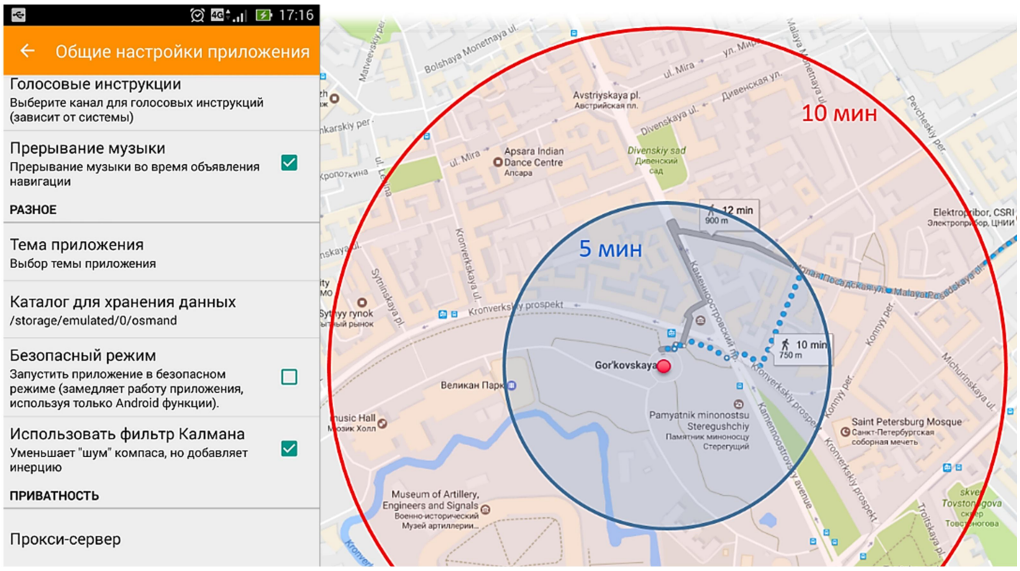


Рис. 1. Слева – приложение OsmAnd со включенной функцией ФК.
Справа – зоны пешей доступности пешеходов от метро Горьковская.

Например, пусть обозначенные круги соответствуют кругам равной вероятности функции плотности гауссовского распределения, определённой над плоскими координатами карты. Это соответствует духу байесовского подхода, где случайность соответствует неопределенности знания величины. В рассматриваемом примере со временем пешеход может уйти все дальше от начальной точки. Так как направление движения нам неизвестно, неопределенность знания его координат становится все больше, таким образом, и радиусы кругов вероятностей, и дисперсии каждой из координат будут расти со временем. Соответствующая модель может быть записана в виде

$$\begin{aligned} x_i^1 &= x_{i-1}^1 + \sigma_{wx} w_i^1, \\ x_i^2 &= x_{i-1}^2 + \sigma_{wx} w_i^2, \end{aligned} \tag{3}$$

где $x_i = \left[x_i^1, x_i^2 \right]^T$ – координаты пешехода в прямоугольной декартовой системе, w_i^1, w_i^2 – дискретные центрированные гауссовские порождающие белые шумы, σ_{wx} – среднеквадратическое отклонение (СКО) порождающих шумов, которое определяет среднее смещение пешехода за время $\Delta t = t_i - t_{i-1}$. Именно σ_{wx} и определяет среднюю скорость пешехода. Отметим, что модель (3) и соответствует модели (1) с единичной матрицей Φ_i и $\Gamma_i = [1 \;\; 1]^T$. С использованием такой модели можно осуществить калмановскую фильтрацию, например, для показаний спутниковых навигационных систем (СНС), которые можно упрощенно представить в виде:

$$\begin{bmatrix} y_i^1 \\ y_i^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i^1 \\ x_i^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_i^1 \\ v_i^2 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

где y_i^1, y_i^2 – измерения СНС, v_i^1, v_i^2 – дискретные центрированные гауссовские белые шумы, представляющие их погрешности. Как показывает практика, использование такой модели при обработке информации не может заметно повысить точность исходных измерений [4]. Дело в том, что количество новой привлекаемой информации достаточно мало, используется только априорная информация о средней скорости движения. Таким образом, существенно повысить точность не удается, тем не менее, для навигации в мобильном приложении этого может быть вполне достаточно.

В отсутствие измерений ФК работает в режиме прогноза. Можно показать, что в случае использования модели (3) прогноз соответствует начальному положению. Несмотря на то, что это звучит нелогично, такой прогноз является оптимальным в байесовском смысле. Согласно ему мы пытаемся найти прогноз (или оценку), минимизирующую критерий:

$$J^B = M_{x_i,Y_i}\left\langle Sp\left\{(x_i-\tilde{x}_i(Y_i))(x_i-\tilde{x}_i(Y_i))^{\mathrm{T}}\right\}\right\rangle = Sp\left\{\int\int (x_i-\tilde{x}_i(Y_i))(x_i-\tilde{x}_i(Y_i))^{\mathrm{T}}\, p(x_i,Y_i)dx_i dY_i\right\}, \quad (5)$$

где $Sp\{\bullet\}$ означает операцию взятия следа матрицы, M_{x_i,Y_i} – операция взятия математического ожидания по $p(x_i,Y_i)$ – совместной ф.п.р.в. вектора измерений $Y_i=\left[y_1...y_i\right]^T$ и оцениваемого вектора x_i. $\tilde{x}_i(Y_i)$ – оценка вектора состояния (то есть координат), полученная по набору измерений Y_i. Взятие интеграла по совместной ф.п.р.в. означает, что критерий минимизируется в среднем по всем возможным реализациям как измерений, так и самого оцениваемого процесса. Возвращаясь к примеру, каждый пешеход, как правило, уходит из начальной точки, но если рассмотреть толпу людей, то среднее значение их перемещения окажется близким к нулю. Отметим, что критерий (5) и минимизирующая его оценка ФК в ряде случаев совпадают соответственно с критериями и оценками метода наименьших квадратов и метода максимума функции правдоподобия [5].

Для более точного определения координат необходимо привлечение дополнительной информации. Например, используя информацию о направлении и скорости движения, можно определить координаты с помощью соотношений:

$$\begin{aligned} x_i^1 &= x_{i-1}^1 + V_i\Delta t\sin K_i, \\ x_i^2 &= x_{i-1}^2 + V_i\Delta t\cos K_i, \end{aligned} \quad (6)$$

где V_i и K_i соответственно истинные скорость и путевой угол объекта. Соотношения (6) соответствуют простейшему алгоритму счисления пути. На практике V_i и K_i измеряются, и, как правило, измеренные величины $\tilde{V}_i$, $\tilde{K}_i$ имеют погрешности, т.е. $\tilde{V}_i=V_i+\Delta V_i$, $\tilde{K}_i=K_i+\Delta K_i$. В результате координаты $\tilde{x}_i$ на выходе алгоритма счисления пути также обладают погрешностью. Уравнения для оцениваемого вектора состояний могут быть получены путем замены $V_i=\tilde{V}_i-\Delta V_i$, $K_i=\tilde{K}_i-\Delta K_i$. Таким образом, вновь возникает задача оценивания случайного вектора (6) по зашумленным измерениям (4), которая и является задачей комплексной обработки навигационной информации.

Часто применяют комплементарную схему и переходят от оценивания непосредственно координат (6) к оценкам погрешностей системы навигации. Для погрешностей системы навигации Δx_i^1, Δx_i^2 можно получить следующую линейную модель:

$$\begin{aligned} \Delta x_i^1 &= \Delta x_{i-1}^1 + \Delta K_i\tilde{V}_i\Delta t\cos\tilde{K}_i + \Delta V_i\Delta t\sin\tilde{K}_i, \\ \Delta x_i^2 &= \Delta x_{i-1}^2 - \Delta K_i\tilde{V}_i\Delta t\sin\tilde{K}_i + \Delta V_i\Delta t\cos\tilde{K}_i, \end{aligned} \quad (7)$$

где погрешности датчиков приняты малыми, т.е. $\cos\Delta K_i\approx 1$; $\sin\Delta K_i\approx\Delta K_i$; $\Delta V_i\Delta K_i\approx 0$. Для их оценивания формируются разностные измерения:

$$\Delta y_i = y_i - s(\tilde{x}_i) = H_i(\tilde{x}_i)\Delta x_i + v_i, \quad (8)$$

где $H_i(\tilde{x}_i)$ – в простейшем случае является матрицей Якоби нелинейной вектор-функции $s(\tilde{x}_i)$, рассчитанной для значений $\tilde{x}_i$. Появление нелинейной функции $s(\tilde{x}_i)$ означает, что в общем случае измеряются не сами координаты, а другие, возможно нелинейно с ними связанные величины, например, дальности или пеленги до известных ориентиров. Разностные измерения содержат сумму погрешностей системы навигации Δx_i, определяющиеся моделью (7), и системы коррекции v_i, как правило, считающихся белошумными. Наличие небелошумных составляющих в погрешностях датчиков приводит к расширению вектора состояния этой модели. Он дополняется составляющими, описывающими стохастические модели погрешностей, в частности, это могут быть и небелошумные погрешности ΔV_i, ΔK_i. В результате в фильтре вырабатываются оценки погрешностей системы навигации $\Delta\hat{x}_i$ и датчиков $\Delta\hat{V}_i$, $\Delta\hat{K}_i$ по измерениям (8). Оценка непосредственно координат вычисляется путем учета оценок погрешностей на выходе системы навигации $\hat{x}_i=\tilde{x}_i-\Delta\hat{x}_i$. Оценки небелошумных погрешностей курса и ско-

рости также могут быть учтены на выходе соответствующих датчиков. Такой подход в случае линейных моделей измерений и вектора состояния оказывается инвариантным к движению самого объекта [4]. В этом случае точность оценивания зависит не от характера движения объекта, а только от точности датчиков и измерений.

При использовании данных инерциальных датчиков вместо (6) следует использовать соотношения, описывающие алгоритмы работы инерциальной системы навигации, включающие уравнения Пуассона, преобразования данных акселерометров на оси географического сопровождающего трехгранника и их интегрирования. Модели погрешностей для этого и ряда других примеров можно найти в литературе [3, 4, 8, 20–23]. Отметим, что часть данных, а именно измерения путевого угла и скорости, поступают в ФК не как измерения, а используются при описании оцениваемого вектора состояния [4, 8, 20, 24], что называется принципом распределения информации.

Что касается нелинейностей, которые в современных задачах зачастую присутствуют как в измерениях, так и в уравнениях для вектора состояния, то разнообразие алгоритмов, появившихся для работы с ними, проще пояснить с позиций байесовского подхода. Байесовские алгоритмы оценивания, к которым относится и ФК, находят оптимальную в смысле критерия (5) оценку, которая является математическим ожиданием, соответствующим условной функции плотности распределения вероятностей (ф.п.р.в.) $f(x/Y)$, т.е.

$$\hat{x}(Y) = \int x f(x / Y) dx. \tag{9}$$

Для условной ф.п.р.в. справедливы следующие, вытекающие из правил Байеса рекуррентные соотношения:

$$p(x_i / Y_{i-1}) = \int p(x_i / x_{i-1}) p(x_{i-1} / Y_{i-1}) dx_{i-1}; \tag{10}$$

$$p(x_i / Y_i) = \frac{p(y_i / x_i) p(x_i / Y_{i-1})}{\int p(y_i / x_i) p(x_i / Y_{i-1}) dx_i}, \tag{11}$$

где (10) соответствует условной ф.п.р.в. прогноза, а (11) – оценки. В случае если все плотности вероятностей и функции правдоподобия, входящие в (10), (11) гауссовские (а это верно при линейной модели, гауссовских начальных условиях, порождающих шумах и шумах измерений), с использованием этих выражений можно получить рекуррентные выражения для соответствующих матриц ковариаций и математических ожиданий гауссовской апостериорной ф.п.р.в. Они и будут соотношениями ФК [4]. В случае нелинейных моделей или негауссовских шумов, входящие в (10), (11), ф.п.р.в. гауссовскими не являются. Одно из возможных решений – аппроксимация гауссовской плотностью. Это и осуществляется при линеаризации, в случае обобщенного ФК – с использованием разложения нелинейных функций в ряд Тейлора, или ансцентного ФК – с использованием так называемых сигма-точек. Такие фильтры, аналогично ФК, рассчитывают только два параметра: математические ожидания и матрицы ковариаций, соответствующие прогнозной и апостериорной ф.п.р.в., по существу, аппроксимируя ее гауссовской плотностью [14, 16, 25]. Иногда такие алгоритмы называют алгоритмами калмановского типа [26]. Отметим, что использование обобщённого ФК или идеологии комплементарной схемы при решении нелинейных задач может приводить к идентичным алгоритмам оценивания. Так, например, модель погрешностей (7) в общем соответствует второму члену разложения функции (6) в ряд Тейлора, а разностные измерения (8) – невязке обобщенного ФК. Интегралы (9)–(11) также могут быть вычислены с использованием численных методов: кубатурных формул, метода Монте-Карло [14, 16, 25], породивших соответственно кубатурные фильтры и фильтры частиц.

Адаптивные алгоритмы оценивания. В общем случае, как и в рассмотренных выше примерах, требуется формализация моделей погрешностей датчиков [3, 4, 21–23], для чего в настоящее время обычно применяются методы, основанные на получении выборочных характеристик в виде оценок спектральной плотности или корреляционной функции [27, 28]. Широкое применение получил также метод вариации Аллана [29, 30], который может быть использован и для некоторых нестационарных процессов. В работах [23, 31, 32] с использованием байесовского подхода сформулирована постановка задачи, при которой такие модели могут быть полу-

чены непосредственно в ходе решения задачи оценивания искомого вектора состояния, звучит она следующим образом.

Пусть задан набор гипотез h_k, $k=\overline{1...K}$ о возможных моделях погрешностей в виде формирующих фильтров (ФФ):

$$\begin{aligned} x_i^k &= \Phi_i^k(\theta^k)x_{i-1}^k + \Gamma_i^k(\theta^k)w_i^k, \\ \theta_i^k &= \theta_{i-1}^k = \theta^k, \end{aligned} \tag{12}$$

$$y_i = H_i^k(\theta^k)x_i^k + \Psi_i^k(\theta^k)v_i^k, \tag{13}$$

где $i=1,2...$ – номер измерения; x_i^k – вектор состояния, описывающий составляющие погрешности датчика для гипотезы h_k; $\Phi_i^k(\theta^k)$, $\Gamma_i^k(\theta^k)$, $H_i^k(\theta^k)$, $\Psi_i^k(\theta^k)$ – известные матрицы ФФ, характеризующие структуру модели погрешности для этой гипотезы; θ^k – случайный вектор неизвестных параметров модели с заданной начальной функцией плотности распределения вероятностей (ф.п.р.в.) $f_{\theta^k}(\theta^k)$; w_i^k и v_i^k – p^k и m^k-мерные белошумные центрированные гауссовские последовательности с известными ковариационными матрицами.

Необходимо, располагая вектором измерений Y_i и набором гипотез о моделях погрешностей (12), (13), определить номер гипотезы, максимизирующей апостериорную вероятность $\Pr(\mathbf{H}=h_k / Y_i)$, и найти соответствующие этому номеру оптимальные в смысле минимума критерия (5) оценки $\hat{\theta}^k$, $\hat{x}_i^k$. Такая постановка задачи в части оценивания структуры модели погрешностей имеет много общего с задачами идентификации гипотез, решаемых при определении отказов систем, навигации по картам дорог, разрешения фазовой неоднозначности в сигналах спутниковых систем [26, 33–35], а в части оценивания параметров – с постановками задач нелинейного байесовского оценивания, широко описанными в литературе [14, 16, 26]. Совместное решение задач идентификации и оценивания рассматривается в работе [36] для общего случая динамических систем, близкой к предложенной можно считать постановку задачи, описанную в [13], где она используется для получения алгоритма определения маневра цели.

Особенность модели (12), (13) заключается в том, что при фиксированных значениях гипотезы и вектора параметров она соответствует задаче линейной гауссовской фильтрации. При этих условиях искомые функции являются гауссовскими, а выражения для их моментов могут быть получены в замкнутой форме. Этот факт делает возможным решение рассматриваемой задачи с использованием метода разделения [36–38], также называемого методом аналитического интегрирования по части переменных (англ. Rao-Bleckwellization procedure) [14, 17]. Идея метода заключается в численном интегрировании по вектору неизвестных параметров и аналитическом – по вектору состояния. Сокращение размерности интегралов, подлежащих численному интегрированию, уменьшает вычислительную сложность получаемого алгоритма.

Алгоритм решения задачи (10), (11) представлен в работах [23, 31]. Он включает этап инициализации и рекуррентную процедуру расчета вероятностей моделей и оценок их параметров в каждый момент времени. На этапе инициализации выбирается набор из K априорных гипотез и задаются априорные ф.п.р.в. вектора θ^k для каждой из них в виде аппроксимации по методу сеток или Монте-Карло.

Для каждой гипотезы и каждого значения θ^{kj} формируется ФК, таким образом составляя банк фильтров и реализуя метод частичного аналитического интегрирования по вектору x_i^k. Далее на каждом шаге рекуррентной процедуры, в банке фильтров вычисляются частные прогнозы и оценки вектора состояния $\hat{x}_{i/i-1}^{kj}$, $\hat{x}_i^{kj}$ и соответствующие им матрицы ковариаций $P_{i/i-1}^{kj}$, P_i^{kj}. Полученные значения используются для рекуррентного расчёта апостериорной вероятности для каждой гипотезы и коэффициентов аппроксимации апостериорной ф.п.р.в. вектора θ^k. На основе последних рассчитываются оценки векторов θ^k и x_i^k и соответствующие матрицы ковариаций погрешностей оценивания.

Отметим, что алгоритм является адаптивным не только по отношению к параметрам, но и к структуре модели. Таким образом, решается совместная задача идентификации и адаптивного оценивания модели в целом. Алгоритм оценивания апробирован на реальных данных в задаче

оценивания аномалии силы тяжести [23, 39, 40]. Показано, что он обеспечивает точность, как минимум, не хуже традиционного стационарного алгоритма. Его несомненными плюсами являются строгий подход к задаче оценивания, более высокая точность в переходном режиме, и, что весьма важно, возможность получения адекватных показателей качества решения задачи оценивания.

Заключение. Приведены постановки задач комплексной обработки навигационной информации и показаны их особенности. Описаны принципы работы основных линейных и нелинейных байесовских алгоритмов оценивания в таких задачах. Отмечается, что одной из основных проблем при построении оптимальных алгоритмов остается неопределенность описания моделей объектов и навигационных датчиков. Обсуждены возможности применения адаптивных байесовских алгоритмов в задачах обработки навигационной информации с целью одновременной оценки модели и искомых параметров.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 18-08-01101.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анучин О.Н., Емельянцев Г.И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. 2-е изд. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 356 с.
2. **Белоглазов И.Н., Казарин С.Н., Косьянчук В.В.** Обработка информации в иконических системах навигации наведения и дистанционного зондирования местности. Москва: Физматлит, 2012. 368 с.
3. **Емельянцев Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. 235 с.
4. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 2. Введение в теорию фильтрации. 3-е изд. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 427 с.
5. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания. 3-е изд. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 509 с.
6. **Grewal M.S., Andrews A.P., Bartone C.G.** Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. 3rd ed. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2013. 608 c.
7. Aerospace Navigation Systems / ed. Nebylov A. V, Watson J. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2016. 392 c.
8. **Markley F.L., Crassidis J.L**. Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control. New York, NY: Springer Verlag, 2014. 486 c.
9. **Kalman R.E.** A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. 1960. Vol. 82, № 1. С. 34–45.
10. **Kalman R.E., Bucy R.S.** New results in linear filtering and prediction theory // Journal of Basic Engineering. 1961. Vol. 83, № 1. С. 95–108.
11. **Candy J. V.** Model-Based Signal Processing // Model-Based Signal Processing. New York: John Wiley&Sons, 2005.704 p.
12. **Simon D.** Kalman Filtering // Embedded System Programming. 2001. Vol. 14, № 6. С. 72–79.
13. **Bar-Shalom Y., LI X.R., Kirubarajan T.** Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 584 c.
14. **Sarkka S.** Bayesian Filtering and Smoothing. Cambridge University Press, 2013. 254 c.
15. **Chen Y., Jilkov V., Li X.R.** Multilane-road target tracking using radar and image sensors // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2015. Vol. 51, № 1. С. 65–80.
16. **Simon D.** Optimal State Estimation: Kalman H∞ and Nonlinear Approaches. New Jersey, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2006. 552 c.
17. **Doucet A., De Freitas N., Gordon N.** Sequential Monte Carlo Methods in Practice. NewYork: Springer-Verlag,2001.582c.
18. **Schmidt S.F.** The Kalman filter - Its recognition and development for aerospace applications // Journal of Guidance and Control. 1981. Vol. 4, № 1. С. 4–7.
19. **Степанов О.А.** Фильтр Калмана: история и современность (К 80-летию Рудольфа Калмана) // Гироскопия и навигация. 2010. № 2 (69) С. 107–121.
20. **Stepanov O.A.** Optimal and sub-optimal filtering in integrated navigation systems // Aerospace Navigation Systems / ed. Nebylov A., Watson J. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2016. С. 392.
21. **Блажнов Б.А., Емельянцев Г.И., Драницына Е.В., Степанов А.П.** О калибровке измерительного модуля прецизионной БИНС и построении связанного с ним ортогонального трехгранника // Гироскопия и навигация. 2015. № 1 (92). С. 36–48.
22. **Носов А.С., Моторин А.В.** Реализация алгоритмов ориентации и навигации на четырехколесной мобильной платформе // Материалы XVII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. С. 212–220.
23. **Моторин А.В.** Идентификация моделей погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции методами нелинейной фильтрации дисс. уч. ст. Канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2017. 132 с.
24. **Дмитриев С.П., Степанов О.А.** Неинвариантные алгоритмы обработки информации инерциальных навигационных систем // Гироскопия и навигация. 2000. № 1 (28). С. 24–39.

25. **Chen Z.H.E.** Bayesian Filtering: From Kalman Filters to Particle Filters, and Beyond // Statistics. 2003. Vol. 182, № 1. С. 1–69.
26. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации при решении задач обработки навигационной информации. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор," 2003. 370 с.
27. **Bendat J., Piersol A.** Random Data: Analysis and Measurement Procedures. 4th ed. New Jersey, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2010. 640 с.
28. **Marple S.L.J.** Digital spectral analysis with applications. New Jersey, NJ: Prentice-Hall, 1987. 492 с.
29. **Allan D.W.** Statistics of Atomic Frequency Standards // Proceedings of the IEEE. 1966. Vol. 54, № 2. С. 221–230.
30. **El-Sheimy N., Hou H., Niu X.** Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2008. Vol. 57, № 1. С. 140–149.
31. **Stepanov O.A., Motorin A.V.** Problem-Oriented Approach to Identification of Sensor Error Models and its Application to Navigation Data Processing // IFAC-PapersOnLine. 2017. Vol. 50, № 1. С. 2830–2835.
32. **Моторин А.В., Степанов О.А.** Проблемно-ориентированный подход к решению задачи идентификации моделей погрешностей навигационных датчиков и оцениваемых сигналов // Материалы пленарных заседаний 9-й Российской мультиконференции по проблемам управления. СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 49–60.
33. **Blom H.A.P., Bar-Shalom Y.** Interacting multiple model algorithm for systems with Markovian switching coefficients. // IEEE Transactions on Automatic Control. 1988. Vol. 33, № 8. С. 780–783.
34. **Дмитриев С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В.** Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. Санкт-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор," 2003. 207 с.
35. **Ярлыков М.С., Аникин, А.Л., Башаев, А.В.** Марковская теория оценивания в радиотехнике. Москва: Радиотехника, 2004.
36. **Белоглазов И.Н., Казарин С.Н.** Совместное оптимальное оценивание, идентификация и проверка гипотез в дискретных динамических системах // Известия Академии наук. Теория и системы управления. 1998. № 4. С. 26–43.
37. **Haykin S.** Kalman Filtering and Neural Networks // Kalman Filtering and Neural Networks / ed. Haykin S. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 284 с.
38. **Lainiotis D.G.** Partitioning: A unifying framework for adaptive systems, II: Control // Proceedings of the IEEE. 1976. Vol. 64, № 8. С. 1182–1198.
39. **Моторин А.В., Степанов О.А., Кошаев Д.А.** Идентификация параметров модели аномалии в задаче авиационной гравиметрии методами нелинейной фильтрации // Гироскопия и навигация. 2015. № 3 (90). С. 95–101.
40. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / под ред. Пешехонова В.Г., Степанова О.А. СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.

A.V. Motorin (ITMO University, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, Russia). **Integrated processing of navigation measurements with uncertain models of valid signals and errors**

Abstract. Specific problem statements for integrated processing of navigation measurements are studied. Classical stochastic statement of such a problem and its solution based on Bayesian approach using Kalman filter and nonlinear filters are described. The problem of creating models of valid signals and errors, as well as its solution methods are discussed. It is shown that this method can be useful in solving an adaptive estimation problem with uncertain models of valid signals and errors.

▪ ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ▪

УДК 517.977.5

А.С. ТОМИЛОВА
(Санкт-Петербургский государственный университет)

ОПТИМИЗАЦИЯ РОБАСТНЫХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА КАЧЕСТВО ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Рассматривается задача синтеза многоцелевого закона управления движением судна по курсу, обеспечивающего наилучшие робастные свойства замкнутой системы при ограничениях на качество переходных процессов. Выполняется формализованная постановка оптимизационной задачи о расширении частотных границ робастной устойчивости. Предлагается метод ее решения, основанный на модальной параметрической оптимизации.

Введение. Вопросам анализа и синтеза робастных законов управления уделяется существенное внимание в современной теории управления и ее приложениях [1, 2]. Это связано с тем, что математические модели всегда лишь приближенно представляют динамику объекта. Следовательно, возникает вопрос о сохранении определенных свойств системы управления, в частности устойчивости положения равновесия и качества функционирования, при допустимых отклонениях параметров математической модели от их номинальных значений.

Существуют два основных класса неопределенностей математической модели: параметрические и неструктурированные. В первом случае для анализа и синтеза систем управления используются подходы, основанные на использовании линейных матричных неравенств, теоремы Харитонова об устойчивости семейства полиномов [3] и др. Во втором случае могут применяться частотные методы анализа и синтеза [4].

Целью работы является синтез динамического регулятора, который обеспечивает наилучшие робастные свойства системы управления при заданных ограничениях на качество переходных процессов. Рассматривается математическая модель движения морского судна по курсу. Предлагается метод синтеза регулятора, который обеспечивает максимальную ширину частотного «коридора» робастной устойчивости.

Постановка задачи. Рассмотрим линейную математическую модель движение морского судна по курсу [5, 6] следующего вида:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\delta + \mathbf{H}d(t), \\ y &= \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad \dot{\delta} = u, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\mathbf{x} = (V_z, \ w_y, \ \varphi)^T$ – вектор состояния; V_z – боковая скорость судна; w_y – угловая скорость по курсу; φ – угол курса; δ – угол перекладки вертикального руля; $y = \varphi$ – измеряемая переменная; $d(t)$ – внешнее возмущение. Будем считать, что некоторые из коэффициентов матриц **A** и **B** математической модели (1) известны неточно и могут принимать любое значение внутри определенных диапазонов.

Целью управления является поворот судна по курсу на заданный угол φ^*. При этом вводится совокупность требований к качеству функционирования замкнутой системы в режиме собственного движения и при наличии возмущения [6], а также ограничения на величину управления u и угол перекладки вертикального руля δ.

Научный руководитель д.ф.-м.н., проф. Сотникова М.В.

Выполним синтез закона управления с использованием многоцелевого подхода [6, 7]. При этом динамический регулятор с многоцелевой структурой представим в виде:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{A}\mathbf{z} + \mathbf{B}\delta + \mathbf{G}(y - \mathbf{C}\mathbf{z}), \\ \dot{\mathbf{p}} &= \boldsymbol{\alpha}\mathbf{p} + \boldsymbol{\beta}(y - \mathbf{C}\mathbf{z}),\ \xi = \boldsymbol{\gamma}\mathbf{p} + \mu(y - \mathbf{C}\mathbf{z}), \\ u &= \mathbf{K}(\mathbf{z} - \mathbf{x}^*) + K_\delta\delta + \xi, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $\mathbf{z} \in E^3$ – вектор состояния асимптотического наблюдателя, $\mathbf{x}^* = (0,\ \ 0,\ \ \varphi^*)^T$ – командный сигнал. Настраиваемыми элементами закона управления (2) являются коэффициенты матрицы $\mathbf{G}$ наблюдателя, матриц $\boldsymbol{\alpha}$, $\boldsymbol{\beta}$, $\boldsymbol{\gamma}$ и μ динамического корректора, матриц $\mathbf{K}$ и K_δ базового закона управления $u = \mathbf{K}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) + K_\delta\delta$. Поиск этих настраиваемых элементов осуществляется с учетом требований к качеству функционирования системы в различных режимах.

Ставится задача оптимизации робастных свойств закона управления (2) движением морского судна (1) при ограничениях на качество переходного процесса, а именно на длительность перехода и величину перерегулирования. Оптимизация заключается в расширении границ робастной устойчивости системы при сохранении качества процессов в допустимых пределах.

Оптимизация робастных свойств системы управления. Математическая формализация ограничений на качество процессов достигается заданием специальной области C_Δ расположения корней характеристического полинома замкнутой системы (1), (2) в открытой левой полуплоскости комплексной плоскости. При этом область C_Δ вводится следующим образом:

$$C_\Delta = \{s = x \pm yj \in \mathbf{C}^1 :\ x \le -\alpha,\ 0 \le y \le (-x - \alpha)tg\beta\},$$

где s – комплексное число; $\alpha > 0$, $0 \le \beta < \pi/2$ – заданные вещественные числа, которые определяют форму области C_Δ и выбираются исходя из требований к качеству процессов.

Введем обозначения: $y = P_n(s)u$ – номинальная математическая модель объекта (1) и $u = K(s)y$ – представление регулятора (2) в комплексной области или в форме вход-выход. Отметим, что передаточная функция $K(s)$ зависит от выбора настраиваемых элементов многоцелевого закона управления (2). Объединим эти элементы в вектор параметров $\mathbf{h}$, тогда $K(s, \mathbf{h})$ – передаточная функция регулятора.

С целью оптимизации робастных свойств будем максимизировать ширину частотного «коридора» робастной устойчивости, которая, согласно [4], является функцией частоты и равна

$$W(\omega, \mathbf{h}) = \frac{1}{|T(i\omega, \mathbf{h})|},$$

где $T(s, \mathbf{h}) = K(s, \mathbf{h})(1 + P_n(s)K(s, \mathbf{h}))^{-1}P_n(s)$ – вспомогательная передаточная функция. Максимизация функции $W(\omega, \mathbf{h})$ по вектору $\mathbf{h}$ эквивалента минимизации $|T(i\omega, \mathbf{h})|$. В связи с этим будем рассматривать два функционала:

$$J_1(\mathbf{h}) = \min_{\omega \in [0, \pi]} |T(i\omega, \mathbf{h})|,\ J_2(\mathbf{h}) = \int_0^\pi |T(i\omega, \mathbf{h})|\, d\omega. \qquad (3)$$

Оба функционала (3) могут использоваться для оптимизации робастных свойств регулятора (2). При этом первый из них определяет ширину самой узкой части «коридора», а второй – интегральную характеристику ширины «коридора» на всем диапазоне частот.

Поставим задачу модальной параметрической оптимизации следующего вида:

$$J_i = J_i(\mathbf{h}) \to \min_{\mathbf{h}\in\Omega_H}, \quad i = 1, 2, \tag{4}$$

где Ω_H – множество допустимых параметров $\mathbf{h}$, такое, что все корни характеристического полинома замкнутой системы (1), (2) лежат в заданной области C_Δ комплексной плоскости. Разработан эффективный алгоритм решения задач (4), который основан на их сведении к соответствующим задачам безусловного экстремума при помощи параметризации области C_Δ [4].

Заключение. В работе рассмотрена задача оптимизации робастных свойств многоцелевого закона управления движением морского судна при ограничениях на качество переходного процесса. Предложен подход к ее решению, состоящий в постановке соответствующей задачи модальной параметрической оптимизации, и ее сведение к поиску безусловного экстремума.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сотникова М.В.** Синтез робастных алгоритмов управления с прогнозирующими моделями // Системы управления и информационные технологии. 2012. Т. 50. № 4. С. 99–102.
2. **Сотникова М.В., Томилова А.С.** Алгоритмы анализа робастных свойств многоцелевых законов управления подвижными объектами // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2018. Т. 14. № 2. С. 374–381.
3. **Харитонов В.Л.** Асимптотическая устойчивость положения равновесия семейства систем дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения. 1978. № 11. С. 2086 –2088.
4. **Веремей Е.И.** Линейные системы с обратной связью. СПб.: Лань, 2013. 448 с.
5. **Веремей Е.И., Корчанов В.М., Коровкин М.В., Погожев С.В.** Компьютерное моделирование систем управления движением морских подвижных объектов. СПб.: НИИ Химии СПбГУ, 2002. 370 с.
6. **Веремей Е.И., Сотникова М.В.** Многоцелевая структура законов управления морскими подвижными объектами // XII Всероссийское совещание по проблемам управления. 2014. С. 3289–3300.
7. **Veremei E.I., Korchanov V.M.** Multiobjective stabilization of a certain class of dynamic systems // Automation and Remote Control. 1989. Т. 49. № 9. С. 1210.

A.S. Tomilova (Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg). **Robust properties optimization of the control system taking into account constraints on the quality of transient processes**

Abstract. In this paper the problem of multipurpose control law design for a ship that provides the best robust properties of a closed-loop system taking into account constraints on the quality of transient processes is considered. A formalized statement of the problem of optimizing robust properties is performed and a method for its solution based on modal parametric optimization is proposed.

УДК 681.51

В.И. ЦАРИК
(Санкт-Петербургский государственный университет)

УПРАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЯМИ НЕПОЛНОПРИВОДНОЙ СИСТЕМЫ «ШАР НА КАЧЕЛЯХ»

Рассмотрена задача построения и стабилизации колебательного движения системы «Шар на качелях». Использован метод виртуальных голономных связей. Выведены уравнения динамики системы, осуществлена их трансверсальная линеризация, построен алгоритм стабилизации движения. Полученные результаты подтверждены компьютерным моделированием.

Введение. Под неполноприводной системой [1] принято понимать управляемую механическую систему, число степеней свободы в которой превосходит количество управляющих воздействий. Такие системы отличаются преимущественно нелинейной динамикой и наличием физически нереализуемых траекторий. Примеры систем с данными свойствами встречаются во многих областях промышленности и робототехники. Среди них, например, шагающие роботы, станки с программным управлением, летательные аппараты и водные суда. Таким образом, изучение неполноприводных систем является весьма актуальной и сложной задачей.

В докладе рассмотрена неполноприводная система «Шар на качелях». На вращающемся валу электрического двигателя в горизонтальном положении закреплён отрезок прямой («качели»), на котором лежит шар, перемещающийся вправо или влево под действием гравитации (рис. 1). Задача состоит в реализации устойчивых периодических перекатываний шара из стороны в сторону посредством управления углом наклона качелей. Ранее задача была рассмотрена в работе [2]. Однако ее решение было получено для существенно упрощенных уравнений движения системы. В этой работе решение впервые получено с использованием полных, несокращенных уравнений динамики системы. При решении задачи используется метод виртуальных голономных связей [3].

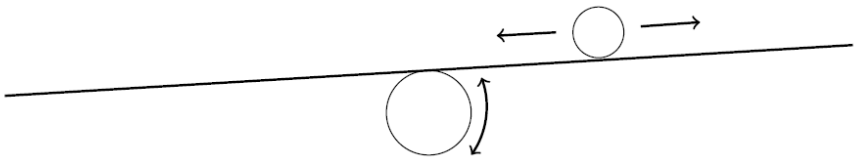


Рис.1. Установка «Шар на качелях»

Основные результаты. В ходе решения задачи были выведены уравнения динамики установки, а именно уравнения Лагранжа второго рода в следующем виде:

$$M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q}) + G(q) = (u,0)^T,$$

где $q=(q_1,q_2)^T$ – вектор обобщенных координат системы, $q_1=\theta$ – угол наклона качелей относительно горизонта, $q_2=\varphi$ – угловое смещение шарика относительно центра вращения качелей, u – управляющее воздействие, прикладываемое к валу двигателя. Указанные выше матрицы и векторы имеют следующий вид: $M(q)=\begin{pmatrix} J_f+J_b+m\delta^2 & -J_b\mu-m\delta^2 \\ -J_b\mu-m\delta^2 & J_b\mu^2+m(\delta^2+\delta'^2) \end{pmatrix}$,

$C(q,\dot{q})=\begin{pmatrix} 2\dot{\theta}\dot{\varphi}m\delta\delta'-\dot{\varphi}^2(J_b\mu'+2m\delta\delta') \\ \dot{\varphi}^2(J_b\mu\mu'+m(\delta\delta'+\delta'\delta''))-\dot{\theta}^2m\delta\delta' \end{pmatrix}$, $G(q)=mg\begin{pmatrix} \delta\sin(\varphi-\theta) \\ \delta'\cos(\varphi-\theta)-\delta\sin(\varphi-\theta) \end{pmatrix}$. Здесь J_f– момент инерции качелей, J_b – момент инерции шарика, m – масса шарика, R – радиус шари-

Научный руководитель к.ф.-м.н., доцент Гусев С.В.

ка, $\delta(\varphi) = R/\cos\varphi$ – форма качелей в полярных координатах (ее аргумент в формулах опущен для экономии места), δ', δ'' – первая и вторая производные $\delta(\varphi)$ по φ, $\mu(\varphi) = \sqrt{\delta^2 + \delta'^2}/R$ – вспомогательная функция, g – ускорение свободного падения.

Для решения задачи применяется метод виртуальных голономных связей, предложенный и обоснованный в [3]. В качестве виртуальной связи была рассмотрена пропорциональная зависимость между обобщёнными координатами:

$$\theta = \Theta(\varphi) = k\varphi ,$$

где k – некое положительное число. Подставляя выражение для связи в не содержащее управления уравнение Лагранжа, получим так называемое $\alpha\beta\gamma$-уравнение: $\alpha(\varphi)\ddot{\varphi} + \beta(\varphi)\dot{\varphi}^2 + \gamma(\varphi) = 0$, где $\alpha(\varphi) = (-J_b\mu - m\delta^2)\Theta' + 8m(\delta^2 + \delta'^2)/3$, $\beta(\varphi) = (-J_b\mu - m\delta^2)\Theta'' - m\delta\delta'\Theta'^2 + 8m(\delta\delta' + \delta'\delta'')/3$, $\gamma(\varphi) = mg(\delta'\cos(\varphi - \Theta) - \delta\sin(\varphi - \Theta))$. Это уравнение описывает динамику переменной φ. Используя фазовый портрет данного уравнения, можно выбрать некоторое его решение в качестве желаемого движения шарика $\varphi_d(t)$. Желаемое движение качелей $\theta_d(t)$ находится из выражения для связи. Далее, следуя методу, предложенному в [3], вводится новая координата $y=\theta - k\varphi$, описывающая отклонение исходных переменных от виртуальной связи, а также новое управление $v = \ddot{y}$, которое связано со старым соотношением $v = P(\varphi, y)u - R(\varphi, \dot{\varphi}, y, \dot{y})$ (выражения для функций P и R приведены в [3]). Затем уравнения динамики переписываются в координатах y и φ с управлением v. В новых координатах желаемое движение задается соотношениями $y = \dot{y} = 0$, $\varphi = \varphi_d(t)$, $\dot{\varphi} = \dot{\varphi}_d(t)$, $\ddot{\varphi} = \ddot{\varphi}_d(t)$. Как показано в [3], вектор $\bar{x} = (I, \dot{y}, y)^T$, где I – интеграл $\alpha\beta\gamma$ -уравнения, определяет набор трансверсальных координат, т.е. координат на гиперплоскостях, ортогональных траектории системы в фазовом пространстве. Проведя линеаризацию уравнений относительно координат $\bar{x}$ в окрестности желаемого движения, получим линейную систему с переменными коэффициентами: $\dot{\bar{x}} = A(t)\bar{x} + B(t)v$. Для неё на основе метода, предложенного в [4], строится линейный стабилизирующий регулятор вида $v = K(t)\bar{x}$. Окончательно стабилизирующее управление для исходной системы принимает вид: $u = P^{-1}(\varphi, y)(K(t)\bar{x} + R(\varphi, \dot{\varphi}, y, \dot{y}))$.

Заключение. Результаты компьютерного моделирования подтверждают, что найденное управление стабилизирует колебательное движение системы. На рис. 2 приведены графики траекторий системы при начальном значении φ, равном –0.3 радиан. Управление положением шара на качелях является примером управления неполноприводной системой с неудерживающими связями. Полученные результаты демонстрируют возможность решения подобных задач с использованием метода виртуальных голономных связей.

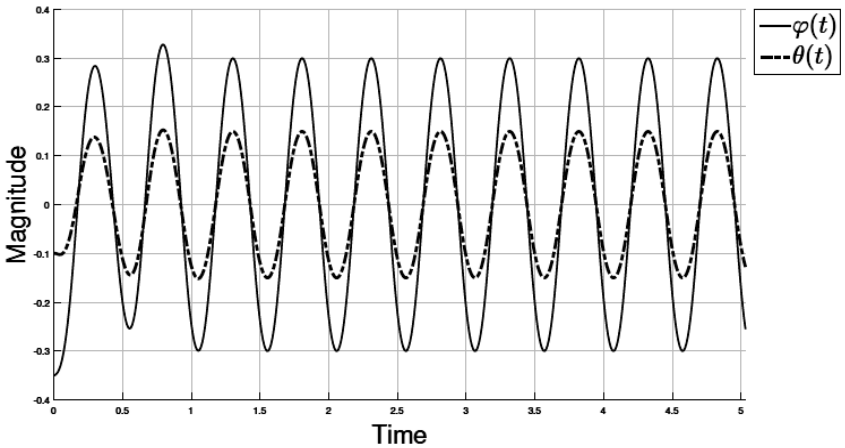


Рис. 2. Траектории системы после стабилизации

ЛИТЕРАТУРА

1. **Spong M.** Underactuated mechanical systems. Control Problems in Robotics and Automation. Vol. 230 of Lecture Notes in Control and Inf. Sci., London, UK: Springer–Verlag. 1998.
2. **Aracil J., Gomez-Estern F., Gordillo F.** Stabilization of autonomous oscillations and the Hopf bifurcation in the ball and beam. Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, 3924–3925, 2002.
3. **Shiriaev A.S., Perram J.W., de-Wit C. C.** Constructive tool for orbital stabilization of underactuated nonlinear systems: Virtual constraints approach. IEEE Transactions on Automatic Control, 50(8), 1164–1176, 2005.
4. **Gusev S.V., Freidovich L.B., Shiriaev A.S.** SDP-based approximation of stabilising solutions for periodic matrix Riccati differential equations. International Journal of Control, 89(7), 1396–1405, 2016.

V.I. Tsarik (SPbGU, Saint-Petersburg). **Controlling the oscillations of the underactuated «Ball and Beam» system**

Abstract. The problem of oscillatory motion construction and stabilization for the «ball and beam» system is considered. Virtual holonomic constraints approach is used. System's dynamics equations are derived, their transverse linearization is implemented, the stabilization algorithm is constructed. Obtained results are confirmed with computer simulation.

УДК 629.783

А.А. БОГЕР, С.Н. ТИМАКОВ
(РКК «Энергия», г. Королев)

ОБ УПРАВЛЕНИИ ГРУППИРОВКОЙ СПУТНИКОВ-ОСВЕТИТЕЛЕЙ НА СОЛНЕЧНО-СИНХРОННЫХ ОРБИТАХ

Работа посвящена управлению параметрами относительного движения космических аппаратов в группировке на солнечно-синхронной орбите. Каждый из аппаратов оснащен отражателем большой площади, который используется для переотражения солнечного света в заданный район планеты. Разработан алгоритм управления движением космических аппаратов, позволяющий удерживать спутники в группировке. Управление движением космических аппаратов осуществляется с помощью силы солнечного давления, действующей на отражатель.

Введение. Освещение приполярных районов из космоса предполагает использование группировки космических аппаратов, размещенных на солнечно-синхронной орбите. Каждый спутник оснащен отражателем большой площади, позволяющим формировать световое пятно в районе заданного города. Очевидно, что благодаря этому зеркалу на спутник действует сила солнечного давления значительной величины. Следовательно, в режиме освещения происходит левитация орбиты аппарата в сторону от Солнца. Также гравитационные влияния Луны и Солнца и остаточная часть атмосферы вносят свои возмущения в траекторию спутника-осветителя, которые необходимо парировать. Кроме этого, при отделении аппаратов от ракетоносителя вблизи опорной точки требуется управление, позволяющее вывести космические аппараты на заданные финитные траектории относительно опорной точки предпочтительно без затрат топлива. Существующие решения предлагают осуществлять управление с использованием тяговых двигателей. Это ведет к тратам дорогостоящего топлива.

В работе предлагается осуществлять удержание аппаратов в группировке с использованием силы солнечного давления. Управляя положением зеркала, можно изменять направление и модуль этой силы, и, тем самым, управлять траекторией аппарата. Для этой цели сформирована модель движения спутника в гравитационном поле земли и разработан алгоритм управления ориентацией зеркала.

Модель движения космического аппарата построена с использованием параметров спутника-осветителя, представленным в [1, 2], относительное движение группировки космических аппаратов подробно описано в [3].

Кроме того, настоящая работа основана на данных, полученных ранее в работах [4–7].

Алгоритм управления. Цель работы – построить алгоритм управления параметрами относительного движения космического аппарата.

Спутник-осветитель оснащен зеркалом-парусом с радиусом R=50 м. Величина силы солнечного давления, действующая на аппарат, рассчитывается по формуле [8]

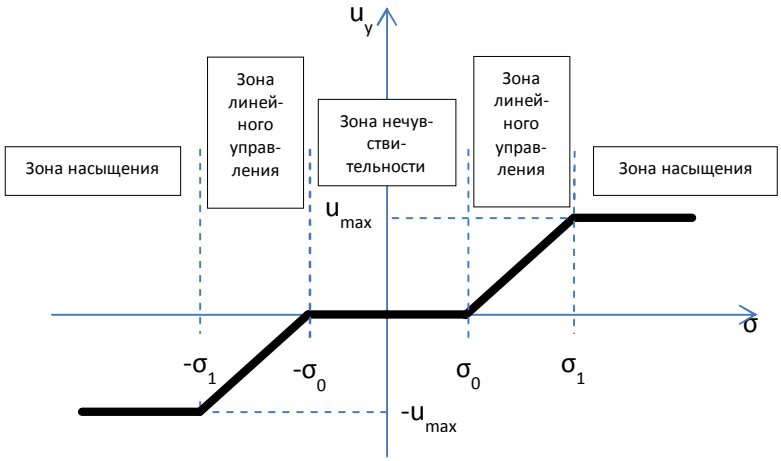
$$\mathbf{F_s} = -\frac{2CA}{cm}\cdot\mathbf{n}\cdot\cos\theta\cdot|\cos\theta|, \qquad (1)$$

где C=1370 $Вт/м^2$ – солнечная постоянная; $A=\pi R^2=7{,}85\cdot10^3 м^2$– площадь зеркала; $c=3\cdot10^8 м/с$ – скорость света в вакууме; $m=500$ $кг$ – масса аппарата вместе с зеркалом; $\mathbf{n}$ – единичный вектор нормали зеркала; θ – угол между направлением на Солнце $\boldsymbol{s}$ и вектором нормали зеркала $\mathbf{n}$.

При математическом моделировании движения аппаратов учитывалось влияние силы светового давления в режиме целевого переотражения в заданный район поверхности Земли, а также эффект от полярного сжатия Земли, заставляющий орбиту прецессировать. Остальные возмущения моделировались как случайные.

Алгоритм управления строится с использованием обобщенного трехгранника Хилла с началом в заданной точке опорной солнечно-синхронной орбиты. Траектории аппаратов в группировке представляют собой концентрические эллипсы, размеры и центр которых предполагается поддерживать неизменными и близкими к заданным. Вводятся переменные, отвечающие за

геометрию эллипсов и положения их центров. Управление строится по линейно-релейному закону (см. рис.).



Линейно-релейный закон управления

Присутствуют три зоны управления: зона нечувствительности, зона линейного управления и зона насыщения, когда достигается максимум управляющей силы. Величина σ отражает численное значение ошибки несоответствия текущих параметров заданным, u_y – проекция вектора управления на ось *Oy*. Управление преимущественно осуществляется в тангенциальном направлении орбитального движения космического аппарата (вдоль оси *Oy*).

Заключение. Результаты моделирования показали, что силы солнечного давления, действующей на парус радиуса R=50 м, достаточно для парирования случайных возмущений и удержания космических аппаратов, входящих в группировку на относительных финитных траекториях вблизи заданной точки опорной орбиты.

Работа проводилась при поддержке грантов РФФИ №17-08-01635 и №18-08-01379

ЛИТЕРАТУРА

1. **Богданов К.А.** [и др.] Задачи управления движением космического аппарата с вращающимся солнечным парусом: монография /; под ред. дтн С.Н. Тимакова. Королев: РКК «Энергия», 2016. 116 с.
2. **Сумароков А.В., Тимаков С.Н, Богданов К.А.** О решении задачи наведения спутника осветителя на заданный район поверхности Земли и оценка освещенности // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана Сер. Приборостроение. 2017. №6. С. 115.
3. **Апазов Р.Ф., Сытин О.Г.** Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли. Москва «Наука»: Главная редакция физико-математической литературы. 1987. 440 с.
4. **Богер А.А.** Поиск оптимальной орбиты спутника-осветителя // XXI Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов. Королев, РКК «Энергия», 2017, с. 9–10
5. **Богер А.А.** Поиск оптимальной орбиты спутника для освещения заполярных городов// Тезисы докладов 60-ой научной конференции МФТИ. г. Долгопрудный. МФТИ. 2017
6. **Богер А.А., Тимаков С.Н.** Об освещенности заполярных районов России группировками спутников-осветителей во время полярной ночи суммарным отраженным солнечным светом // Труды ФГУП «НПЦАП» Системы и приборы управления. 2018. №2 С.11–13.
7. **Boger A.A., Timakov S.N.** About illumination of Russian Arctic regions by groups of satellite illuminators with total reflected sunlight during the polar night. //Book of abstracts of 1-st International Aerospace Symposium The Silk Road. 6-8 DEC 2018 MIPT / Dolgoprudny. 26 p.
8. **Егоров М.А., Егоров В.А., Сазонов В.В.** Управление элементами орбиты спутника-осветителя. Москва. Российская академия наук ордена Ленина. Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша. 1993. 19 с.

Boger A.A., Timakov S.N. (RSC Energia, Korolev city). **Controlling the Constellation of Satellite Illuminators on Sun-Synchronous Orbits**

Abstract. The work is devoted to control of relative motion parameters of spacecraft, which are in the group and are placed on a sun-synchronous orbit. The satellites are equipped with a large area reflector, which is used for reflection of sun light to the defined place of the Earth. We developed an algorithm which allows holding satellites in one group. Control is performed with the use of solar pressure force affecting the reflector.

УДК 681.5

Е.А. ВОРОБЬЕВА, А.В. БОГАЧЕВ
(ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева, Королев, МО)

РАЗРАБОТКА НОВОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕОРИЕНТАЦИЕЙ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АППАРАТА

Представлен новый алгоритм управления переориентацией космического аппарата, учитывающий ограничения по ориентации космического аппарата относительно направления на Солнце и обеспечивающий в заданный момент времени требуемые параметры углового движения для минимизации ошибок по углу и угловой скорости в конце разворота.

Введение. Рассматривается режим переориентации космического аппарата (КА) на высокоэллиптической орбите. На ориентацию КА накладывается ряд ограничений по освещенности Солнцем со стороны системы электропитания, системы обеспечения теплового режима и полезной нагрузки. В связи с этим, не всегда возможно использовать вариант разворота КА вокруг оси конечного поворота [1]. Как показал опыт, довольно часто возникают ситуации, когда при развороте КА вокруг оси конечного поворота ограничения, накладываемые на ориентацию КА относительно Солнца, нарушаются, что может привести к выходу из строя отдельных систем или КА в целом. Целью работы является обеспечение требуемых параметров функционирования КА путем разработки нового алгоритм управления переориентацией КА. Для этого необходимо, чтобы новый алгоритм управления переориентацией КА учитывал ограничения по ориентации КА относительно направления на Солнце и минимизировал ошибки по углу и угловой скорости в конце разворота.

Описание алгоритма переориентации КА. Под переориентацией в работе понимается перевод жестко связанной с КА системы координат (ССК) из известного начального в заданное конечное положение за фиксированное время t_k. Угловое положение ССК при развороте определяется относительно вспомогательной инерциальной системы координат (ИСК), ось $OY_{ИСК}$ которой направлена на Солнце, $OZ_{ИСК}$ лежит в плоскости OYZ ССК в конце разворота, а $OX_{ИСК}$ дополняет систему координат до правой. Функциональная блок-схема алгоритма представлена на рис. 1.

В трех каналах управления определяются три угла рассогласования между вспомогательной ИСК и ССК в начале и в конце разворота, а также производные по времени от этих углов. В работе для перехода от инерциального к связанному базису предлагается следующая последовательность вращений: первое – вокруг начального положения оси $OY_{ИСК}$ на угол θ, второе – вокруг промежуточного положения оси $OX_{ИСК}$ на угол φ и третье – вокруг конечного положения оси $OZ_{ИСК}$ на угол ψ.

Выбор вспомогательной инерциальной системы координат и последовательности вращений обусловлены тем, что в этом случае накладываемые на ориентацию КА ограничения по положению Солнца для углов вращения θ, φ и ψ имеют вид непрерывных интервалов: $\theta_{\min} \le \theta \le \theta_{\max}$, $\varphi_{\min} \le \varphi \le \varphi_{\max}$, $\psi_{\min} \le \psi \le \psi_{\max}$, где $\theta_{\min}$, $\varphi_{\min}$, $\psi_{\min}$, $\theta_{\max}$, $\varphi_{\max}$, $\psi_{\max}$ – минимально и максимально допустимые значения углов соответственно.

Если углы и производные по времени от углов в начале разворота удовлетворяют всем накладываемым на ориентацию КА ограничениям по положению Солнца, то траектория разворота в соответствующем канале управления разбивается по времени на два участка: на первом рассматривается равноускоренное, на втором – равнозамедленное движение [2]. При решении системы уравнений, описывающих угловое равноускоренное и равнозамедленное движение, определяется величина углового ускорения $\varepsilon_{расчет}$ и время переключения t_p, т.е. время смены знака углового ускорения, в соответствующем канале управления.

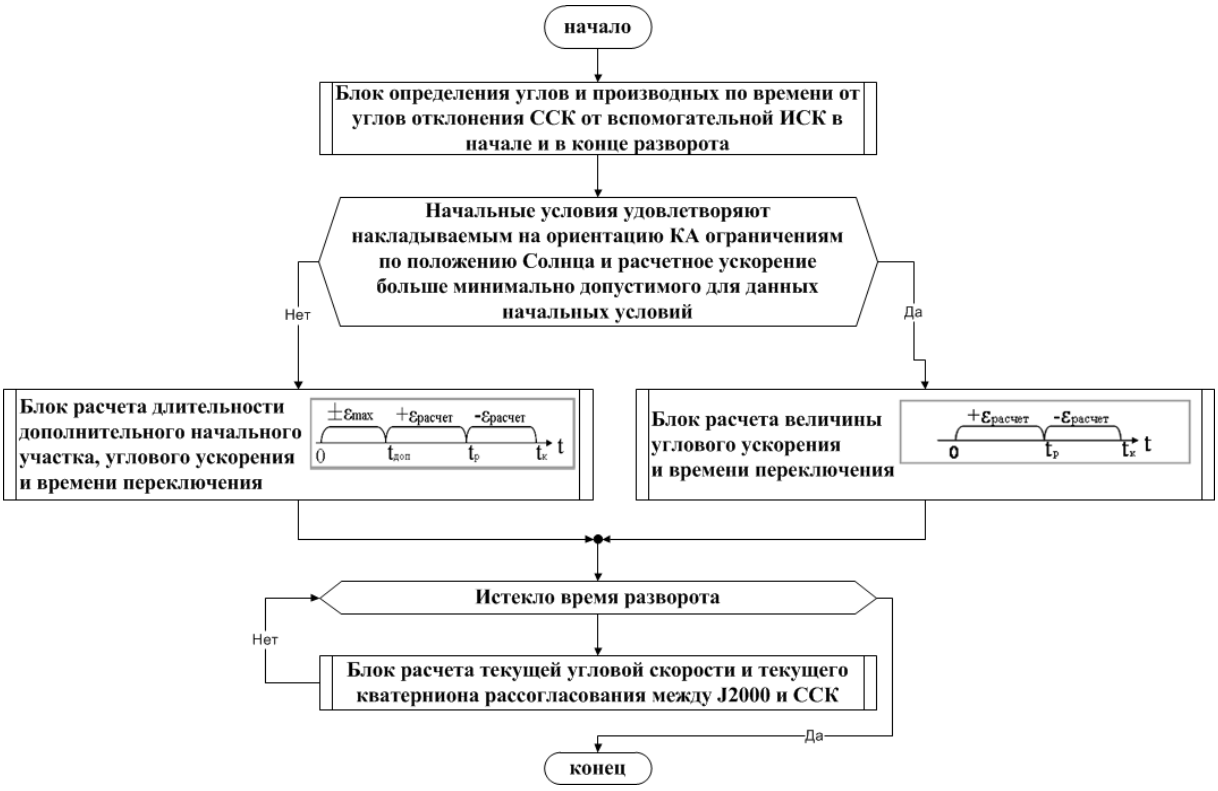


Рис.1. Блок-схема алгоритма

Если ограничения, накладываемые на ориентацию КА относительно Солнца, нарушаются в начале разворота или величина расчетного углового ускорения меньше минимально допустимого значения, то вводится дополнительный начальный участок с максимально допустимым угловым ускорением ε_{max}, а продолжительность этого участка $t_{\partial on}$ определяется из отношения начальной величины производной по времени от угла к величине максимально допустимого углового ускорения. После этого для новых начальных условий оставшаяся траектория разбивается по времени на два участка и рассчитывается время переключения и угловое ускорение. На рис. 2, на фазовой плоскости, где по оси абсцисс откладывается угол, по оси ординат – производная по времени от этого угла, представлен случай, когда расчетное угловое ускорение меньше минимально допустимого значения. Величина минимально допустимого значения углового ускорения для данных начальных условий в соответствующем канале управления ε_{min} – это угловое ускорение, соответствующее траектории разворота на фазовой плоскости, которой принадлежит начальная точка 1 (рис. 2), а также точка соответствующая минимальному (или максимальному значению) угла при нулевом значении производной по времени от этого угла.

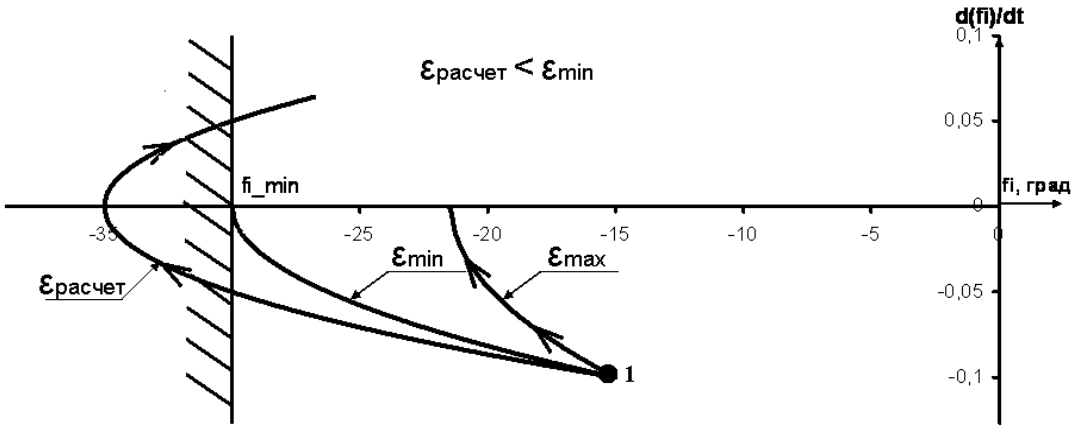


Рис. 2. Траектория разворота (начальный участок)

Если расчетное угловое ускорение меньше минимально допустимого, то траектория разворота КА попадет в заштрихованную зону, в которой нарушаются ограничения, накладываемые на ориентацию КА по положению Солнца (рис. 2).

В каждый момент времени разворота рассчитывается текущее значение угловой скорости КА и кватерниона рассогласования между текущей и требуемой ориентацией.

Заключение. Разработан новый алгоритм управления переориентацией КА, учитывающий ограничения по ориентации КА относительно направления на Солнце и минимизирующий ошибки по углу и угловой скорости в конце разворота.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бранец В.Н.** Лекции по теории бесплатформенных инерциальных навигационных систем управления. М.: МФТИ 2009. 304 с.
2. **Айзерман М.А.** Классическая механика. М.: Наука, 1974. 368 с.

E.A. Vorobyeva, A.V . Bogachev (S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev). **A new algorithm development for the spacecraft maneuver management to supply spacecraft required operating parameters**

Abstract. A new spacecraft maneuver management algorithm is considered taking into account the orientation limitations of the spacecraft relative to the Sun and minimizing transients at the end of the turn.

M. GAISER, G. SCHOLZ, G.F. TROMMER
(Karlsruhe Insitute of Technology, Institute of Systems Optimization, Karlsruhe)

VEHICLE DYNAMIC CONTROL ALLOCATION FOR PATH FOLLOWING

In this paper, we present a path following approach for an automotive vehicle. A spline-based guidance is used to keep the vehicle on track, followed by a virtual controller that acts as a high-level controller and supplies moments and forces to the dynamic control allocation. The proposed control allocates the moments and forces in an energy-efficient way while ensuring the vehicle dynamics are met.

Introduction. Whereas the subject of control allocation has been thoroughly investigated in the past decade this work presents an overall view on a system for path following. While the main objective in path following is to follow a predefined trajectory with the least deviation possible another problem arises in the area of automotive vehicles in terms of saturation of the tire forces which poses additional constraints to the problem of control allocation (CA). Tavasoli and Naraghi [1] compared the two main approaches for CA: *static control allocation* and *dynamic control allocation*. The main drawback for *static control allocation* is its computational burden as a numerical solution has to be calculated in each time step which makes it not applicable in cars. *Dynamic control allocation,* on the other hand, uses a dynamic update law to solve the optimization problem and hence does not have to compute a numerical solution of the latter. Hence the proposed path following system presented in this article comprises of two main parts: a spline-based guidance and the control system which itself consists of a high-level control and the dynamic control allocation. The navigation system which provides the system with the necessary data (e.g. position, attitude, acceleration, etc.) is assumed to be already given and is thus not further considered. In the first part of this paper, the used Guidance system is presented followed by the proposed control method and finally a conclusion is given.

Guidance system. Input to the guidance is the desired trajectory that is in this work chosen to be represented as cubic splines. They are used to describe a series of waypoints as a smooth trajectory which is twice differentiable. The output of the system is the desired heading angle of the vehicle which would make it follow the path. In the first step the system projects the vehicle's position onto the spline by looking for the shortest distance between the car and the trajectory. This is performed with the Newton-Raphson method. Once the projection point has been computed a dynamic look-ahead distance approach is used to calculate the desired course angle of the car. The intention to use a dynamic look-ahead distance (Δ_{LD}) derives from the attempt to imitate a human driver who is trying to anticipate the most comfortable steering behavior with respect to the upcoming road. The look-ahead distance can be expressed using the cross-track error e_y as input and the maximal distance Δ_{Max}, the minimal distance Δ_{Min} and multiplier K which controls how fast Δ_{LD} converges towards Δ_{Min} as parameters that have to be tuned by the operator [2]:

$$\Delta_{LD} = (\Delta_{Max} - \Delta_{Min}) e^{-Ke_y^2} + \Delta_{Min} .$$

Thus, the guidance law aims to minimize e_y which corresponds to the lateral deviation between vehicle and trajectory. By doing this the vehicle gets pulled towards the trajectory and follows the desired path.

Proposed control method. Assuming that the guidance yields values for the vehicle's heading that lead the car towards the desired trajectory, the objective of the consecutive control method is to find the most energy-efficient way in usage of the vehicle's actuator (e.g. steering wheel angle). In order to control the vehicle's heading angle to the desired course angle in the most efficient way, a dynamic control allocation is used. The latter itself consists of a virtual controller and the control allocation. Whereas the virtual controller is used to compute the virtual forces that would transform the vehicle's position and attitude into the desired respective guidance values, the control allocation distributes the virtual control forces to the vehicle's actuators (gas and brake pedal, steering wheel angle).

For example the following equation illustrates the control law which maps inputs (desired acceleration a_d, error in velocity $\tilde{v}$ and error in position $\tilde{r}$) to virtual forces:

$$F_{Virtual} = C_n^b\left[m\left(a_d + \left(K_1 + K_2\right)\tilde{v} + \left(I_{2\times 2} + K_1K_2\right)\tilde{r}\right) + F_W\right],$$

where K_1, K_2 are matrices that have to be positive definite in order for the system to be stable, m is the vehicle's mass, F_W is the air resistance and C_n^b is a rotation matrix turning the resulting forces from navigation to body frame.

As there are multiple ways to reach the proposed virtual control forces an objective function is built which tries to minimize the usage of the car's actuators and uses barrier functions to limit the possible solutions of the optimization problem. Instead of solving the optimization problem traditionally, a dynamic control allocation approach is proposed. The optimization problem is transformed into a control problem which drives the error between the actual forces acting on the vehicle and the proposed virtual control forces to zero. In addition to the error minimization a low-energy solution is pursued. The update law for dynamic control allocation looks like this [3]:

$$\begin{bmatrix}\dot{\vec{u}}\\ \dot{\vec{\lambda}}\end{bmatrix} = -\Gamma H\begin{bmatrix}\dfrac{\partial L}{\partial \vec{u}}\\ \dfrac{\partial L}{\partial \vec{\lambda}}\end{bmatrix} + H^{-1}\begin{bmatrix}\dfrac{\partial^2 L}{\partial \vec{\tau}_d \partial \vec{u}}\\ \dfrac{\partial^2 L}{\partial \vec{\tau}_d \partial \vec{\lambda}}\end{bmatrix}\dot{\vec{\tau}}_d,$$

where L is the Lagrange function, $\vec{\lambda}$ is a vector of Lagrange multipliers, $\vec{\tau}_d$ is a vector containing the target forces, $\vec{u}$ is a vector with the actuator values, H is the Hessian of the system dynamics and Γ is a scaling matrix.

Simulation results. To verify the proper functionality of the system the controller and the guidance have been integrated into the CarMaker environment and simulated. 100 simulations with different sensor noise have been performed in order to test the system's robustness to cope with different situations. A manually designed trajectory was used that consist of 200 m straight line, 270 deg curve with R=50 m, 100 m straight line, 90 deg left curve with R=25 m, 50 m straight line, another 90 deg left curve with R=25 m and a 125 m straight finish line.

The simulation results have shown that the proposed dynamic control allocation let the vehicle follow the given trajectories very tightly and independently of varying vehicle parameters while optimizing the usage of its actuators. For the most time the error in position is in decimeters except for the last two tighter curves where the error rises up to 2m for the first curve and interestingly to 1m in the second one. One of the reasons for this behavior can be found in the use of a constant velocity that could cause a larger deviation in tighter curves. With no doubt, the system would benefit from using an adaptive speed control that would be controlling the velocity with respect to the curvature of the track.

Conclusion. In the present work, a system for path following was developed, including a guidance system based on cubic splines and a control system using a dynamic control allocation approach for allocating the total body moments/forces to the tire forces. The system was implemented in C++ and integrated into a high-fidelity simulation environment IPG CarMaker to perform respective tests. Further improvements can be done for the guidance which currently only provides a heading angle but no velocity that matches the actual track. Also tuning of all systems parameters in an optimal manner should be further investigated since the interrelationship between them seems to be complicated.

REFERENCES

1. **Tavalosi A., Naraghi M.** Comparison of Static and Dynamic Control Allocation Techniques for Integrated Vehicle Control. *IFAC Proceedings Volumes*. 2011. Vol. 44. Issue 1. P. 7180 - 7186.
2. **Breivik, M.** Principles of Guidance-Based Path Following in 2D and 3D. *Proc. 44th IEEE Transactions on Decision and Control*. 2005. P. 627 – 634.
3. **Scholz, G.** System design zur Regelung und Navigation mobiler Plattformen. Dissertation. Institute of systems optimization, Karlsruher Institute of Technology, 2018.

УДК 681.51

А.Р. ДАЛЬ
(Норвежский университет естественных и технических наук, NTNU, Тронхейм)

О.И. БОРИСОВ, Ф.Б. КАРАШАЕВА
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

РОБАСТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ПО ВЫХОДУ В ЗАДАЧЕ УДЕРЖАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ НАДВОДНОГО СУДНА

Рассмотрена задача удержания положения надводного судна, характеризующегося параметрической неопределенностью и многомерной структурой с перекрестными связями, с помощью робастного регулятора по выходу. Построение системы удержания положения основано на методе последовательного компенсатора. Особое внимание уделено проведению экспериментальных исследований в Центре автономных морских операций и систем (AMOS) Норвежского университета технических и естественных наук (NTNU) в г. Тронхейм, Норвегия.

Введение. Система динамического позиционирования – это взаимосвязанный программно-аппаратный комплекс, предназначенный для автоматического управления движением надводного судна с целью удержания его заданного положения и курса. Основными компонентами системы динамического позиционирования являются: энергосистема, собственно система управления динамическим позиционированием и система судовых движителей [1]. Поведение надводного судна в общем случае описывается нелинейной многомерной моделью, параметры которой могут быть неизвестны, а переменные состояния неизмеримы напрямую. Кроме того, с учетом влияния внешних возмущающих воздействий (таких как ветер, течение, килевая и бортовая качка, контакт со льдом), процесс управления становится нетривиальной задачей. В связи с вышеперечисленным, ставится задача обеспечения робастного удержания положения надводного судна с заданной конфигурацией исполнительных приводов в автоматическом режиме с учетом неопределенностей объекта и его многомерной структуры с перекрестными связями. Для демонстрации работоспособности системы в работе приводятся результаты экспериментальной апробации.

Алгоритмы робастного управления в задаче удержания положения надводного судна.
Основной задачей является построение закона управления, обеспечивающего в замкнутой системе асимптотическую устойчивость в условиях параметрической неопределённости и неизмеримости производных выходных сигналов. Доступным для измерений являются только выходные (регулируемые) переменные – координаты судна, однозначно определяющие его в плоскости (две линейные и одна угловая).

Алгоритмы робастного управления в своей структуре содержат фиксированные (динамически ненастраиваемые) коэффициенты, которые тем не менее обеспечивают свойство робастности в замкнутой системе по отношению к неопределенностям математической модели объекта. Математически формализованной целью управления является обеспечение асимптотической сходимости координат надводного судна, однозначно определяющих его положение и ориентацию в плоскости, к нулю с обеспечением свойства робастности в замкнутой системе.

Синтезируемая система управления движением надводного судна основана на методе последовательного компенсатора, который, в свою очередь, базируется на принципе сильной обратной связи [2]. Такой подход положительно себя зарекомендовал в ряде робототехнических приложениях в силу простоты инженерной реализации и эффективности использования в условиях параметрической неопределенности объектов и недоступности измерения производных выходных переменных [3, 4]. В [3] рассматривалась задача управления двухзвенным роботом-манипулятором. Авторами предложен алгоритм независимого управления звеньями манипуля-

Научный руководитель д.т.н., проф. Пыркин А.А.

тора на основе метода последовательного компенсатора. В работе [4] приведен синтез робастной системы управления движением квадрокоптера с использованием принципа декомпозиции.

Особое внимание в докладе уделено проведению экспериментальных исследований метода в задаче удержания положения надводного судна в Центре автономных морских операций и систем (AMOS), Норвежского университета технических и естественных наук (NTNU) в г. Тронхейм, Норвегия. Эксперимент был поставлен на модели судна с 6 азимутальными подруливающими устройствами (рис. 1). Проведенный эксперимент показывал, что синтезированный закон управления на базе последовательного компенсатора обеспечивает эффективное позиционирование надводного судна в заданной точке (рис. 2).

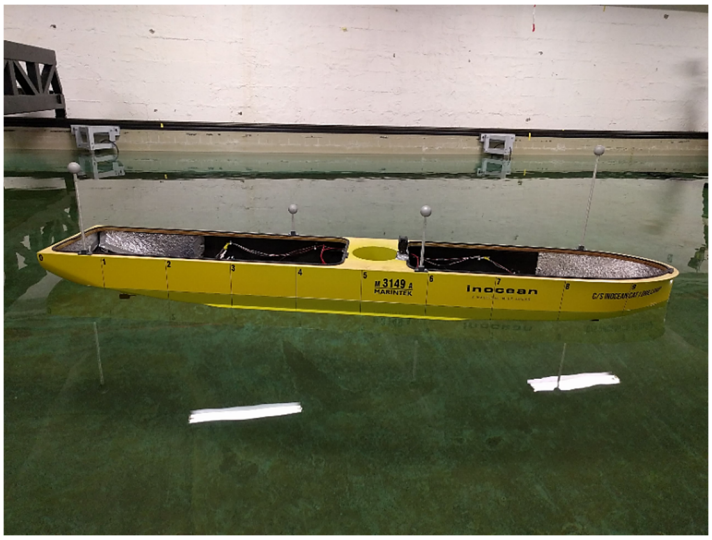


Рис. 1. Модель судна

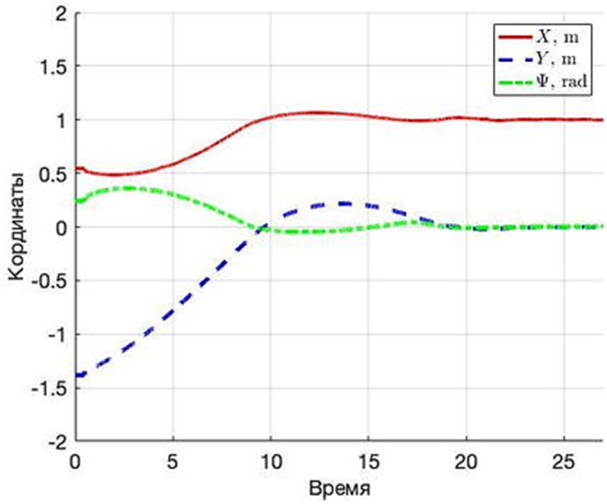


Рис. 2. Результаты эксперимента (X, Y – линейные координаты, Ψ – курсовой угол)

Заключение. Разработана и экспериментально апробирована система динамического позиционирования для решения задачи робастного удержания положения надводного судна на базе метода последовательного компенсатора. При помощи экспериментальной установки была доказана эффективность синтезированного закона управления.

Благодарности. Авторы благодарны ведущему инженеру Торгейр Вал (NTNU), аспирантам Юн Бьерне и Миккел Еске Норгор Соренсен (NTNU), а также студенту Бенедикте Элизе Флегум (NTNU) за содействие в проведении экспериментальных исследований. Настоящему международному научному сотрудничеству содействовал Норвежский университетский центр в Санкт-Петербурге (Представительство Университета Осло), финансируемый и работающий при поддержке норвежских университетов гг. Осло, Берген, Тромсё и Тронхейм.

Работа поддержана Исследовательским советом Норвегии (RCN) в рамках программы «Морские и береговые операции» (MAROFF), проект 210670 (D2V). Экспериментальные исследования выполнены в Центре AMOS NTNU, поддерживаемом RCN в рамках финансирования Центров передового опыта, проект 223254 (AMOS).

ЛИТЕРАТУРА

1. Международная морская организация. URL: http://www.imo.org/en/Pages/Default.aspx (Дата обращения:26.01.2019)
2. **Бобцов А.А., Никифоров В.О., Пыркин А.А., Слита О.В., Ушаков А.В.** Методы адаптивного и робастного управления нелинейными объектами в приборостроении: учебное пособие для высших учебных заведений. – СПб: НИУ ИТМО, 2013. 277 с.: ил. 65. ISBN 978-5-7577-0428-9
3. **Маргун А.А., Зименко К.А., Базылев Д.Н., Бобцов А.А., Кремлев А.С.** Адаптивное управление двухзвенным роботом-манипулятором на базе метода последовательного компенсатора // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2014. № 2. С. 79–85.
4. **Петраневский И.В., Борисов О.И., Громов В.С., Пыркин А.А.** Управление квадрокоптером с компенсацией ветровых возмущений // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. № 6. С. 1045–1053.

A.R. Dahl (Norwegian University of Science and Technology, Trondheim), **O.I. Borisov, F.B. Karashaeva** (ITMO University, St. Petersburg). **Robust Output Regulation in Station-Keeping Problem of Surface Vessel**

Abstract. A problem of station-keeping of a surface vessel characterized by parametric uncertainty and MIMO structure with coupling effects, a robust output controller is addressed. Design of the station-keeping system is based on the consecutive compensator approach. Particular attention is given to experimental study at the Center for Autonomous Marine Operations and Systems (AMOS) of the Norwegian University of Science and Technology (NTNU) in Trondheim, Norway.

УДК 681.5.051

М.А. КАКАНОВ, О.И. БОРИСОВ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ИНТЕГРАЛЬНОГО НАСЫЩЕНИЯ В МОБИЛЬНЫХ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В докладе рассмотрена задача управления движением мобильных киберфизических систем. Представленный закон управления основан на принципе сильной обратной связи и содержит в своей структуре внутреннюю модель для компенсации внешних детерминированных возмущений, а также схему антивиндап-коррекции для компенсации интегрального насыщения методом обратного счета. Работоспособность предлагаемого алгоритма управления проиллюстрирована компьютерным моделированием.

Введение. В прикладных исследованиях теории управления в последнее время большой интерес представляет класс так называемых киберфизических систем. Такие системы используют вычислительные и коммуникационные алгоритмы, глубоко внедренные в физические процессы и тесно взаимодействующие с ними, что позволяет эффективно расширять возможности физических систем [2]. Они состоят из множества «умных» устройств, связанных между собой в единую сеть и способных самостоятельно адаптироваться к внешним изменениям без вмешательства человека.

Существует множество областей применения мобильных киберфизических систем, включая, например, производство и транспорт. В рамках транспортных мобильных киберфизических систем можно рассматривать надводные суда и беспилотные летательные аппараты (например, квадрокоптеры). Эти объекты представляют собой многомерные механические системы, на которые оказывают влияние внешние возмущающие воздействия (например, ветровой снос, волновая качка, течение). Стоит отметить, что параметры таких объектов часто неизвестны или известны частично, в силу чего замкнутая система с разработанным регулятором должна характеризоваться свойством робастности по отношению к параметрической неопределенности. В таких прикладных задачах положительно зарекомендовал себя метод последовательного компенсатора, основанный на принципе сильной обратной связи [1].

При разработке алгоритмов управления киберфизическими системами необходимо принимать во внимание ограничения аппаратных возможностей реальных технических систем. Например, насыщение управляющих сигналов при наличии интегральной компоненты в структуре регулятора приводит к появлению эффекта интегрального насыщения (integral windup), вследствие чего в системе могут увеличиться время переходного процесса, значение перерегулирования, а также появиться автоколебания и даже потеря устойчивости [3]. Для компенсации интегрального насыщения в систему вводят сигнал антивиндап-коррекции.

Настоящая работа посвящена задаче управления движением многомерной механической системы с компенсацией интегрального насыщения в рамках структуры транспортной киберфизической системы.

Постановка задачи. Рассматривается многоканальная система, разбиваемая на одноканальные подсистемы методом декомпозиции с допущением слабого взаимовлияния (линеаризации модели объекта управления). Далее будем рассматривать одиночный канал управления, описываемый уравнениями вида:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + bu + Rw, \\ y &= c^T x, \end{aligned} \tag{1}$$

где $x \in R^n$ – неизмеряемый вектор состояния, $y \in R^1$ – сигнал выхода объекта, доступный измерению, $u \in R^1$ – сигнал управления, $w \in R^m$ – возмущающее воздействие, A,b,c,R – неизвестные матрицы и векторы соответствующих размерностей.

Ограничения на входные управляющие воздействия u рассматриваются как секторная нелинейность типа «насыщение». Рассматриваются детерминированные возмущения с известными

параметрами, являющиеся выходом линейной системы (генератора возмущений). Необходимо стабилизировать выходную переменную объекта.

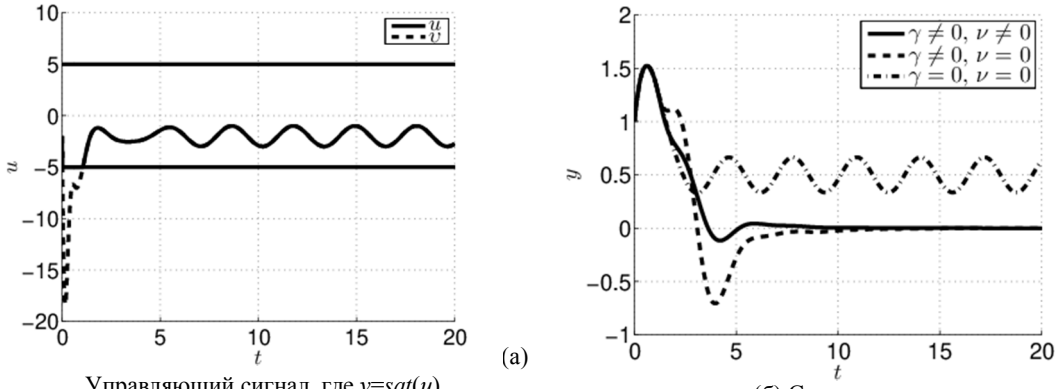
Синтез регулятора. Процедура синтеза укрупненно может быть представлена в виде последовательности следующих операций:

- многоканальная система разбивается на одноканальные подсистемы методом декомпозиции с допущением слабого взаимовлияния (линеаризации модели объекта управления);
- на основе метода последовательного компенсатора [1] выбирается номинальный регулятор;
- полученная замкнутая система преобразуется к системе вида Лурье [4];
- на основе критерия Попова доказывается асимптотическая устойчивость замкнутой системы [5].

Для подтверждения эффективности разработанного алгоритма проведено компьютерное моделирование системы. Проводилось три эксперимента:

- номинальный регулятор без внутренней модели и контура антивиндап-коррекции (γ=0,ν=0),
- номинальный регулятор с компенсацией возмущения $(\gamma \neq 0, \nu = 0)$
- регулятор с компенсацией возмущения и интегрированным контуром антивиндап-коррекции $(\gamma \neq 0, \nu \neq 0)$,

где ν – коэффициент контура антивиндап-коррекции, γ – коэффициент внутренней модели. Результаты моделирования рассмотренного алгоритма (см. рисунок) демонстрируют наилучшие показатели качества переходного процесса.



(а) Управляющий сигнал, где $v=sat(u)$

(б) Сигнал выхода

Результаты моделирования

Заключение. Разработанный робастный алгоритм управления с компенсацией интегрального насыщения для компоненты транспортной киберфизической системы решает задачу управления движением в условиях детерминированных возмущений. Эффективность предложенного алгоритма подтверждена компьютерным моделированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бобцов А.А.** Робастное управление по выходу линейной системой с неопределенными коэффициентами. Автоматика и телемеханика, 2002, С. 108–117.
2. **M. Törngren, F. Asplund, et al**. Characterization, Analysis, and Recommendations for Exploiting the Opportunities of Cyber-Physical Systems. Academic Press, 2017.
3. **S. Tarbouriech, et al.** Stability and stabilization of linear systems with saturating actuators. Springer Science & Business Media, 2011.
4. **Khalil H. K., Grizzle J. W.** Nonlinear systems. Upper Saddle River, NJ : Prentice hall, 2002.
5. **Turner M. C., Bates D. G.** Mathematical methods for robust and nonlinear control. Book series on control systems. Springer, Berlin, 2007.

M.A. Kakanov, O.I. Borisov (ITMO University, Saint-Petersburg). **Robust Control with windup compensation for mobile cyberphysical systems**

Abstract. Problem of control synthesis for mobile cyber physical system are considered. Perturbations and limitations of input signals were taken into consideration. The effectiveness of the proposed approach is confirmed by simulation.

УДК 62.50

Е.А. КАРПЕНКО, О.В. СЛИТА
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИМ ОБЪЕКТОМ

Рассматривается модель изменения температуры внутри помещения индивидуального теплового пункта. В предлагаемой модели учтено наличие в помещении отопительного прибора, приточно-вытяжной вентиляции, а также теплопотери через ограждающие конструкции и добавочные потери тепла (на ориентацию по сторонам света, на количество наружных стен, наружных дверей, окон). Для каналов управления вычислены грамианы управляемости по состоянию и выходу. Предложен метод оценки влияния каждого из каналов на температуру внутри помещения.

Введение. Автоматизированные устройства управления системами жизнедеятельности (например, индивидуальный тепловой пункт (ИТП)) призваны поддерживать в зданиях и помещениях микроклимат, наиболее комфортный для работы и отдыха. В работе [1] рассмотрена модель, описывающая изменение температуры внутри отапливаемого помещения, а также предложена схема управления температурой и ПИ-регулятор. В этой работе в модели учтено влияние приточно-вытяжной вентиляции. Таким образом, увеличилось количество факторов, учитываемых при формировании закона управления. Для получения оценок степени влияния каждого их этих факторов в этой работе предлагается использовать грамианы управляемости [2–4].

Анализ системы управления. Рассмотрим модель, описывающую изменение температуры воздуха внутри помещения:

$$mc_в\dot{t}_в = Q_{оп} - k_{ок}s_{ок}(t_в - t_н) - 0,28L\rho_в c_в(t_в - t_{вент}), \quad (1)$$

где m – масса воздуха в помещении, $c_в$ – удельная теплоемкость воздуха, $t_в$ – температура внутри помещения, $Q_{оп}$ – количество теплоты от отопительного прибора, $k_{ок}$ – коэффициент теплопередачи ограждающих конструкций, $s_{ок}$ – площадь ограждающих конструкций, $t_н$ – наружная температура, L – количество приточного воздуха, необходимое для осуществления воздухообмена [5–7], $\rho_в$ – удельная плотность воздуха, $t_{вент}$ – температура воздуха в системе вентиляции.

Как следует из формулы (1), на температуру внутри помещения влияют три входных воздействия: количество теплоты от отопительного прибора $Q_{оп}$, наружная температура $t_н$ и температура воздуха в системе вентиляции $t_{вент}$.

Для того, чтобы проанализировать степени влияния каждого из воздействий, воспользуемся грамианами управляемости. Перепишем (1) в форме вход-состояние-выход:

$$\dot{x}(\tau) = Ax(\tau) + B_1u_1(\tau) + B_2u_2(\tau) + B_3u_3(\tau), \quad (2)$$

$$y(\tau) = Cx(\tau), \quad (3)$$

где переменная состояния $x(\tau)$ – температура внутри помещения, управляющая переменная $u_1(\tau)$ – теплопоступления от отопительного прибора (1-й канал управления), управляющая переменная $u_2(\tau)$ – наружная температура (2-й канал управления), управляющая переменная $u_3(\tau)$ – температура воздуха в системе вентиляции (3-й канал управления), выходная переменная $y(\tau)$ – температура внутри помещения, $A = -\dfrac{(k_{ок}s_{ок} + 0,28L\rho_в c_в)}{mc_в}$ – коэффициент, описывающий состояние системы, $B_1 = \dfrac{1}{mc_в}$, $B_2 = \dfrac{k_{ок}s_{ок}}{mc_в}$, $B_3 = \dfrac{0,28L\rho_в}{m}$ – коэффициенты усиления входных воздействий, коэффициент усиления выхода C=1.

Рассмотрим грамианы управляемости всех трех каналов с передаточными функциями $\Phi_i(s) = \dfrac{CB_i}{s - A}$, $i = 1,...3$.

Запишем грамиан управляемости по состоянию [2, 3], соответствующий влиянию $u_i(\tau)$ на $x(\tau)$:

$$W_{xi} = -\frac{B_i^2}{2A}, \; i = 1,...3. \tag{4}$$

Оценку степени влияния вклада каждого из каналов в выходную переменную можно произвести, вычислив грамиан управляемости для трех каналов. В частности, в рассматриваемом примере грамианы каналов являются скалярными величинами и принимают следующие значения: $W_{y1} = 0,0783$, $W_{y2} = 0,6136$, $W_{y3} = 0,00025$. Таким образом, можно заключить, что на температуру внутри помещения наибольшее влияние оказывает 2 канал управления.

Заключение. Предложена модель, описывающая изменение температуры внутри помещения, учитывающая наличие в нем отопительного прибора, приточно-вытяжной вентиляции, а также теплопотери через ограждающие конструкции и добавочные потери тепла. Для определения степени влияния каждого из входных воздействий объекта на температуру внутри помещения предложено использовать грамианы управляемости. Полученный результат можно использовать в решении задачи рационального распределения энергоресурсов при поддержании микроклимата в ИТП.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карпенко Е.А., Слита О.В.** Синтез закона управления для системы отопления промышленного предприятия // Материалы XX конференции молодых ученых с международным участием «Навигация и управление движением», Санкт-Петербург, Россия, Концерн «ЦНИИ Электроприбор». 2018. С.208–210.
2. **Александрова С.А., Слита О.В., Ушаков А.В.** Использование грамианных технологий при ранжировании параметрических неопределенностей. Изв. ВУЗОВ. Приборостроение. 2015. Т.58. № 9. С.759–764.
3. **Alexandrova S., Nikolaev N., Slita O., Karpenko E., Musaev A.** Gramian Based method for the state matrix parameters ranking. // 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications, Moscow, Russia. 2018. P. 164–167.
4. **Aranz M.C., Birk W., Halvvarsson B.** Empirical approach to robust gramian-based analysis of process interactions in control structure selection /// IEEE Conf. on Decision and Control, Piscataway, NJ, USA. 2011. P.6210–6215.
5. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. Введ. 2003-10-01. М.: Госстрой России, 2012. 31 с.
6. Справочник по теплоснабжению и вентиляции. Книга первая. Отопление и теплоснабжение / Р.В.Щекин [и др.]. Киев: Будивельник, 1976. 416 с.
7. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Часть первая. Отопление / Богословский В.Н. [и др.]. М.: Стройиздат, 1990. 344 с.

E.A. Karpenko, O.V. Slita (ITMO University, Saint-Petersburg). **Investigation of thermal plant control system**

Abstract. In this paper we consider a model of temperature inside a room of an individual heating unit. This model considers a heater, forced-air ventilation and heat losses through surrounding constructions and additional heat losses (by orientation to sides of the world, by the number of external walls, external doors, windows). During the investigation performance of indoor temperature model was analyzed, transfer functions of channels “heating device - indoor temperature”, “outdoor temperature - indoor temperature” and “ventilation air temperature – indoor temperature” were obtained. Control gramians of these channels were found. A method for evaluation of influence of each channel on indoor temperature was introduced.

УДК 62-533.65

И.А. ЛЕБЕДЕВ, В.Н. ЧЕСТНОВ
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА МНОГОМЕРНОГО ОБЪЕКТА ПО ИНЖЕНЕРНЫМ ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА НА ОСНОВЕ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ

Работа посвящена проблеме синтеза многомерных регуляторов для вакуумных электрических печных агрегатов по заданным или достижимым инженерным показателям качества: ошибкам регулирования по каждой регулируемой переменной, времени регулирования и радиусу запасов устойчивости. Решение такой задачи опирается на специальным образом конструированную задачу H_∞ оптимизации и упрощенную математическую модель процессов нагрева.

Введение. Цифровые регуляторы заняли главенствующее положение в промышленности, энергетике, авиации, робототехнике и т.д. Поэтому задача синтеза дискретных регуляторов многомерных систем по инженерным показателям качества приобретает невиданную ранее актуальность и важность в связи с реальными запросами инженеров-проектировщиков.

Вакуумные печные агрегаты (рис. 1) нашли широкое применение для проведения термических отжигов металлических изделий различного назначения. Одним из важнейших преимуществ электронагрева в вакууме является возможность безокислительного нагрева металлов. Особенностью таких агрегатов является большая потребляемая мощность, значительное время работы в динамических режимах и значительные размеры, что усложняет расчет оптимального многомерного регулятора, ведет к значительным энергетическим потерям и ухудшению качества конечного продукта. К тому же более корректное управление позволило бы продлить срок эксплуатации печного агрегата. Обеспечение равномерности распределения температуры внутри рабочего пространства печи, необходимой для поддержания стабильность параметров качества (микроструктуры, механических свойств) термически обрабатываемых изделий является нетривиальной задачей, особенно при больших размерах, как самого печного агрегата, так и изделий (порядка 3-10 м). Часто ситуацию осложняет и тот факт, что измерить температуру непосредственно отжигаемого изделия нет технической возможности, и при управлении приходится опираться на показания датчиков, расположенных достаточно далеко.

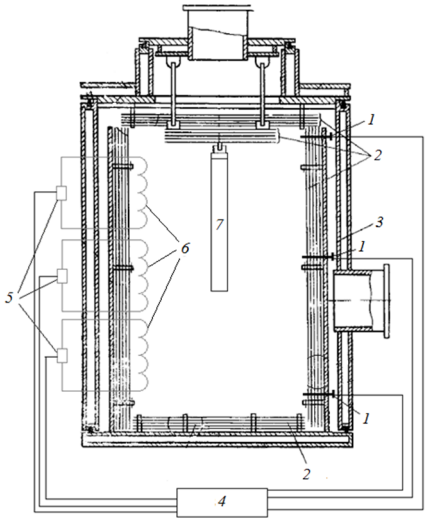


Рис. 1. Типичная схема устройства вакуумного печного агрегата: *1* – датчики температуры; *2* – экраны из молибдена; *3* – цилиндр из нержавеющей стали (вспомогательный кожух); *4* – контроллер; *5* – преобразователи напряжения; *6* – нагреватели; *7* – отжигаемое изделие

Одним из главных сдерживающих факторов повсеместного внедрения многомерного управления является в создании модели распределения тепловых потоков внутри печных агрегатов, вследствие чего на производстве нет точной информации о происходящих внутри рабочего объёма тепловых процессах, например степени нагрева изделий, наличия градиента температуры вдоль изделия и т.д. На практике почти всегда используют не многомерный регулятор, а систему из нескольких развязанных простых ПИД-регуляторов и компенсируют вышеперечисленные недостатки избыточными по температуре и времени обработки изделий режимами работы печных агрегатов.

Доклад посвящен анализу различных способов упрощения сложной математической модели распределения тепловых потоков внутри электрических печных агрегатов сопротивления [1] и описанию подхода к синтезу многомерного регулятора по заданным или достижимым инженерным показателям качества на основе специальным образом конструированной задачи H_∞-оптимизации [2].

Постановка задачи. Разработана нелинейная модель распределения тепловых потоков внутри печного пространства вакуумного печного агрегата [1], содержащая полную информацию о геометрии, оптических и физических характеристиках внутрипечного пространства:

$$T(k) = [A \cdot T_q(k - 1) + S \cdot T(k - 1) + B \cdot u(k - 1)] \cdot h + T(k - 1), \quad (1)$$

где h – интервал дискретности; $T(k) = \left[T_1(k) \quad T_2(k) \quad \ldots \quad T_N(k)\right]^T$ – вектор значений температур N элементов печи; $T_q(k) = \left[T_1^4(k) \quad T_2^4(k) \quad \ldots \quad T_N^4(k)\right]^T$ – вектор четвертых степеней температур N элементов печи; $u(k)$ – вектор значений элементарной мощности, подаваемой на нагреватели, A – матрица перераспределения энергии за счет излучения, S – матрица перераспределения энергии за счет теплопроводности, B – матрица интенсивности нагрева за счет электрической энергии. Такая модель соответствует купольной вертикальной вакуумной электрической печи сопротивления с водяным охлаждением кожуха и тремя зонами нагрева для отжига труб. Габариты рабочего пространства печи: диаметр 0,65 м, высота 6 м (рис. 1). Необходимо найти стабилизирующий регулятор такой, чтобы выполнялись требования к точности(воспроизведение задающего воздействия), радиусам запасов устойчивости и времени регулирования [2].

Упрощение модели. В силу большой размерности матриц полной модели (для достижения необходимой точности моделирование приходится оперировать с десятками тысяч элементов) синтез многомерного регулятора является очень нетривиальной задачей, для решения которой целесообразно на первом этапе получить упрощенную линейную модель.

Для упрощения модели исследованы несколько известных способов[3], из которых лучшие результаты показал метод подпространства состояний (Subspace Identification). Результаты сравнения полученной модели 2 порядка и полной моделей приведено на рис. 2, где приводятся температуры верхней, средней и нижней зон нагрева в полной и упрощенной моделях и показывается их достаточная близость, прежде всего, в статическом режиме.

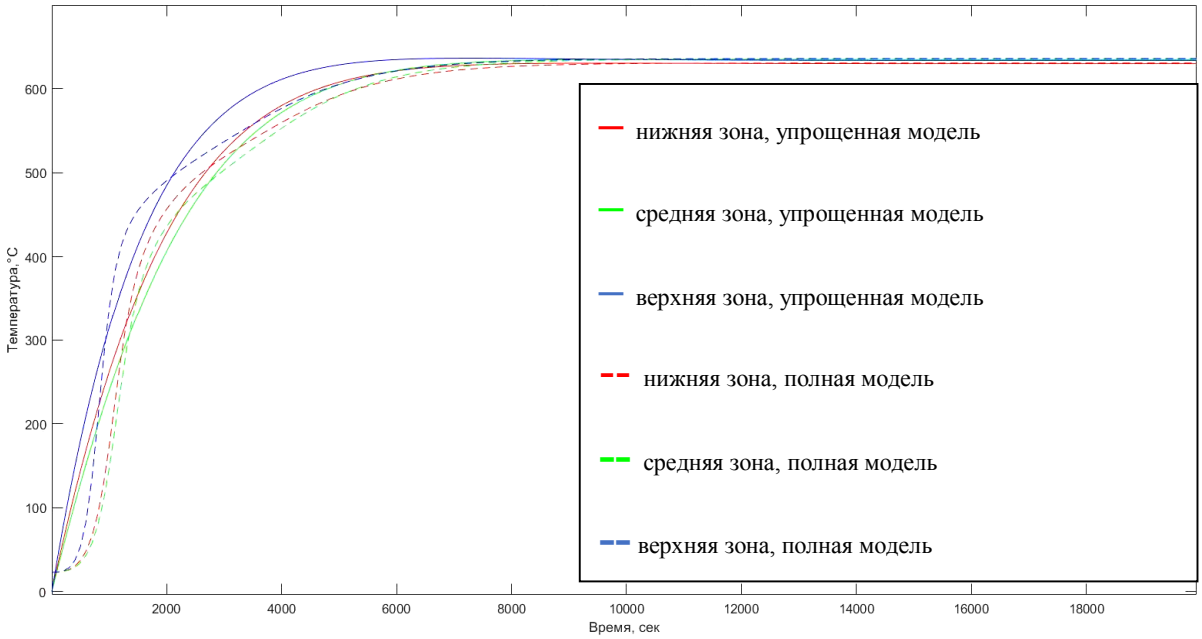


Рис. 2. Сравнение переходных процессов в различных зонах нагрева в полной и упрощенной моделях

Синтез многомерного регулятора. На втором этапе решается задача синтеза регуляторов по выходу многомерных систем, гарантирующих заданные либо достижимые: ошибки регулирования, радиусы запасов устойчивости и время регулирования при действии полигармонических внешних возмущений с неизвестными амплитудами (с ограничением их суммы), частотами и неограниченным числом гармоник [4]. Подход к решению опирается на специальным образом сконструированную стандартную задачу H_∞ – оптимизации [2] по синтезу непрерывного

регулятора (2). Затем строится эквивалентная дискретная модель регулятора (2) с выбранным периодом дискретности. В результате получается дискретный стабилизирующий регулятор, обеспечивающий инженерные показатели качества при работе с полной моделью распределения тепловых потоков.

Заключение. В работе предложен способ упрощения сложной математической модели распределения тепловых потоков с необходимой точностью. Получен многомерный дискретный регулятор по заданным инженерным показателям качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лебедев И.А., Пономарев А.П.** Модель термообработки металлических изделий в вакуумных электрических печах сопротивления // Доклады Томского государственного технологического университета систем управления и радиоэлектроники, Том.19, № 1. Томск, 2016. С.83–89.
2. **Честнов В.Н.,** Синтез многомерных систем заданной точности, времени регулирования и радиуса запасов устойчивости // Дифференциальные уравнения.2014.№ 8.С.1138–1139.
3. **Ljung, L.** *System Identification: Theory for the User*, Appendix 4A, Second Edition, pp. 132–134. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1999.
4. **Chestnov V.N., Shatov D.V.,** Multivariable Systems Design of Desired Accuracy Based on LQ and H-infinity Optimization Procedures // Proc. of the 2018 European Control Conference (ECC-2018),Limassol, Cyprus,2018.European Control Association(EUCA). 2018. P. 2511–2516.

I.A. Lebedev, V.N. Chestnov (Institute of Control Sciences V.A. Trapeznikov Academy of Sciences, Moscow). **Synthesis of the regulator of a multi-dimensional object by engineering indicators of quality on the basic of a simplifield model"**

Abstract. This paper is devoted to the problem of the synthesis of multidimensional regulators for vacuum electric furnace units according to specified or achievable engineering quality indicators: control errors for each controlled variable, control time and radius of stability stocks. The solution of such a problem is based on a specially designed optimization problem H∞ and a simplified mathematical model of heating processes.

УДК 681.51

И.Р. БЕЛОВ
(Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова, Москва)

ЛЕММЫ ОБ ОГРАНИЧЕННОСТИ АНИЗОТРОПИЙНОЙ НОРМЫ ДИСКРЕТНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ С МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫМИ НЕКОРРЕЛИРОВАННЫМИ ШУМАМИ

В докладе представлены условия ограниченности анизотропийной нормы для дискретных нестационарных систем с мультипликативными шумами. Условия сформулированы в виде лемм, способствующих решению задач управления и фильтрации

Введение. В 90-е годы И. Г. Владимировым в [1, 2] была предложена анизотропийная теория управления. Она является одной из теорий, предлагающих ослабить консервативность широко известной H_∞-теории, связанной с лежащей в ее основе робастной парадигмой. Основным понятием анизотропийной теории является мера отклонения закона распределения реального входного возмущения от закона нормального распределения с нулевым математическим ожиданием и скалярной ковариационной матрицей λI, которую назвали анизотропией сигнала. Благодаря этому параметру можно синтезировать закон управления, который более эффективно с точки зрения отношения H_2-норм выхода и входа подавляет входное возмущение.

В последние годы возрастает интерес к системам с мультипликативными шумами, которые часто встречаются в задачах управления движением, фильтрации информации с датчиков, химии и биологии, в финансовой сфере и многих других [3, 4]. В [5, 6, 7] рассмотрены задачи анализа и синтеза закона управления для подобных систем с точки зрения анизотропийной теории. Однако в большинстве рассмотренных случаев эти системы являются стационарными и рассматриваются на бесконечном интервале времени. В то же время в инженерной практике системы чаще всего меняют свои свойства со временем, т.е. являются нестационарными. В настоящей работе рассмотрена задача анизотропийного анализа дискретных нестационарных стохастических систем с мультипликативными шумами. Работа является продолжением исследований, приведенных в [8], которые основаны на [9].

В основной части доклада представлено решение задачи определения условий ограниченности анизотропийной нормы подобных систем в виде формулировки леммы об ограниченности анизотропийной нормы в двух вариациях. В заключении представлено описание результатов, полученных при рассмотрении поставленной задачи анализа, и направления дальнейших исследований по данной тематике.

Основная часть. Объектом рассмотрения является линейная дискретная нестационарная стохастическая система следующего вида:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A(k)x(k) + B(k)w(k), \\ z(k) &= C(k)x(k) + D(k)w(k), \end{aligned} \tag{1}$$

где векторы $x(k) \in \mathbb{L}_2^{n_x}, w(k) \in \mathbb{L}_2^{m_w}, z(k) \in \mathbb{L}_2^{p_z}$, матрицы $A(k) \in \mathbb{L}_2^{n_x \times n_x}$, $B(k) \in \mathbb{L}_2^{n_x \times m_w}$, $C(k) \in \mathbb{L}_2^{p_z \times n_x}$ и $D(k) \in \mathbb{L}_2^{p_z \times m_w}$ при $k \in \{0, \ldots, N\}$ являются случайными и зависящими от времени, а начальное состояние системы $x(0) = 0$. $\mathbb{L}_2^n$ – гильбертово пространство случайных n-мерных векторов со скалярным произведением $\langle x, y \rangle = \mathbf{E}[x^T y]$ и конечной нормой $\| x \| = \sqrt{\langle x, x \rangle}$, $\mathbb{L}_2^{p \times m}$ – гильбертово пространство случайных $(p \times m)$–мерных матриц со скалярным произведением $\langle X, Y \rangle = tr(\mathbf{E}[X^T Y])$ и конечной нормой $\| X \| = \sqrt{\langle X, X \rangle}$.

Предполагается, что матрицы $A(k)$, $B(k)$, $C(k)$, $D(k)$ имеют следующий вид: $A(k) = A_0(k) + \xi_1(k) A_1(k)$, $B(k) = B_0(k) + \xi_2(k) B_1(k)$, $C(k) = C_0(k) + \xi_3(k) C_1(k)$, $D(k) = D_0(k) + \xi_4(k) D_1(k)$.

Здесь $A_i(k) \in \mathbb{R}^{n_x \times n_x}$, $B_i(k) \in \mathbb{R}^{n_x \times m_w}$, $C_i(k) \in \mathbb{R}^{p_z \times n_x}$, $D_i(k) \in \mathbb{R}^{p_z \times m_w}$ – детерминированные зависящие от времени вещественные матрицы, и $\forall j,k \quad \xi_j(k) \in \mathbb{L}_2$ являются скалярными случайными величинами.

Систему (1) можно описать с помощью отношения вход-выход следующего вида:

$$Z_{0:N} = F_{0:N} W_{0:N}, \tag{2}$$

где векторы $Z_{0:N} = [z^T(0), z^T(1), \ldots, z^T(N)]^T$, $W_{0:N} = [w^T(0), w^T(1), \ldots, w^T(N)]^T$, матрица $F_{0:N} \in \mathbb{R}^{l_z \times l_w}, l_z = p_z(N+1), l_w = m_w(N+1)$ определяет соотношение между $Z_{0:N}$ и $W_{0:N}$.

Анизотропийная норма рассматриваемой системы находится по формуле:

$$|||F_a|||_a = \sqrt{\frac{\mathrm{tr}(\Lambda\Sigma(q))}{\mathrm{tr}(\Sigma(q))}}, \tag{3}$$

где $\Sigma(q) = (I_m - q\Lambda)^{-1}$ – ковариационная матрица наихудшего возмущения w со средней анизотропией сигнала $\overline{A}(w) \le a$. $\Lambda = \mathbf{E}[F_{0:N}^T F_{0:N}] \in \mathbb{R}^{l_w \times l_w}$ – математическое ожидание матрицы $F_{0:N}^T F_{0:N}$.

В докладе представлены следующие вариации условий ограниченности анизотропийной нормы рассматриваемой системы:

Лемма 1: Пусть задана система F вида (1). Для нее выполняется условие ограниченности анизотропийной нормы $|||F|||_a \leqslant \gamma$ тогда и только тогда, когда $\exists q \geqslant 0$ и $\exists R_1(k), R_2(k) \geqslant 0, k \in \{0, N\}$:

$$R_1(k) = A_0^{\mathrm{T}}(k) R_1(k+1) A_0(k) + A_1^{\mathrm{T}}(k) R_1(k+1) A_1(k) + q(C_0^{\mathrm{T}}(k) C_0(k) + C_1^{\mathrm{T}}(k) C_1(k)), \tag{4}$$

$$R_2(k) = A_0^{\mathrm{T}}(k) R_2(k+1) A_0(k) + L^{\mathrm{T}}(k) S^{-1}(k) L(k), R_1(N+1) = R_2(N+1) = 0, \tag{5}$$

$$\begin{aligned} S^{-1}(k) = I_{m_w} - \Big(q(D_0^{\mathrm{T}}(k) D_0(k) + D_1^{\mathrm{T}}(k) D_1(k)) + B_0^{\mathrm{T}}(k) R_1(k+1) B_0(k)\Big) - \\ - B_0^{\mathrm{T}}(k) R_2(k+1) B_0(k) - B_1^{\mathrm{T}}(k) R_1(k+1) B_1(k) - B_1^{\mathrm{T}}(k) R_2(k+1) B_1(k), \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} L(k) = S(k)\Big(qD_0^{\mathrm{T}}(k) C_0(k) + B_0^{\mathrm{T}}(k) R_1(k+1) A_0(k) + \\ + B_0^{\mathrm{T}}(k) R_2(k+1) A_0(k)\Big), \end{aligned} \tag{7}$$

$$\sum_{k=0}^{N} \ln\det S^{-1}(k) \geqslant 2a + m(N+1)\ln(1 - q\gamma^2). \tag{8}$$

Лемма 2: Пусть задана система F вида (1) с $A_0 = 0, B_0 = 0, C_0 = 0, D_0 = 0$. Для нее выполняется условие ограниченности анизотропийной нормы $|||F|||_a \leqslant \gamma$ тогда и только тогда, когда $\exists q \geqslant 0$ и $\exists \tilde{R}_1(k), \tilde{R}_2(k) \geqslant 0, k \in \{0, N\}$:

$$\tilde{R}_1(k+1) = A_1(k) \tilde{R}_1(k) A_1^{\mathrm{T}}(k) + qB_1(k) B_1^{\mathrm{T}}(k), \tilde{R}_1(0) = 0, \tag{9}$$

$$\tilde{S}(k) = I_r - (qD_1(k) D_1^{\mathrm{T}}(k) + C_1(k) \tilde{R}_1(k) C_1^{\mathrm{T}}(k)), \tag{10}$$

$$\sum_{k=0}^{N} \ln\det \tilde{S}(k) \geqslant 2a + m(N+1)\ln(1 - q\gamma^2). \tag{11}$$

Доказательства лемм основаны на выражении анизотропийной нормы (3) системы (1) в терминах ковариационной функции сигнала w и сведении задачи нахождения анизотропийной нормы к задаче факторизации, а также на переходе от выражения $\det(I_m - q\mathbf{E}[F_{0:N}^T F_{0:N}])^{-1}$ к $\det(I_m - q\mathbf{E}[F_{0:N} F_{0:N}^T])^{-1}$. Идеи доказательства изложены в [5, 8].

Заключение. Получены условия ограниченности анизотропийной нормы для дискретных нестационарных систем вида (1) с мультипликативными шумами. В дальнейшем планируется рассмотрение задачи синтеза оптимального и субоптимального управления для данного класса систем, а также рассмотрение задачи фильтрации. Для решения этих задач потребуются сформулированные в данной работе леммы об ограниченности анизотропийной нормы.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 18-31-00067

ЛИТЕРАТУРА

1. **I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov.** On computing the anisotropic norm of linear discrete-time-invariant systems. Proc. 13 IFAC World Congr. USA, 1996. pp. 179–184.
2. **I.G. Vladimirov, A.P. Kurdjukov, A.V. Semyonov.** State-space solution to anisotropy-based stochastic H_∞-optimization problem. Proc. 13 IFAC World Congr. USA, 1996. pp. 427–432.
3. **E. Gershon, U. Shaked, I. Yaesh. I.** H_∞ - Control and Filtering of Discrete-Time Stochastic Systems with Multiplicative Noise. Automatica, 2001. vol. 37. pp. 409–417.
4. **A.-M. Stoica, I. Yaesh.** On the anisotropic norm of discrete time stochastic systems with state dependent noises. Ann. Acad. Rom. Sci., 2012. Ser. Math. Appl. 4, pp. 209–220.
5. **E. A. Maximov, A. P. Kurdyukov, I. G. Vladimirov.** Anisotropic Norm Bounded Real Lemma for Linear Discrete Time Varying Systems. Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 - September 2, 2011 pp. 4701–4706.
6. **A.V. Yurchenkov.** Anisotropic norm estimation for discrete time-invariant system with multiplicative noises. Mat. Mat. Model., 2017, No. 4. pp. 28–41 (In Russian).
7. **A.V. Yurchenkov.** Anisotropy-Based Controller Design for Linear Discret–Time Systems with Multiplicative Noise. J. of Comp. and Sys. Sci. Int., 2018. vol. 57, No. 6, pp. 864–873.
8. **A.Yu. Kustov.** State–Space Formulas for Anisotropic Norm of Linear Discrete Time Varying Stochastic Systems. Proc. 15th Int. Conf. on Electrical Eng., Comp. Science and Aut. Control (CCE), Mexico City, Mexico, Sept. 2018. p. 6.
9. **I.G. Vladimirov, P. Diamond, P. Kloeden.** Anisotropy-based robust performance analysis of finite horizon linear discrete time varying systems. Aut. and Rem. Control, 2006, vol. 67(8), pp. 1265–1282.

I.R. Belov (V.A.Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow). **Anisotropy-Based Bounded Real Lemma for Multiplicative Noise Systems: the Finite Horizon Case**

Abstract. In this paper, the analysis of linear discrete time varying multiplicative noise system in terms of anisotropy-based theory is considered. As a result, the two variants of bounded real lemmas for anisotropic norm are presented. These lemmas include difference forward-time and backward-time Riccati equations.

УДК 681.51

Д.А. МАРКОВ
(Университет ИТМО, Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург)

УПРАВЛЕНИЕ ДВУХРОТОРНОЙ МНОГОМЕРНОЙ СИСТЕМОЙ

Рассмотрен синтез регулятора для двухроторной многомерной системы. Алгоритм синтеза регулятора можно разделить на несколько этапов: получение и линериализация модели динамики системы, синтез линейного квадратичного регулятора с определением критерия качества, решение задачи слежения за заданной траекторией и синтез оптимального наблюдателя.

Введение. В докладе рассматривается объект управления, представляющий собой двухстепенной лабораторный стенд. На каждую степень свободы (угол тангажа и угол рысканья) приходится по одному приводу постоянного тока, один закреплен на главном роторе, второй – на хвостовом роторе. Объект управления имеет ряд сложностей, к которым относятся: нелинейность, многомерность (два входа и два выхода) и значительная перекрестная связь между каналами управляемых величин. Многие статьи [1, 3–10], посвященные такому объекту, используют в основе синтеза интеллектуальное управление, что приводит к увеличению вычислительной сложности алгоритмов в сравнении с классическими методами, соответственно растет требование к мощности устройства, реализующего алгоритм управления и увеличивается стоимость реализации системы управления. В статье [2] используется оптимальное LQR-управление с неэффективным методом выбора параметров критерия оптимальности, что в конечном итоге приводит к затяжным переходным процессам. В этой работе предложен метод оптимального управления по квадратичному критерию качества. Настройка параметров критерия качества осуществляется с помощью интеллектуального метода оптимизации на этапе синтеза, что не повлияет на вычислительную сложность в момент движения объекта.

Объект управления. Объект управления представляет собой двухстепенную многомерную систему со значительным перекрестным взаимодействием. Система напоминает вертолет. Аэродинамические силы формируются с помощью изменения скоростей двигателей. Значительное перекрестное взаимодействие наблюдается между действиями ротора. Каждый ротор влияет на положение углов наклонов объекта управления. Объект управления описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений. Для синтеза регулятора будем использовать линейную модель в форме пространства состояний:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \tag{1}$$

где $x(t) = \left(\alpha_v, \quad \alpha_h, \quad \tau_1, \quad \tau_2, \quad M_R, \quad \frac{d\alpha_v}{dt}, \quad \frac{d\alpha_h}{dt} \right)$ – вектор состояний объекта, $u(t)$ – вектор входных воздействий, $y(t)$ – выходной вектор системы, A – матрица, характеризующая динамику объекта, B – матрица входных воздействий, C – матрица выхода, α_v – угол тангажа, α_h – угол рысканья, τ_1 – момент нагрузки на валу главного двигателя, τ_1 – момент нагрузки на валу хвостового двигателя, M_R – момент перекрестных связей.

Синтез регулятора. Суть оптимального управления заключается в минимизации некоторых параметров системы (время переходного процесса, расход топлива и т.д.), зачастую эта задача является противоречивой, поскольку минимизация одного параметра приводит к максимизации другого, вследствие чего для рассматриваемой задачи составляется критерий оптимальности, который и будет являться компромиссом для минимизируемых параметров.

Научный руководитель д.т.н., проф. Андриевский Б.Р.

Критерий качества задается выражением:

$$J\left(t,t_f\right)=\int_{t}^{t_f}\left(x^T\left(\tau\right)Qx\left(\tau\right)+u^T\left(\tau\right)Ru\left(\tau\right)\right)d\tau\,, \tag{2}$$

где t и t_f – начальное и конечное значение времени соответственно, Q – квадратная симметричная матрица, называемая матрицей взвешивания состояний, R – квадратная симметричная матрица, называемая матрицей затрат на управление [11].

Управляющее воздействие будем формировать в виде:

$$u(t)=-Kx(t)\,, \tag{3}$$

где K – матрица обратных связей, которая должна минимизировать функцию (2).

Матрица обратных связей находится из уравнения типа Риккати. Для решения задачи слежения за заданной траекторией реализуем оптимальный следящий регулятор, таким образом вектор управляющих воздействий будет описываться соотношением

$$u=L_g\xi-Kx\,, \tag{4}$$

где ξ – вектор состояния генератора модели задающего воздействия, L_g – матрица прямых связей, вычисляемая из уравнения типа Сильвестра [12].

Линейный квадратичный регулятор имеет существенный недостаток – отсутствие функциональной связи между реальными показателями качества управления и весовыми коэффициентами матриц Q и R критерия качества (2). В качестве способа настройки весовых коэффициентов, соответствующих оптимальным показателям качества, таким как быстродействие и энергоэффективность, выберем биоинспирированный алгоритм «Метод роя частиц» [13]. Этот алгоритм является методом численной оптимизации, для использования которого не требуется знать градиент оптимизируемой функции. Алгоритм имеет один оператор для вычисления скорости частиц, что обеспечивает его более быструю сходимость и способность избежать локальных оптимумов.

Специфика объекта управления не позволяет измерять все элементы вектора состояния, вследствие чего применим оптимальный наблюдатель – фильтр Калмана-Бьюси для возможности управления системой по выходу.

Заключение. Результатом проделанной работы является оптимальный линейный квадратичный следящий регулятор, для синтеза которого используется интеллектуальный поисковый метод, и наблюдатель, восстанавливающий вектор состояния объекта управления, поскольку специфика объекта не позволяет измерять все компоненты вектора состояния, используемые в модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chalupa P., Prikryl J., J.Novak.** Modelling of twin rotor MIMO system // 25th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM 2014. DAAAM, 2014. P. 249–258.
2. **Pandey S., Laxmi V.** Optimal control of twin rotor MIMO system using LQR technique // Smart Innovation, Systems and Technologies. 2014. Vol. 1. P. 11–21.
3. **Shaik F., Purwar S., Pratap B.** Real-time implementation of Chebyshev neural network observer for twin rotor control system // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38. P. 13043–13049.
4. **Rahideh A., Shaheed M.** Constrained output feedback model predictive control for nonlinear systems // Control Engineering Practice. 2012. Vol. 20. P. 431–443.
5. **Rahideh A., Bajodah A., Shaheed M.** Real time adaptive nonlinear model inversion control of a twin rotor MIMO system using neural networks // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2012. Vol. 25. P. 1289–1297.
6. **Tao C., Taur J., Chen Y.** Design of a parallel distributed fuzzy LQR controller for the twin rotor multi input multi-output system // Fuzzy Sets and Systems. 2010. Vol. 161. P. 2081–2103.
7. **Juang J., Tu K.** Design and realization of a hybrid intelligent controller for a twin rotor MIMO system // Journal of Marine Science and Technology. 2013. Vol. 21, no. 3. P. 333–341.

8. **Juang J., Tu K., Liu W.** Hybrid intelligent PID control for MIMO system // Springer-Verlag. 2006. Vol. 3. P. 654–663.
9. **Juang J., Lin R., Liu W.** Comparison of classical control and intelligent control for a MIMO system // Applied Mathematics and Computation. 2008. Vol. 205. P. 778–791.
10. **Juang J., Chiang Y.** Reinforcement learning with FCMAC for TRMS control // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology. 2013. Vol. 5. P. 1383–1389.
11. **Квакернаак Х., Сиван Р.** Линейные оптимальные системы управления. М.: Мир, 1977.
12. **Мирошник И.В., Никифоров В.О.** Синтез линейных систем автоматического управления. СПб: СПбГИТМО, 2000.
13. **Матренин П.В., Секаев В.Г.** Системное описание алгоритмов роевого интеллекта // Программная инженерия. 2013. 01. С.39–45.

D.A. Markov (ITMO University; IPME RAS, St. Petersburg). **Control of twin rotor MIMO system**

Abstract. This work is devoted to the synthesis of the regulator for a twin rotor MIMO system. Work on the synthesis of the regulator can be divided into several stages, such as obtaining and further linearizing the model of the system dynamics, the synthesis of the linear quadratic regulator with the definition of the quality criterion, the solution of the task of tracking a given trajectory and the synthesis of the optimal observer

УДК 681.51

А.А. ПЛОТНИКОВ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

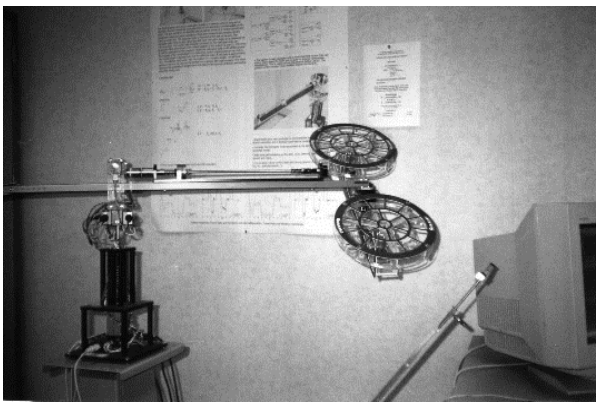
АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГИЕЙ МЕХАТРОННОГО СТЕНДА «ВЕРТОЛЕТ»

Рассматривается задача управления энергией математической модели мехатронного стенда «Вертолет» с несколькими неизвестными параметрами. Для решения этой задачи вводятся функционалы энергии и строится адаптивный алгоритм управления на основе метода скоростного градиента. Результаты моделирования в программной среде MATLAB подтверждают эффективность предложенного алгоритма.

Введение. В настоящее время все большее применение находят различные мехатронные лабораторные установки, предназначенные для проведения учебных и научно-исследовательских работ по процессам управления и обработки информации. К таким установкам относится рассматриваемый в данной работе мехатронный стенд «Вертолет». Важным аспектом в разработке алгоритмов управления лабораторными установками является учет параметрической неопределенности и неточности используемой модели объекта. Чтобы соответствовать требованиям к качеству управления в условиях параметрической неопределенности, разрабатываются робастные и адаптивные методы управления.

Доклад посвящен разработке адаптивного алгоритма управления энергией мехатронного стенда «Вертолет» на основе метода скоростного градиента [1, 2].

Конструкция стенда. Внешний вид стенда «Вертолет» представлен на рисунке. Стенд имеет основание, на которое шарнирно крепится планка. На одном конце планки находится «корпус вертолета», на другом конце – противовес. Противовес необходим для снижения требований к электропитанию. Планка может вращаться относительно вертикальной и горизонтальной осей на угол пути и угол возвышения соответственно. Но диапазон углов вращения планки относительно горизонтальной оси ограничен. Корпус вертолета может вращаться относительно продольной оси планки на угол тангажа в пределах ±90°. Два движителя, которые прикреплены к двум концам вертолета, состоят из пропеллеров и электрических двигателей, которыми можно управлять с помощью компьютера. Эти движители создают силы тяги, которые образовывают моменты относительно вышеперечисленных осей, благодаря чему происходит управление положением вертолета. На планку крепится подающий винт, вращение которого обеспечивается отдельным двигателем. На винте размещен груз, который можно двигать вдоль планки с помощью команд оператора, смещая его на расстояние 0...0,3 м. С помощью движения груза можно имитировать внешние возмущения, которые действуют на систему, а также изменение динамических характеристик системы.



Внешний вид стенда «Вертолет»

Уравнения динамики стенда. Рассмотрим уравнения системы, описывающие динамику пространственного движения вертолета [3]:

$$\ddot{\theta} = -a_{1\theta}\dot{\theta} - a_{0\theta}\sin\theta + b_{\theta}\cos\varepsilon \cdot u, \quad (1)$$

$$\ddot{\varepsilon} = -a_{1\varepsilon}\dot{\varepsilon} - a_{0\varepsilon}\sin\varepsilon + b_{\varepsilon}\cos\theta \cdot \nu, \quad (2)$$

Научный руководитель к.ф.-м.н. Плотников С.А.

$$\ddot{\lambda} = -a_{1\lambda}\dot{\lambda} + b_{\lambda}\cos\theta \cdot \nu, \tag{3}$$

где θ – угол тангажа; ε – угол возвышения; λ – угол пути; ν, u – управляющие воздействия; $\alpha_{0\theta}$, $\alpha_{0\varepsilon}$ – известные положительные параметры модели; $\alpha_{1\theta}$, $\alpha_{1\varepsilon}$, $\alpha_{1\lambda}$, b_{θ}, b_{ε} и b_{λ} – неизвестные положительные параметры модели. Параметры модели зависят от конструктивных особенностей стенда.

Синтез алгоритма управления. Обратим внимание, что при нулевом управлении $u = 0$, $\nu = 0$ подсистем (1) и (2) являются независимыми и описывают движение физического маятника с трением. Рассмотрим полную энергию этих подсистем при отсутствии управления. Ее можно представить в виде суммы кинетической V_{iK} и потенциальной $V_{iП}$ энергий:

$$V_{\theta} = V_{\theta K} + V_{\theta П} = \frac{\dot{\theta}^2}{2} + a_{0\theta}(1-\cos\theta), \tag{4}$$

$$V_{\varepsilon} = V_{\varepsilon K} + V_{\varepsilon П} = \frac{\dot{\varepsilon}^2}{2} + a_{0\varepsilon}(1-\cos\varepsilon), \tag{5}$$

где V_{θ} и V_{ε} – полная энергия подсистем (1) и (2) соответственно.

Зададим желаемые уровни энергии для каждой подсистемы: V_{θ}^{*} – желаемый уровень энергии для подсистемы (1), V_{ε}^{*} – желаемый уровень энергии для подсистемы (2). Введем следующую целевую функцию:

$$Q = \frac{1}{2}(V_{\theta} - V_{\theta}^{*})^2 + \frac{1}{2}(V_{\varepsilon} - V_{\varepsilon}^{*})^2. \tag{6}$$

В соответствии с методом скоростного градиента сигнал управления должен меняться в направлении антиградиента производной по времени функции (6).

Используя метод скоростного градиента, получим следующие законы управления для каждой подсистемы:

$$u = -\gamma_{\theta 1}\dot{\theta}(V_{\theta} - V_{\theta}^{*}) + \frac{\hat{a}_{1\theta}\dot{\theta}}{\cos\varepsilon}, \tag{7}$$

$$\dot{\hat{a}}_{1\theta} = \gamma_{\theta 2}(V_{\theta} - V_{\theta}^{*})\dot{\theta}^2, \tag{8}$$

$$\nu = -\gamma_{\varepsilon 1}\dot{\theta}(V_{\varepsilon} - V_{\varepsilon}^{*}) + \frac{\hat{a}_{1\varepsilon}\dot{\varepsilon}}{\cos\theta}, \tag{9}$$

$$\dot{\hat{a}}_{1\varepsilon} = \gamma_{\varepsilon 2}(V_{\varepsilon} - V_{\varepsilon}^{*})\dot{\varepsilon}^2, \tag{10}$$

где $\gamma_{\theta 1}$, $\gamma_{\varepsilon 1}$, $\gamma_{\theta 2}$, $\gamma_{\varepsilon 2}$ – положительные коэффициенты усиления, $\hat{a}_{1\theta}$, $\hat{a}_{1\varepsilon}$ – настраиваемые параметры. Настройка параметров $\hat{a}_{1\theta}$ и $\hat{a}_{1\varepsilon}$ производится для компенсации членов $(-a_{1\theta}\dot{\theta})$ и $(-a_{1\varepsilon}\dot{\varepsilon})$ в уравнениях (1) и (2) соответственно для достижения более точных результатов.

Так как для подсистемы (3) инвариант по времени (аналог полной энергии) может равняться нулю не только для нулевого состояния, то для управления динамикой угла пути целесообразно использовать другие адаптивные алгоритмы управления. Так как управление ν входит уравнения (2) и (3), а цели управления для них различаются, то данная задача может быть решена с помощью переключений двух алгоритмов через некоторые промежутки времени. Выбор моментов переключений проводится экспериментальным путем.

С помощью выбора коэффициентов усиления в алгоритме управления (7), (9) можно сделать управляющее воздействие достаточно малым.

Заключение. Предложен алгоритм управления энергией модели мехатронного стенда «Вертолет», разработанный на основе алгоритма скоростного градиента. Особенностью предложенного алгоритма является малость управляющего воздействия, что позволяет решить задачу сбережения энергии. Результаты моделирование работы алгоритма в пакете прикладных программ MATLAB подтверждают его эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фрадков А. Л.** Схема скоростного градиента и ее применение в задачах адаптивного управления. *Автоматика и телемеханика.* 1979. № 9. С. 90–101.
2. **Фрадков А. Л.** Кибернетическая физика: Принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003. С. 208.
3. **Peaucelle D.** Robust Simple Adaptive Control with Relaxed Passivity and PID Control of a Helicopter Benchmark. *IFAC Proceedings Volumes* 2011. Vol. 44, No. 1 P. 2315–2320.

A.A. Plotnikov *(*St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg). **Adaptive control of energy for Helicopter benchmark**

Abstract. This paper considers the problem of controlling the energy for the mathematical model of the mechatronic Helicopter benchmark with several unknown parameters. To solve this problem, energy functionals are introduced, and an adaptive control algorithm is designed based on the speed gradient method. The simulation results in the MATLAB environment confirm the effectiveness of the proposed algorithm.

УДК 681.5

П.Д. БЕЛЬКОВ, А.В. ЗЫКОВ
(ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва, Королёв)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО КОРАБЛЯ ВО ВРЕМЯ РАБОТЫ КОРРЕКТИРУЮЩИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Разработан алгоритм стабилизации космического корабля, использующий повороты камер маршевых двигателей большой тяги. Представлены математические модели: системы рулевая машина – маршевый двигатель и движения корабля как объекта управления с учетом упругости.

Введение. Одним из обязательных требований, предъявляемых к космическим аппаратам (КА), является проведение коррекции орбиты. Одной из новых задач, решаемых при разработке режима коррекции орбиты, является управление его комбинированной двигательной установкой, в состав которой входят корректирующие двигатели (маршевые двигатели, МД) большой тяги (более 2000 кгс). Для управления угловым положением камер МД используются рулевые машины (РМ), входящие в состав МД базового блока КА.

Доклад посвящен созданию алгоритма стабилизации КА во время проведения коррекции орбиты путем поворота МД.

Описание алгоритма. В состав каждого привода входит рулевая машина с двумя электродвигателями, совместно вращающими через общий редуктор её выходной вал. Вращение от вала РМ к камере МД передается с помощью тяги рычажного механизма.

Отрицательная обратная связь привода осуществляется с помощью передачи информации об угле поворота камеры МД, поступающей с дискретного датчика угла в блок управления бортовым комплексом, где суммируется с командным сигналом, вырабатываемым автоматом стабилизации системы управления движением и навигации [1]. Полученный сигнал ошибки после широтно-импульсной модуляции управляет временем включения и продолжительностью работы электродвигателей [2]. В итоге по командам автомата стабилизации камера МД поворачивается на требуемый угол.

Результаты моделирования системы РМ-МД с предложенным алгоритмом представлены на рис. 1. Из графиков видно, что камера МД поворачивается на требуемый угол по командам автомата стабилизации. Для подтверждения правильности выбора параметров системы РМ-МД и алгоритма управления разработана математическая модель движения КА с учетом колебаний жидкого наполнения баков и упругости конструкции. Модель представлена в виде системы дифференциальных уравнений, используемых в составе программного комплекса. Форма полученной системы дифференциальных уравнений движения КА относится к классу уравнений, описывающих движение механических систем с инерционными связями подсистем и содержащих в правых частях члены со вторыми производными обобщенных координат по времени.

Практическая применимость такой формы представления уравнений движения подтверждается при интеграции полученной системы уравнений, дополненной следующими подсистемами:

- системами уравнений приводов поворота камер МД с учетом упругости конструкции рычажных механизмов, передающих вращение от выходных валов рулевых машин к камерам МД;
- системами уравнений, моделирующими измерения угловых скоростей движения КА датчиками ГИВУС и формирующими управляющие команды работы приводов МД и включения двигателей причаливания и ориентации для стабилизации движения корабля по крену.

Заключение. В работе кратко описан алгоритм стабилизации космического корабля, использующий повороты камер маршевых двигателей большой тяги. Для проверки разработанного алгоритма создана математическая модель движения КА в виде системы дифференциальных уравнений. Приведенные результаты математического моделирования подтверждают правильность выбора параметров системы. Разработанный алгоритм может быть использован при построении системы стабилизации перспективных космический аппаратов.

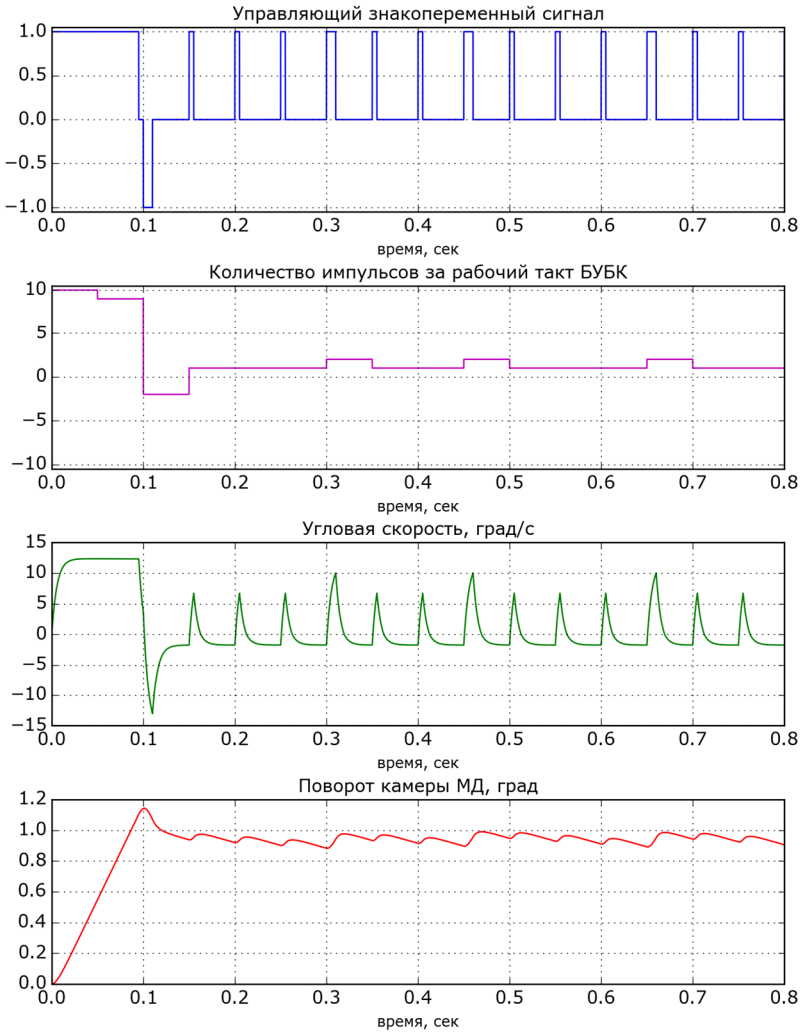


Рис.1. Результаты моделирования системы РМ-МД с использованием предложенного алгоритма стабилизации. (Требуемый угол поворота камеры МД 1°)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абгарян К.А., Рапопорт И.М.** Динамика ракет. М.: Машиностроение, 1969.
2. **Разыграев А.П.** Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей. М.: Машиностроение, 1977.

P.D. Belkov (Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region), **A.V. Zykov** (S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia», Korolev, Moscow region). **Development of the spacecraft stabilization algorithm during orbit correction**

Abstract. The algorithm for stabilization of the spacecraft has been developed with the help of turns of the chambers of the propulsion engines of high thrust. Mathematical models of the control power unit – the main engine system and the movement of the spacecraft as a control object with respect to elasticity are presented.

УДК 629.13.053

Н.С. БОНДАРЕВ, И.В. СЕМЁНОВ, Д.В.АНТОНОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

СИСТЕМА ГИРОСКОПИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОГО ЛУЧА ПРИБОРА УКАЗАТЕЛЯ ГЛИССАДЫ

Анализируется работа редукторной системы гиростабилизации оси оптической глиссады при посадке вертолёта на палубу корабля. Объект управления представляет собой двухмассовую систему с нежёсткой связью и нелинейностью в виде мёртвой зоны люфта. Предложено использование модального регулятора в паре с наблюдателем, показано, что такая система управления обеспечивает требуемую точность стабилизации в условиях малой жёсткости и наличия люфта.

Введение. Известно, что посадка летательного аппарата является наиболее сложным и ответственным этапом пилотирования. Эта задача усложняется при посадке летательного аппарата на палубу корабля, находящегося в условиях качки. В этом случае часто используются оптические системы посадки, создающие световой поток, обозначающий положение линии визирования относительно глиссады – траектории посадки летательного аппарата. В условиях угловой и линейной качки корабля возникает необходимость пространственной стабилизации оптического луча глиссады для обеспечения безопасности посадки.

Одним из примеров такой системы является система посадки вертолёта, разрабатываемая в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» отличительной особенностью которой является использование редукторного электропривода, исходя из требований уменьшения массы и габаритов прибора, а также снижения себестоимости по сравнению с безредукторным исполнением [1, 2]. Однако известно, что для прецизионных и быстродействующих редукторных приводов усложняется задача проектирования системы управления, если частота собственных упругих колебаний механизма оказывается сравнима с частотой, определяющей быстродействие автоматизированной системы управления электроприводом [3]. Более того, для прецизионных систем необходимо учитывать наличие люфта в редукторе и осуществлять управление нелинейной системой.

На практике в таких системах традиционно применяют ПИД-регуляторы, ограничивающие точность и быстродействие двухмассовой системы, а в условиях низкой жёсткости редуктора система обладает высокой колебательностью и малым запасом устойчивости [3].

Доклад посвящен синтезу системы управления двухмассовым нелинейным электромеханическим объектом с использованием модального регулятора в рамках задачи стабилизации при заданных параметрах качки и возмущающих воздействий.

Синтез системы управления. Рассматривается линеаризованная модель объекта управления. Без учета люфта объект представляет собой две массы, связанные упругой пружиной, причем движение первой массы осуществляется через момент двигателя, а второй – через момент упругой связи. При наличии качки двигатель должен парировать момент упругой связи, трение и момент обкатки редуктора [3, 4].

Модель представлена системой уравнений четвёртого порядка. Вектор состояния модели включает: угол положения блока, излучающего оптическую глиссаду, относительно горизонта, скорость изменения этого угла, момент упругой связи и приведенную скорость ротора двигателя в качестве первой массы в инерциальном пространстве.

Синтез внутренней модели. При синтезе регулятора рассмотрены возможности использования изодромного управления и принципа внутренней модели [5]. Так как возмущающие моменты связаны с наличием сухого трения и качки палубы судна, в которой можно выделить основную гармонику, для парирования внешнего воздействия конечной размерности, структура которого известна, в структуру объекта управления встраивается динамическая модель источника внешнего воздействия. В структуру объекта встроена внутренняя динамическая модель гармонического колебания с частотой, соответствующей предполагаемой частоте качки, и мо-

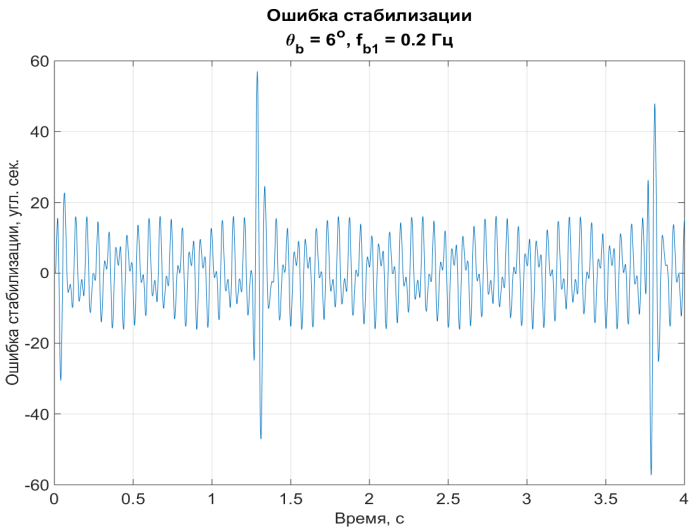
дель постоянного сигнала, представляющего собой момент сухого трения. Вектор переменных состояния системы дополнен тремя переменными, необходимыми для реализации структур внешних воздействий (качки и сухого трения), в результате чего порядок системы был повышен до седьмого.

Синтез модального регулятора. Использование модального регулятора состояния позволяет обеспечить точность стабилизации на уровне одной угловой минуты, при этом погрешность стабилизации снижается в три раза по сравнению с системой, использующей ПИД-регулятор. Следует отметить, что ПИД-регулятор учитывает только выходную переменную положения оптического луча глиссады, в то время как модальный регулятор использует внутренние переменные состояния системы, характеризующие динамику объекта в любой момент времени. Для полученной модели седьмого порядка синтезирован модальный регулятор с размещением полюсов системы в соответствии с распределением Баттерворта. Полоса пропускания фильтра была выбрана равной частоте собственных колебаний двухмассовой системы [6].

Синтез наблюдателя состояния. Для реализации обратных связей по переменным состояния был синтезирован наблюдатель состояния полной размерности при помощи настройки дуальной системы [5]. Коэффициенты матрицы наблюдателя были выбраны также в соответствии с фильтром Баттерворта, быстродействие которого на порядок выше быстродействия самой системы.

Исследование работы системы управления при заданных возмущающих воздействиях. Результаты моделирования в MatLAB/Simulink показали, что при качке, представленной синусоидой, частота которой в точности совпадает с частотой внутренней модели, ошибка стабилизации асимптотически приближается к нулю. При изменении частоты основной гармоники качки в пределах одного порядка, ошибка стабилизации от качки представляет собой синусоиду, амплитуда которой составляет единицы угловых секунд, что свидетельствует о качественной работе системы управления с внутренней моделью. Внутренняя модель постоянного воздействия соответствует астатизму системы по моменту, поэтому установившаяся ошибка от момента трения равна нулю.

Для реалистичной оценки работы прибора в модель был введён люфт редуктора, равный одной угловой минуте. При этом в системе возникают устойчивые автоколебания с амплитудой, не превышающей размер самого люфта. Ошибка стабилизации в этом случае не превышает величину, менее одной угловой минуты (см. рисунок).



Результаты моделирования двухмассовой редукторной системы стабилизации на качке

Заключение. Для решения задачи стабилизации оптического луча прибора указателя глиссады предложена система управления двухмассовым нелинейным электромеханическим объектом с использованием модального регулятора. С использованием методов математического моделирования исследована работоспособность предложенного алгоритма управления с внутрен-

ней моделью внешнего воздействия для линейной и нелинейной моделей исходной системы. Выработаны практические рекомендации по проектированию системы стабилизации, которые позволяют повысить точность системы по сравнению с традиционными ПИД-регуляторами, обеспечивающими устойчивую работу системы только в условиях большей жёсткости редуктора и обладающими худшими показателями качества работы системы. Показано, что система управления с модальным регулятором, наблюдателем и внутренней моделью внешнего воздействия даже с учётом малой жёсткости редуктора и нелинейности в виде люфта обеспечивает высокую точность стабилизации с динамической ошибкой, не превышающей 1 угл. мин.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Антонов Д.В., Гутнер И.Е., Зворыкин Е.Н., Молочников А.А., Семенов И.В.** Перспективная система гиростабилизации оптической глиссады для посадки самолета на авианосец // 9-я Российская мультиконференция по проблемам управления. Материалы XXX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб, 2016. С. 221–228.
2. **Антонов Д.В.** Использование режима точечной гиростабилизации оптической глиссады для повышения безопасности посадки вертолета на корабль // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб. 2018.
3. **Бессекерский В.А., Фабрикант Е.А.** Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. Л.: Судостроение. 1968. 351с.
4. **Linzhouting Chen, Quanqu Mu,** A Novel Disturbance Estimation and Compensation Approach Applied to Three-axis Inertially Stabilized Platform, School of Aerospace Engineering, Guizhou Institute of Technology, 2018.
5. **Мирошник И. В.** Теория автоматического управления. Линейные системы. СПб.: Питер, 2005. 336 с.
6. **Seppo E. Saarakkala, Marko Kinkkanen,** State-Space Speed Control of Two-Mass Mechanical Systems: Analytical Tuning and Experimental Evaluation, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 50, no. 5, September/October 2014.

N.S. Bondarev, I.V. Semyonov, D.V.Antonov (Concern CSRI "Elektropribor" JSC, Saint Petersburg). **Glissade line of sight gyroscopic stabilization system**

Abstract. The work of the gyroscopic stabilization system of an optical glide path for the aircraft landing on a ship is analyzed. This paper presents an analytical model of the gearbox two-mass system with backlash. The system is controlled using a linear observer, a linear state-space controller, which is tuned via a linearized model, and an internal model, defining external destabilizing torques.

▪ НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ В РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ▪

УДК 519.71

М.С. НИКОЛАЕВ
(Санкт-Петербургский государственный университет)

НЕГРАДИЕНТНЫЙ АЛГОРИТМ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА ДЛЯ ПОИСКА И ОТСЛЕЖИВАНИЯ ИЗОЛИНИИ СКАЛЯРНОГО ПОЛЯ

Предложен и проанализирован новый алгоритм автономной навигации мобильного робота для поиска и отслеживания изолинии неизвестного скалярного поля в неизвестной среде с препятствиями. Алгоритм не использует оценки градиента поля и не требователен к вычислительным ресурсам. Глобальная сходимость алгоритма обоснована теоретически и продемонстрирована с помощью компьютерного моделирования.

Введение. Обнаружение и мониторинг границ экологических зон с помощью робототехнических платформ привлекают нарастающее внимание в течение последних двух десятилетий [1–8]. Типичная задача состоит в том, чтобы автономно достичь априори неизвестной кривой, где некоторое скалярное поле принимает определенное пороговое значение, а затем перемещаться по этой кривой. Это приводит к визуализации кривой и контролю над периметром области с экстремальными значениями поля. Примеры включают в себя отслеживание пятна разлива нефти, химического или биологического заражения [1, 2], разведку радиоактивно загрязненных территорий, отслеживание лесных пожаров [3], зон турбулентности и т. д. В подобных миссиях робот часто не имеет априорных данных о поле, не измеряет его градиент и имеет доступ только к значению поля в текущем местоположении за счет непосредственного контакта датчика с измеряемой субстанцией, как, например, в случае измерения концентрации загрязнителя или уровня радиации.

Среди методов автономной навигации роботов, предназначенных для решения подобных задач, важный класс образуют *неградиентные алгоритмы*. Они не опираются на оценки градиента поля, приобретая за счет этого ряд преимуществ (пониженную чувствительность к погрешностям измерений, возможность эффективного распределения и перемещения роботов с датчиками и др.). Вместе с тем литература, посвященная алгоритмам решения рассматриваемых задач, до сих пор игнорировала распространенное на практике наличие препятствий в рабочей зоне. Данная работа нацелена на преодоление указанного дефицита в рамках «неградиентной» парадигмы управления.

Постановка задачи. Робот движется на плоскости с постоянной скоростью $v > 0$ и управляется угловой скоростью поворота u, модуль которой ограничен константой $\bar{u} < \infty$. Имеются неизвестное скалярное поле $F(r), r \in \mathrm{R}^2$ и непреодолимые препятствия $O_1(t),\ldots,O_N(t) \subset R^2$, возможно, лабиринтоподобные. Робот должен достичь изолинии $I(f_0) = \{r : F(r) = f_0\}$ с данным значением f_0 из случайного начального местоположения и затем отслеживать свободную от препятствий ее часть, обходя каждое встретившееся препятствие O_i вдоль ее границы ∂O_i с последующим возвращением на $I(f_0)$ «с другой стороны» O_i. Сенсорные данные, принимаемые безошибочными, включают в себя только значение поля $f(t) := D(r)$ в текущем местоположении $r = r(t)$ робота и расстояние от него до препятствий $d(t) := \min\limits_{i=1,\ldots,N} dist(r(t), O_i(t))$. Робот также может оценивать производные по времени $\dot{f}, \dot{d}$, например, методами численного дифференцирования. В работе предложено математически строгое, формализованное описание цели управления.

Научный руководитель д.ф.-м.н., проф. Матвеев А.С.

Алгоритм управления имеет два режима: R_S – поиск изолинии, R_T – ее отслеживание, и четыре состояния: I – движение к/по изолинии, D – обход препятствия, T – тест на конец обхода, M – посредник между I и D. Робот начинает в режиме R_S и состоянии I и переключается $R_S \to R_T$, как только $f = f_0$. Переключение состояний обсуждается далее.

Параметры алгоритма (1–4) и его внутренние переменные (5–7):

1) $\delta = \pm 1$ – направление обхода изолинии (против/по часовой стрелке);

2) $d_O > 0$ – расстояние до препятствия, на котором начинается его обход;

3) $\chi_f(f), \chi_d(d)$ – вещественные функции поля и расстояния до препятствий соответственно; $\chi_f(0) = \chi_d(0) = 0$;

4) $\mu, \eta > 0$ – параметры масштабирования этих функций;

5) d_D – желаемое расстояние до препятствия при его обходе;

6) δ_D – направление поворота при переходе в состояние D;

7) f_D – значение поля в момент этого перехода.

В каждом из состояний управление определяется следующим образом:

$$u = \delta \bar{u} \operatorname{sgn} S_f, \quad S_f := \dot{f}(t) + \mu v \chi_f(f - f_0) \text{ в состоянии } I, \tag{1}$$

$$u = \delta_D \bar{u} \operatorname{sgn} S_d, \quad S_d := \dot{d}(t) + \eta v \chi_d(d - d_D) \text{ в состоянии } D, \tag{2}$$

$$u = -\delta_D \bar{u} \text{ в состояниях } T, M. \tag{3}$$

Переменные δ_D, d_D и f_D формируются так:

$d_D = d$ при каждом переходе в D или T; $f_D = f$ при каждом переходе в D;

$\delta_D = \delta \operatorname{sgn}(f_0 - f)$ в режиме R_S, а в режиме R_T δ_D выбирается случайно из ± 1 при каждом переходе в M.

Переходы между состояниями:

a) $I \to M$, когда d уменьшается до d_0;

b) $M \to D$, когда $\dot{d}$ достигает нуля снизу;

c) $D \to I$, когда $f = f_0$ и перед этим было выполнено $\delta_D = \delta \operatorname{sgn}(f - f_0)$;

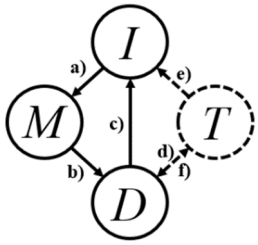


Рис.1. Диаграмма переходов между состояниями. Пунктиром выделены переходы и состояния, которые возможны только в режиме R_S

Только в режиме $\boldsymbol{R_S}$:

d) $D \to T$, если $\dot{f} \operatorname{sgn}(f_0 - f)$ достигает нуля сверху и одновременно $(f - f_D)(f_0 - f_D) \geq 0$;

e) $T \to I$, если $S_f = 0$ и выполнено (4);

f) $T \to D$, если $d \leq d_D$ не в начале T.

Выработаны рекомендации по настройке алгоритма и доказана его глобальная сходимость при их выполнении. Показано, что им можно удовлетворить в условиях, близких к необходимым для реализуемости миссии.

Компьютерное моделирование. На изображениях изолиния и контуры препятствий обозначены черным и синим цветами соответственно. Последняя часть пути робота обозначена красной кривой, предшествующая часть удалена. Параметры модели: $v = 1$ м/с; $\bar{u} = 10$ рад/с; $\mu = \eta = 0.3$; $\chi_f(z) = \chi_d(z) = \arctan z$; $d_O = 0.3$ м; $\delta = 1$ шаг дискретизации $\tau = 0.01$ с. Скалярное поле $F(r) = 1 - \dfrac{\rho}{2 + 0.5\cos\psi}$, где (ρ, ψ) – полярные координаты точки r, $f_0 = 0$

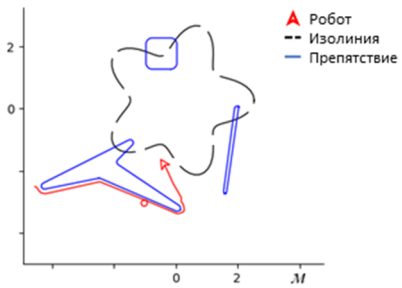


Рис.2 *а*. Робот обходит препятствие, двигаясь к изолинии. В пути робот выполнил оборот для теста *T*.

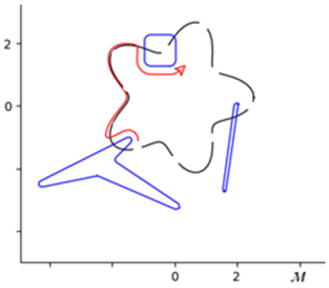


Рис.2 *б*. Робот достиг изолинии и отслеживает ее, обходя препятствия.

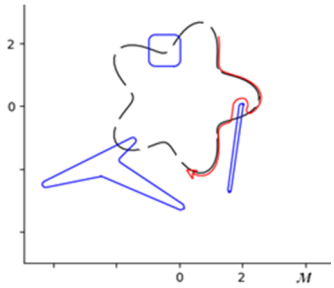


Рис.2 *в*. Робот завершает полный оборот по свободной части изолинии.

В процессе моделирования робот безопасно добрался до изолинии, после чего продолжил ее отслеживать, огибая встречающиеся препятствия, таким образом достигнув цели управления.

Заключение. Предложен алгоритм автономной навигации мобильного робота с целью поиска и отслеживания изолинии скалярного поля на сцене с препятствиями. Работоспособность алгоритма продемонстрирована теоретически и подтверждена компьютерным моделированием.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Clark J. and Fierro R.**, “Mobile robotic sensors for perimeter detectionand tracking,” Int. Society of Autom. Trans., vol. 46, pp. 3 – 13, 2007.
2. **White B. A., Tsourdos A., Ashokoraj I., Subchan S., and Zbikowski R.**, “Contaminant cloud boundary monitoring using UAV sensor swarms,”// Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, San Francisco, CA, August 2005.
3. **Casbeer D., Kingston D., Beard R., McLain T. W., Li S., and Mehra R.**, “Cooperative forest fire surveillance using a team of small unmanned air vehicles,” Int. J. of Syst. Scien., vol. 36, no. 6, pp. 351–360, 2006.
4. **Matveev A. and Semakova A.**, “Gradient-free navigation of a nonholonomic robot for tracking unsteady environmental boundaries in 3D,”// Proceedings of the 22nd International Conference on System Theory, Control and Computing, Sinaia, Romania, October 2018, pp. 670–676.
5. **Matveev A., Savkin A., Hoy M., and Wang C.**, Safe Robot Navigation Among Moving and Steady Obstacles. Oxford, UK: Elsevier, 2016.
6. **Krzyszton M. and Niewiadomska-Szynkiewicz E.**, “Heavy gas cloud boundary estimation and tracking using mobile sensors,” Journal of Telecom. and Information Technology, vol. 3, pp. 38–49, 2016.
7. **Sun T., Li L., and He Y.**, “Nonlinear boundary tracking control for mobile robot,” // Proceedings of the 31st Chineese Control Conference, Hefei, China, July 2012, pp. 4792–4797.
8. **Ovchinnikov K., Semakova A., and Matveev A.**, “Cooperative surveillance of unknown environmental boundaries by multiple nonholonomic robots,” Robotics and Autonomous Systems, vol. 72, pp. 164–180, 2015.

M.S. Nikolaev (St. Petersburg State University). **Gradient-free algorithm for autonomous navigation of mobile robots for searching and tracking the isoline of a scalar field.**

Abstract. A new algorithm for navigation of a robot for searching and tracking the isoline of an unknown scalar field in an unknown maze-like environment is proposed and justified. The algorithm does not use estimation of the field gradient and is non-demanding with respect to both computation and motion. Global convergence of the algorithm is rigorously justified and confirmed via computer simulations.

УДК 621.865.8

Е.С. СКОСАРЕВ, С.А. КОЛЮБИН
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО ПОЗИЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ С ГИБКИМ ЗВЕНОМ

В работе для управления роботом с гибким звеном используется алгоритм управления по энергетической функции с прямой и обратной связями. Исследуется, как переключения управляющих воздействий влияют на деформацию звена, и предлагается модифицированная схема переключений для минимизации остаточных колебаний

Введение. На производстве существует тенденция к уменьшению массы промышленных роботов для увеличения скорости при движении и большей нагрузочной способности, что напрямую отражается в снижении потребления энергии и увеличении производительности [1]. Однако у таких роботов звенья имеют меньшую жесткость, являются гибкими из-за их протяженной и тонкой конструкции и подвержены нежелательным деформациям. Если манипуляторы с гибкими звеньями могут подавлять колебания, они способны достигать той же точности, что и обычные промышленные роботы.

Для управления роботами такого типа используются различные регуляторы, где основное внимание уделяется подавлению нежелательных колебаний, однако при использовании роботов с гибкими звеньями для работы в неструктурированных средах, например физически взаимодействующих с человеком и окружающими объектами, целесообразно использовать регуляторы, учитывающие затраты энергии. Такие регуляторы обеспечивают пассивность системы, которая для этих случаев является важным свойством и обычно рассматривается как ключевой фактор. Пассивность – это просто энергетическая мера устойчивости физической системы [2, 3, 5]. Если приводы пассивные (вводимая приводом энергия в систему имеет ограниченное значение), тогда и вся система будет тоже пассивной. Эта идея была разработана в рамках концепции встроенного энергоэффективного привода (Embedded Energy-Aware Actuator) (E2A2) по созданию интеллектуальных приводов [4]. В данной концепции вводится в рассмотрение энергетический бюджет, в зависимости от которого выбирается соответствующий алгоритм управления.

Для применения указанной концепции к роботам с гибкими звеньями существует необходимость в дополнительных исследованиях для того, чтобы уменьшить влияние резких скачков управляющего воздействия из-за особенностей алгоритма управления. Цель работы: применить концепцию управления по энергетической функции, учитывающей затраты энергии, для управления роботом с гибким звеном, исследовать её влияние на деформации звена при перемещении, а также модифицировать схему переключения управляющих воздействий для устранения скачка в управляющем воздействии с целью уменьшения остаточных колебаний гибкого звена.

Описание энергоэффективного привода. Идея управления приводами на основе энергетической функции заключается в том, что на уровне встроенных вычислений контролируется и регулируется количество кинетической энергии, которое приводы вводят в систему. Таким образом, контролируя уровень энергии, можно повысить безопасность при физическом взаимодействии человека и робота.

Для оценки энергии в момент времени t_i используется следующее соотношение:

$$\hat{\mathrm{E}}_{\mathrm{i}} = \hat{\mathrm{E}}_{\mathrm{i-1}} + \tau_{\mathrm{i-1}} \cdot \left(\theta_{\mathrm{i}} - \theta_{\mathrm{i-1}}\right) = \hat{\mathrm{E}}_{\mathrm{i-1}} + \tau_{\mathrm{i-1}} \cdot \Delta\theta_{\mathrm{i}}, \qquad (1)$$

где τ_{i-1} – крутящий момент (управляющая сила), θ_i – угол поворота звена.

Чтобы обеспечить пассивность привода (ключевое свойство для обеспечения устойчивости системы), доступная энергия, которую может использовать привод, должна быть ограничена. Это приводит к ограниченному энергетическому бюджету, из которого будет извлекаться энергия. Назначив начальную энергию приводу, далее можно отслеживать уровень энергии в бюджете. Когда привод выполняет положительную работу, энергия подается роботу, и эта энергия должна быть изъята из бюджета E. Тем самым доступная энергия уменьшается. Поэтому когда

бюджет исчерпан, то есть $\Delta\widehat{E}=0$, для того, чтобы пассивность сохранялась, выходная мощность привода должна быть установлена в ноль. После этого энергия не используется, а это означает, что пассивность гарантирована. Если привод извлекает энергию из робота, то есть выполняется отрицательная работа, эта энергия пополняет бюджет, поскольку введенная энергия $\tau_{i-1}\cdot\Delta\theta_i$ отрицательна.

Алгоритм управления по энергетической функции имеет следующий вид:

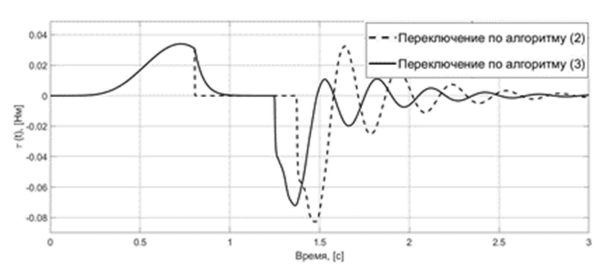
$$\tau_{\mathrm{i}}^{\mathrm{act}}=\begin{cases}\tau_i^{cntr}: \quad \Delta\widehat{E}>0\ , \\ 0: \quad \tau_i^{cntr}\cdot\hat{\dot{\theta}}_i^{c}\geq 0, \Delta\widehat{E}\leq 0, \\ \tau_i^{cntr}: \quad \tau_i^{cntr}\cdot\hat{\dot{\theta}}_i^{c}<0, \Delta\widehat{E}\leq 0,\end{cases} \tag{2}$$

где: τ_i^{act} – текущий крутящий момент, τ_i^{cntr} – спланированный крутящий момент, $\hat{\dot{\theta}}_i^{c}$ – текущая скорость звена, $\Delta\widehat{E}$ – разница между энергетическим бюджетом и текущим значением энергии.

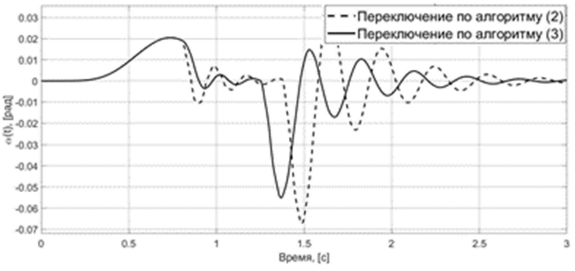
Результаты экспериментов. После проведения экспериментов по управлению роботом с гибким звеном с использованием алгоритма (2) было обнаружено, что во время движения возникают нежелательные деформации. Из рис. 1, *а* видно, что внезапное изменение момента приводит к сильному изменению угла деформации, показанному на рис. 1, *б* пунктирной линией. Поэтому с целью минимизации сильных деформаций были предприняты попытки модифицировать алгоритм управления. Предложено не устанавливать усилие привода на ноль, а экспоненциально уменьшать, когда бюджет истощается, что позволяет в конечном итоге минимизировать остаточные колебания звена за счёт некоторого перерасхода энергии, который при этом имеет строго ограниченное значение, что видно из рис. 1, *в,* и при этом следование за предписанной траекторией соблюдается, что отображено на рис. 1, *г* сплошной линией.

$$\tau_i^{act}=\begin{cases}\tau_i^{cntr}: \quad \Delta\widehat{E}>0, \\ \tau_{i-1}^{cntr}\cdot e^{-mt}: \quad \tau_i^{cntr}\cdot\hat{\dot{\theta}}_i^{c}\geq 0, \ \Delta\widehat{E}\leq 0, \\ \tau_i^{cntr}: \quad \tau_i^{cntr}\cdot\hat{\dot{\theta}}_i^{c}<0, \ \Delta\widehat{E}\leq 0,\end{cases} \tag{3}$$

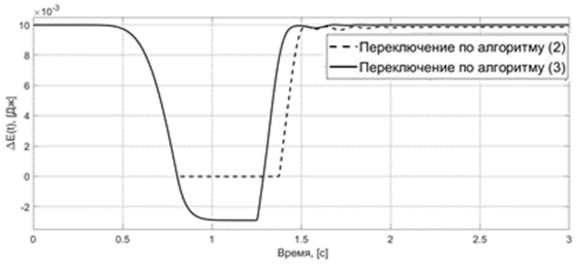
где m – константа.



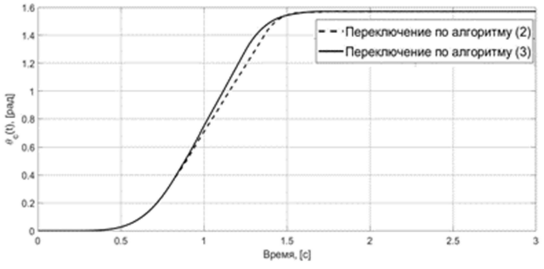
а) Крутящий момент τ_i^{act}



б) Угол деформации α



в) Остаток бюджета $\Delta\widehat{E}$



г) Угол поворота θ

Рис. 1. Результаты симуляции при добавлении слоя E2A2

Заключение. В работе для управления роботом с гибким звеном применён алгоритм управления по энергетической функции с прямой и обратной связями. Показано, что такой алгоритм в приложении к роботам с гибким звеном негативно влияет на деформацию звена из-за переключения управляющих воздействий и поэтому была предложена модифицированная схема переключений для минимизации остаточных колебаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Wang F. Y., Gao Y.** Advanced Studies of Flexible Robotic Manipulators: Modeling, Design, Control and Application: Series in Intelligent Control and Intelligent Automation // Word Scientific, New York, 2003, 456 p.
2. **Stramigioli, S., Secchi, C., van der Schaft, A.J., Fantuzzi, C**. Sampled Data Systems Passivity and Discrete Port-Hamiltonian Systems // IEEE transactions on robotics and automation, 21(4), 2005, pp. 574-587. DOI: 10.1109/TRO.2004.842330
3. **Stramigioli S.** "Energy-aware robotics," in Mathematical Control Theory I: Nonlinear and Hybrid Control Systems, ser. Lecture Notes in Control and Information Sciences // M. K. Camlibel, A. A. Julius, R. Pasumarthy, and J. M. Scherpen, Eds. Springer International Publishing, 2015, Vol. 461, pp. 37–50.
4. **Folkertsma G.A.**, **Groothuis S., Stramigioli S.,** Safety and Guaranteed Stability Through Embedded Energy-Aware Actuators // IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 2018, pp. 2902–2908
5. **Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Kolyubin S. A.** Simple output feedback adaptive control based on passification principle // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2014. Vol. 28. №. 7–8. pp. 620–632.

E.S. Skosarev, S.A. Kolyubin (ITMO University, Saint Petersburg). **Case Study on Energy-Aware Position Control for Flexible Link Manipulators**

Abstract. In this study algorithm based on energy function for controlling the robot with flexible link with feedback and feedforward controller is used. Effect of control switchings on the deformation of a link has studied and a modified switching scheme to minimize residual oscillations has proposed.

УДК 681.51

О.Б. ШАГНИЕВ, С.Ф. БУРДАКОВ
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Институт прикладной математики и механики)

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ С СИЛОМОМЕНТНЫМ ОЧУВСТВЛЕНИЕМ ПРИ КОНТАКТНЫХ ОПЕРАЦИЯХ

Рассмотрены задачи позиционно-силового управления роботом при контактных операциях в механообработке. Проведено математическое моделирование автоколебательных процессов, имеющих место в системе на «ползучих» скоростях и при резании. Разработаны контуры адаптации для борьбы с нежелательными автоколебаниями для различных режимов механообработки. Проанализированы соотношения параметров системы, влияющих на возникновение автоколебаний. Обоснована необходимость интеллектуализации контуров адаптации для снижения вероятности возникновения нежелательных эффектов в системе.

Введение. Роботизация производств позволяет существенно повысить социально-экономические показатели, включая производительность труда. В полной мере это касается производств, связанных с механообработкой, сборкой и т. д. Особенность этих процессов заключается в необходимости учёта контактных взаимодействий. Для эффективного решения задач управления силовым взаимодействием роботы оснащают силомоментными датчиками, позволяющими получить необходимую информацию о процессах в области контакта [1, 2]. Однако опыт применения подобных систем показывает, что, несмотря на очувствление, в ряде случаев необходимо вмешательство оператора. Для его исключения помимо силомоментного очувствления требуется использование элементов искусственного интеллекта. В данной работе рассматриваются алгоритмы адаптации системы управления робота к возникновению автоколебательных процессов в системе «робот–инструмент–обрабатываемая поверхность».

Постановка задачи. Рассматривается упругая система «робот–инструмент–обрабатываемая поверхность». Система позиционного управления обеспечивает горизонтальное движение робота вдоль обрабатываемой поверхности. Для выполнения контактных операций предложен позиционно-силовой алгоритм управления на основе обратной связи по силе контактного взаимодействия [3]. Рассматривается класс задач, связанных с автоматизацией посредством очувствленных роботов процессов механообработки, таких как шлифование, точение, фрезерование и т. д. Большое многообразие и сложность физико-механических процессов в зоне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности делает необходимым внедрение контуров адаптации для алгоритмов управления робота по показателям вибрационного состояния системы «робот–инструмент–обрабатываемая поверхность». Таким образом, необходимо разработать контуры адаптации для позиционно-силового алгоритма управления, предназначенные для подавления характерных автоколебательных явлений, имеющих место при механообработке.

Подавление релаксационных автоколебаний. Показано, что при движении инструмента вдоль обрабатываемой поверхности с малой скоростью и заданным прижатием нелинейный характер силы трения в зоне контакта может приводить к возникновению релаксационных автоколебаний, которые выявляются благодаря силомоментному очувствлению робота. Для борьбы с ними на основе показаний датчика силы (F_s), пропущенных через фильтр высоких частот, разработан контур адаптации, выдающий сигналы на подачу импульсного воздействия (v_{ex}), которое сглаживает нежелательные автоколебания. После подавления релаксационных автоколебаний требуется коррекция скорости движения инструмента ($\dot{x}_s$) для исключения возможности их повторного возникновения. В связи с этим задание по скорости движения робота ($\dot{x}^d$) увеличивается на величину, приблизительно равную половине амплитуды импульсного воздействия, в результате чего исключается возможность возникновения движения с остановками в дальнейшем. Координата инструмента x_s возрастает в соответствии с заданием по скоро-

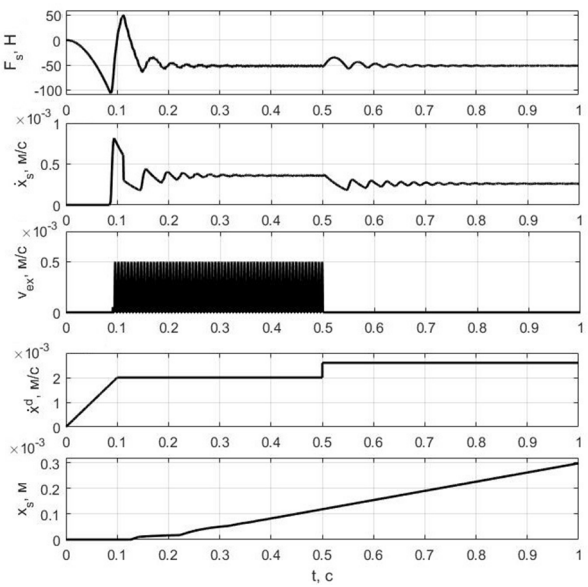


Рис.1. Процессы в системе при подавлении релаксационных автоколебаний

сти. Процессы в системе при возникновении и подавлении релаксационных автоколебаний представлены на рис. 1.

Подавление регенеративных автоколебаний. При решении задач точения и фрезерования используется математическая модель резания, предложенная в работах [4, 5]. Одним из главных препятствий, стоящих на пути повышения производительности процессов точения и фрезерования, является проблема автоколебаний. Нелинейный характер сил резания в зоне контакта, а также конечная жёсткость робота или станка приводят к формированию волнистой поверхности резания, которая на следующем проходе также срезается, что в свою очередь приводит к возникновению самоподдерживающихся вибраций. Эти так называемые регенеративные автоколебания могут приводить к ускоренному износу инструмента, ухудшению качества обработанной поверхности, а также к потере устойчивости системы «робот – инструмент – обрабатываемая поверхность».

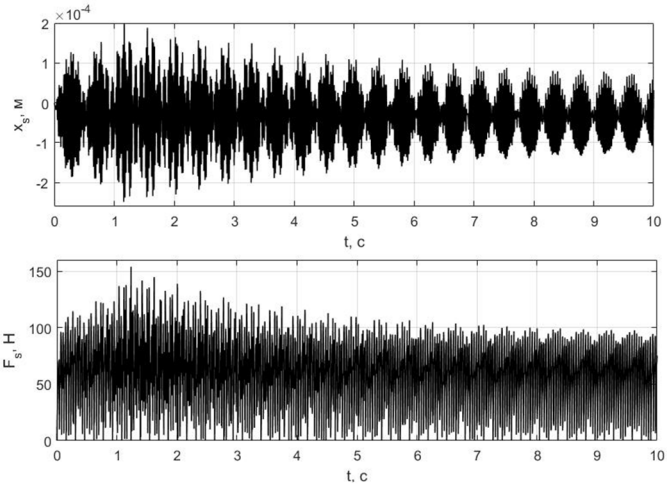


Рис.2. Процессы в системе при подавлении регенеративных автоколебаний

Аналитические подходы к определению границ устойчивости такой системы в пространстве параметров резания (подача, частота вращения инструмента, глубина и ширина резания) позволяют получать лишь качественную оценку [6]. Сложность и нелинейность процессов, протекающих в системе, обуславливают необходимость разработки адаптивных систем управления, способных сохранять устойчивость системы при влиянии на неё разнообразных факторов, которые не всегда удаётся учесть в математической модели. К таким факторам можно отнести износ инструмента, объёмное тепловыделение в зоне контакта, конечную жёсткость крепления заготовки, неоднородность материала заготовки и т. д. [7].

На основании показаний датчиков силы (F_s) рассчитываются показатели вибрационного состояния системы «робот–инструмент–обрабатываемая поверхность». Анализ амплитудных спектров сил в зоне контакта, полученных при помощи быстрого преобразования Фурье в режиме online, позволяет своевременно обнаруживать нарастание пика на частоте автоколебаний, близкой к собственной частоте системы. При обнаружении контуром адаптации начала возникновения автоколебаний происходит автоматическое уменьшение глубины резания на 1-2%. Введение подобного контура адаптации делает возможной механообработку вблизи границы устойчивости в пространстве параметров резания, что обеспе-

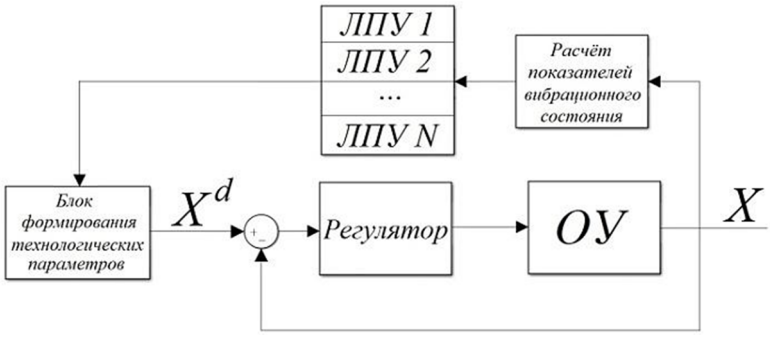


Рис.3. Структура адаптивной системы управления

чивает максимальную производительность. Процессы в системе в режиме подавления автоколебаний при резании приведены на рис. 2. Структура контуров адаптации представлена на рис. 3. Штатная система позиционного управления роботом (ОУ) охвачена дополнительной обратной связью по силе прижатия инструмента к поверхности. На выходе производится расчёт показателей вибрационного состояния, по которым в логических переключающих устройствах (ЛПУ) производится коррекция технологических параметров, которые поступают на вход системы позиционно-силового управления в качестве задания.

Дальнейшие исследования. Очевидно, что даже кратковременное возникновение автоколебательного процесса, которое приводит к срабатыванию контуров адаптации, нежелательно с точки зрения качества механообработки. В связи с этим целесообразна реализация контуров адаптации с помощью искусственной нейронной сети [8]. В отличие от ЛПУ нейронная сеть является средством накопления и использования для управления информации, полученной в результате экспериментов и пробных движений. Обучение нейронной сети с учителем по экспертным оценкам показателей механообработки может позволить обеспечить повышение качества механообработки.

Заключение. Разработаны контуры адаптации для алгоритмов позиционно-силового управления по показателям вибрационного состояния системы «робот–инструмент–обрабатываемая поверхность», позволяющие подавлять автоколебательные процессы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Iglesiasa I., Sebastiána M.A., Ares J.E.** Overview of the state of robotic machining: Current situation and future potential // Procedia Engineering. 2015. Vol. 132. P. 911–917.
2. **Chen Y., Dong F.** Robot machining: recent development and future research issues // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013. Vol. 66. P. 1489–1497.
3. **Бурдаков С.Ф., Шагниев О.Б.** Модели механики в задаче управления силовым взаимодействием робота с поверхностью неопределенного профиля // Научно-технические ведомости СПбПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2015. №4. С. 68–79.
4. **Altintas Y.** Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design. 2nd-ed. Cambridge University press, 2012. 382 p.
5. **Budak E.** Maximizing Chatter Free Material Removal Rate in Milling through Optimal Selection of Axial and Radial Depth of Cut Pairs// CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2005. Vol. 54, Iss. 1. P. 353–356.
6. **Воронов С.А., Непочатов А.В., Киселёв И.А.** Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежёстких деталей // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2011. № 1. С. 50–62.
7. **Chuangwen X., Jianming D., Yuzhen C., Huaiyuan L., Zhicheng S., Jing X.** The relationships between cutting parameters, tool wear, cutting force and vibration // Advances in Mechanical Engineering. 2018. Vol. 10(1). P. 1–14.
8. **Lamraoui1 M., Barakat M., Thomas M., El Badaoui M.** Chatter detection in milling machines by neural network classification and feature selection // Journal of Vibration and Control. 2015. Vol. 21(7). P. 1251–1266.

O.B. Shagniev, S.F. Burdakov (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University) **Robot Control Intellectualization with Force-Torque Sensing During Contract Operations**

Abstract. The problem of the robot position-force control during contact operations in mechanical processing is considered. Mathematical modeling of self-oscillations taking place in the system at «creeping» speeds and during cutting has been carried out. Adaptation contours have been developed to suppress unwanted auto-oscillations for various machining modes. The relations of the system parameters affecting the occurrence of self-oscillations are analyzed. The necessity of intellectualization of adaptation contours to reduce the likelihood of undesirable effects in the system is explained.

УДК 004.932.2, 004.932.72'1

И.С. ФОМИН, С.Р. ОРЛОВА, А.В. БАХШИЕВ
(Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики, Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ В ЗАДАЧЕ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Рассмотрена задача обнаружения визуальных ориентиров, которые могут использоваться для навигации автономного транспортного средства. В качестве средства обнаружения ориентиров исследуется нейросетевой алгоритм на основе сетей YOLO v2 и MobileNet, улучшенный для работы с прямоугольным входом сети. Проверено несколько вариантов архитектуры сетей. Полученные результаты показывают, что обученная система позволяет обнаруживать различные классы объектов с точностью mAP от 0,41 до 0,7.

Введение. На сегодняшний день одной из наиболее сложных и интересных задач является автономная навигация беспилотных транспортных средств с использованием различных сенсоров. Для нее предлагаются различные решения, большинство из которых используют либо двумерную навигацию на основе данных с однолучевых лидаров (это актуально для навигации в достаточно простых условиях, в помещении с малым числом препятствий), либо трехмерные, многолучевые лидары (самый известный – от фирмы Velodyne) для получения трехмерных карт окружающего пространства и последующей навигации в трехмерном пространстве. Другим подходом является использование более простых и дешевых сенсоров, таких как узкоугольные, широкоугольные и Fish-Eye камеры для обзора различных областей пространства, окружающего транспортное средство. Лазерные дальномеры часто используются для определения препятствий в областях перед автомобилем, позади автомобиля, определения положения поребрика и движения вдоль него. Для обнаружения объектов, представляющих опасность для движения транспортного средства (люди, автомобили, ямы, ограничители дорожных работ), и получения информации о дорожной обстановке (обнаружение дорожных знаков, считывание сигналов светофоров, определения положения в полосе и на дороге, обнаружение пешеходных переходов и т.п.) приходится анализировать данные более сложными алгоритмами.

В 2015–2016 годах в лаборатории технического зрения ЦНИИ РТК была разработана система, использующая информацию с широкоугольной (Fish-Eye) камеры и данные одометрии для того, чтобы осуществлять навигацию транспортного средства при прохождении поворота с использованием карты визуальных ориентиров. Предложены алгоритм определения положения на основе триангуляции [1] и алгоритм для определения положения на основе данных одометрии и азимутов на ориентиры [2], использующий фильтр Калмана для комплексирования информации.

Ключевой частью обоих алгоритмов является модуль обнаружения положения ориентиров на изображении. В работе предлагается применить нейросетевой метод обнаружения объектов YOLO v2 [3, 4] на платформе Keras [5] для поиска ориентиров. Предполагается, что набор ориентиров известен и для каждого собрано достаточно данных для обучения детектора.

Обучение и тестирование детектора объектов. В качестве средства для детектирования визуальных ориентиров используется версия системы YOLO v2, перенесенная на Keras с TensorFlow в качестве основы, так как эта версия лучше исходной для проведения экспериментов. Архитектура YOLO хорошо показала себя при обнаружении объектов в различных задачах, в том числе продемонстрировала высокое качество работы на соревнованиях ImageNet [3, 6]. В работе [7] показано, что на наборе данных MS COCO [8], содержащем 9000 классов, она не теряет ни в скорости работы, ни в качестве обнаружения и классификации.

Использованный набор данных. В качестве набора данных для обучения системы обнаружения использованы записи экспериментальных проездов на отладочном транспортном средстве с установленной фронтальной широкоугольной камерой. Обучающий набор данных содержит 7461 изображений, принадлежащих 15 классам. Искомые объекты представляют собой

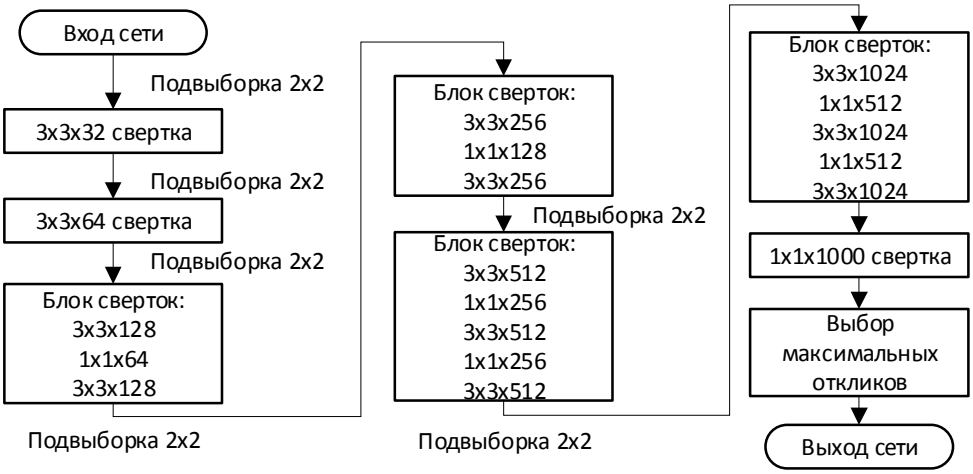
самодельные маркеры, повторяющие вид некоторых дорожных знаков или иных объектов дорожной обстановки. В первом тестовом наборе содержится 1152 изображения, которые представляют собой запись проезда транспортного средства по прямолинейному маршруту в искусственно созданной карте. Во втором наборе – 942 изображения, представляющих запись экспериментального проезда поворота.

Использованные архитектуры сетей. В качестве вариантов сетей для обнаружения объектов рассмотрено несколько архитектур, предоставленных в составе системы YOLO v2.

Сеть MobileNet для обнаружения объектов [9] имеет вход 224x224x3 и представляет собой последовательность сверточных слоев 3x3, перемежаемых свертками 1x1. В верхней части сети находятся слои для решения поставленной задачи в зависимости от типа – классификации, сегментации, обнаружения.

Сеть TinyYolo описана в работе [3] и рассмотрена в двух вариантах, обучение без предобученных весов и с использованием весов, предобученных на ImageNet. Архитектура сети имеет вход 416x416x3, представляет собой последовательность сверток 3x3 с последующими слоями подвыборки (max-pooling) 2x2 с шагом 2. В конце – два последовательных слоя свертки 3x3 и слой свертки 1x1, развертывающий данные в вектор для обработки классификатором.

Архитектура FullYolo описана в работе [8], имеет вход 224x224, 19 сверточных слоев. В начале идут две свертки 3x3, разделенные подвыборкой 2x2 с шагом 2, затем 2 группы из 3 сверточных слоев (свертка 3x3 – свертка 1x1 – свертка 3x3), разделенные подвыборкой 2x2 с шагом 2, и 2 группы из 5 сверточных слоев (свертка 3x3 – свертка 1x1 – свертка 3x3 – свертка 1x1 – свертка 3x3), также разделенные подвыборкой 2x2 с шагом 2. После последней группы идет свертка 1x1 без подвыборки, разворачивающая результаты в вектор на 1000 значений и слой softmax, выделяющий максимальный отклик из этого вектора. Схема показана на рисунке.



Архитектура нейронной сети FullYolo

Экспериментальные исследования. Выполнено обучение описанных трех архитектур на одном и том же наборе данных, по одному варианту для MobileNet и FullYolo и два варианта для TinyYolo – с предобученными и случайными весами. Результаты тестирования обученных сетей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты тестирования архитектур нейронных сетей

Сеть	MobileNet	Tiny YOLO (с нуля)	Tiny YOLO (предобученная)	Full YOLO
Размер входа	1024x768	960x544	1024x768	1024x768
Точность (mAP) на первом наборе	0,48	0,53	0,41	0,56
Точность (mAP) на втором наборе	0,49	0,42	0,56	0,7

Для определения качества работы сети использован показатель mAP (maximum Average Precision), который был исходно предложен для оценки точности обнаружения объектов в соревновании Pascal VOC и подробно описан в правилах соревнования [10]. По полученным ре-

зультатам можно сделать выводы о том, что качество обучения сети MobileNet заметно ниже двух других, несмотря на близкие значения по качеству, сеть пропускает достаточно много кадров, хотя и дает малое число ложных обнаружений и обнаруживает объекты близко к разметке. Сеть TinyYolo при обучении с нуля показала mAP 0,53, сети TinyYolo и FullYolo при обучении начиная с предобученных весов показали mAP 0,55-0,7.

Заключение. Рассмотрена задача обнаружения визуальных ориентиров, которые могут применяться для навигации беспилотного транспортного средства. Для обнаружения ориентиров рассмотрена система YOLO v2 с несколькими вариантами архитектуры сетей. Результаты показывают, что, несмотря на высокое быстродействие, точность обнаружения объектов недостаточна для применения системы в текущем виде. Сети TinyYolo и FullYolo способны обнаруживать большую часть объектов, представленных на изображении, но допускают 10-15% ложных обнаружений, а также пропускают 5-7% объектов. Для решения этих проблем требуется создание алгоритма фильтрации ложных обнаружений и алгоритма сопровождения для восстановления пропущенных объектов.

В качестве направлений дальнейших исследований предлагается интеграция алгоритмов сопровождения и фильтрации с целью исключения пропусков в последовательностях успешных обнаружений и отдельных выбросов, при которых объект смещается в физически невозможное положение.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Korsakov A. et al**. Determination of an Unmanned Mobile Object Orientation by Natural Landmarks // Supplementary Proceedings of the Fifth International Conference on Analysis of Images, Social Networks and Texts (AIST 2016), Yekaterinburg, Russia. 2016. pp. 91–101.
2. **Smirnova E., Stepanov D., Goryunov V.** A technique of natural visual landmarks detection and description for mobile robot cognitive navigation // Annals of 26th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM. 2015. pp. 905–911.
3. **Redmon J. et al.** You only look once: Unified, real-time object detection // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2016. pp. 779–788.
4. GitHub – experiencor/keras-yolo2. URL: https://github.com/experiencor/keras-yolo2 (дата обращения: 12.05.2019)
5. Home – Keras documentation. URL: https://keras.io/ (дата обращения: 12.05.2019)
6. **Deng J. et al**. Imagenet: A large-scale hierarchical image database //2009 IEEE conference on computer vision and pattern recognition. IEEE, 2009. pp. 248–255.
7. **Redmon J., Farhadi A.** YOLO9000: better, faster, stronger //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017. pp. 7263–7271.
8. **Lin T. Y. et al.** Microsoft coco: Common objects in context //European conference on computer vision. Springer, Cham, 2014. pp. 740–755.
9. **Howard A. G. et al.** Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. 17.04.2017 // arXiv preprint. URL: https://arxiv.org/pdf/1704.04861.pdf (дата обращения: 12.05.2019)
10. **M. Everingham et al**. The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge. URL: http://host.robots.ox.ac.uk/pascal/VOC/pubs/everingham10.pdf (дата обращения: 12.05.2019)

I.S. Fomin, S.R. Orlova, A.V. Bakhshiev (The Russian State Scientific Center for Robotics and Technical Cybernetics, Saint-Petersburg). **Research on neural networks for object detection in autonomous vehicle navigation task**

Abstract. The problem of detection of visual landmarks that were previously used to navigate an autonomous vehicle is considered. As a tool for detecting landmarks, a neural network object detection algorithm based on YOLO v2 and MobileNet networks, improved to work with a rectangular network input, is being investigated. Several variants of the network architecture have been tested, the results show that the trained system allows detecting various classes of landmarks with mAP from 0.41 to 0.7. Postprocessing of detection results is required to improve accuracy.

УДК 612.8:681.5

Д.А. СТЕПАНЕНКО, Д.М. СЕМЕНОВ
(Институт проблем машиностроения РАН, Санкт-Петербургский государственный университет)

С.А. ПЛОТНИКОВ
(Институт проблем машиностроения РАН, Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ НЕЙРООБРАТНОЙ СВЯЗИ

Предложена структура программного комплекса для реализации нейрообратной связи между пользователем и объектом управления. В качестве объекта управления используется мобильный робот. Выделение сенсомоторных состояний пользователя осуществляется на основе сигнала электроэнцефалографа с использованием алгоритмов временной (частотной) и пространственной фильтрации.

Введение. Организм человека устроен таким образом, что способен управлять жизненно важными физиологическими параметрами бессознательно. В качестве таких параметров может рассматриваться пульс, температура тела, кровяное давление, мышечная активность и активность головного мозга. Однако осознанное управление некоторыми из перечисленных параметров может быть незначительно или же вообще невозможно без привлечения вспомогательных средств. Одним из таких средств является нейрообратная связь (НОС). НОС позволяет человеку отслеживать активность его мозга и осознанно её изменять в соответствии с поставленной задачей [1]. Благодаря этому уже на протяжении многих лет принцип НОС эффективно применяют для реабилитации пациентов, перенесших инсульт или получивших черепно-мозговую травму и утративших некоторые сенсомоторные функции организма [2].

Принцип НОС заключается в следующем. Данные электроэнцефалографии (ЭЭГ), отражающие изменение электрического потенциала на поверхности головы испытуемого, в режиме реального времени передаются на устройство, формирующее сигнал НОС. Данное устройство, основываясь на полученных данных, определяет состояние испытуемого и формирует сигнал обратной связи, который предъявляется испытуемому в виде интуитивно понятного интерфейса.

Работа посвящена разработке программного комплекса для управления мобильным роботом на основе НОС, которая, в свою очередь, реализуется посредством сенсомоторных сигналов, поступающих с электроэнцефалографа.

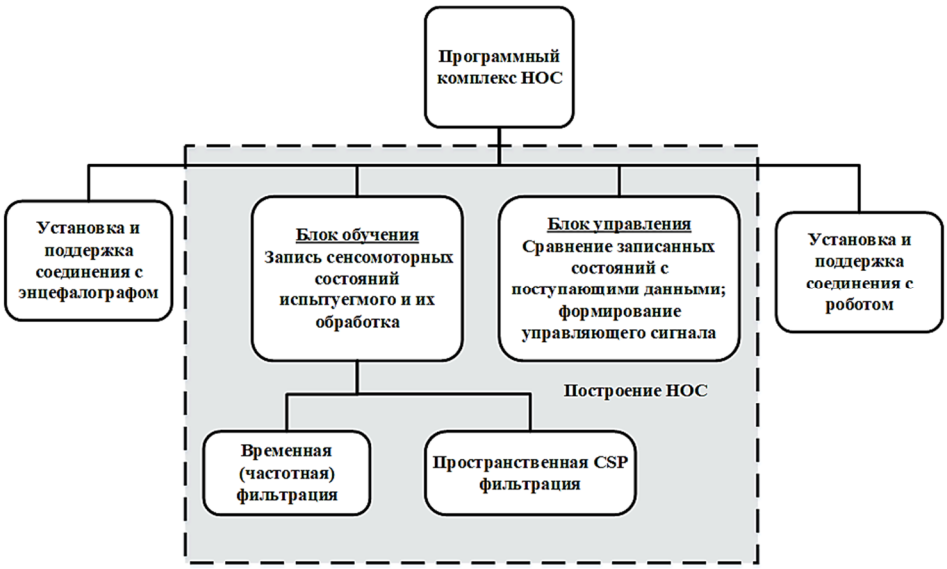
Описание программного комплекса. Разработка программного обеспечения является ключевым этапом в создании интерфейса «мозг–компьютер». Кроме программной реализации математических алгоритмов, проектируемое ПО также должно обеспечивать качественное соединение с электроэнцефалографом и мобильным роботом на протяжении всего эксперимента.

Программный комплекс был разработан в среде MATLAB и включает в себя два основных режима – обучение и взаимодействие с интерфейсом. На этапе обучения происходит запись сигналов ЭЭГ, определяющих различные сенсомоторные состояния испытуемого – его двигательную активность правой и левой рукой. Далее записанные состояния используются для их идентификации в реальном времени и формирования управляющего сигнала на этапе взаимодействия испытуемого с предъявленным ему интерфейсом. В качестве такого интерфейса в работе был использован мобильный робот «Lego Mindstorms NXT 2.0». Структура разработанного программного комплекса представлена на рисунке.

Математической частью программного комплекса являются модули обработки сигналов ЭЭГ и построения НОС. Модуль обработки сигнала ЭЭГ состоит из двух этапов – этапа временной (частотной) фильтрации и этапа пространственной фильтрации на основе CSP (Common spatial pattern) фильтра [5]. На первом этапе выделяется необходимый для исследования диапазон частот; на втором пространственный фильтр выделяет исследуемую область на поверхности головы испытуемого. Во время записи и фильтрации сигнала происходит процесс обучения испытуемого с целью определения моторной области коры головного мозга, отвеча-

Научный руководитель д.т.н., проф. Фрадков А.Л.

ющей за движения правой или левой рукой. Записанный сигнал можно рассматривать как «эталонный» и сравнивать его с другими сигналами.



Структура программного комплекса

Сравнивая поступающий при сеансе управления мобильным роботом сигнал с эталонным и вычисляя их коэффициент корреляции между собой, можно определить моменты спокойствия и активности испытуемого, тем самым оказывая управляющее воздействие на робота.

Описание эксперимента. Проводимый эксперимент включает в себя два этапа – обучение и управление. На этапе обучения записываются данные ЭЭГ при трёх состояниях: покое, движении левой и правой кистей рук. Для каждого из состояний отдельно проводятся процедуры временной и пространственной фильтрации и записываются сигналы, которые в дальнейшем будут сравниваться с поступающим в программный комплекс сигналом. Этап управления представляет собой формирование управляющего сигнала путём сравнения записанных ранее состояний и текущего поступающего сигнала с энцефалографа. Далее управляющий сигнал передается на робота через беспроводную сеть Bluetooth. Реакция мобильного робота на представленное воздействие замыкает петлю обратной связи между испытуемым и роботом.

Предварительные результаты описанного эксперимента подтвердили работоспособность программного комплекса.

Заключение. Разработанный программный комплекс представляет собой интегральную реализацию множества стандартных методов и алгоритмов обработки сигнала ЭЭГ [4, 5]. Объединение таких методов в едином программном комплексе является важным моментом в решении задач эффективности и быстродействия обработки сигналов ЭЭГ, что является критически важным при управлении с помощью нейрообратной связи [4]. Для разработанного программного комплекса было получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [3]. В настоящий момент программное обеспечение для управления мобильным роботом находится на этапе тестовых испытаний. В дальнейшем планируется разработка и внедрение адаптивных математических моделей активности головного мозга [1]. Предполагается, что такие модели позволят учесть особенности каждого испытуемого и эффективно формировать сигнал обратной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Овод И.В., Осадчий А.Е., Пупышев А.А., Фрадков А.Л.** Формирование нейрообратной связи на основе адаптивной модели активности головного мозга // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2012. №. 2. С. 36–41.

2. **Darvishi, S., Ridding, M. C., Hordacre, B., Abbott, D., Baumert, M.** Investigating the impact of feedback update interval on the efficacy of restorative brain–computer interfaces. *Royal Society open science*. 2017. Vol. 4. №. 8. P. 170660.
3. **Stepanenko D. A., Semenov D. M., Plotnikov S. A., Fradkov A.L.** A software package for the implementation of neurofeedback: the EEG signal processing module. *Certificate of state registration of software, reg. №2019610034 from 09.01.2019.* M.: Rospatent.
4. **Smetanin, N., Volkova, K., Zabodaev, S., Lebedev, M., Ossadtchi, A.** NFBLab – A Versatile Software for Neurofeedback and Brain-Computer Interface Research. *Frontiers in Neuroinformatics*. 2018. Vol. 12 (100).
5. **Zoltan J. K., Michael S. L. and Steven Z. Z.** Spatial patterns underlying population differences in the background EEG. *Brain topography*. 1990. Vol. 2 (4) P. 275-284.

D.A. Stepanenko, D.M. Semenov (IPME RAS, SPBU, Saint Petersburg), **S.A. Plotnikov** (IMPE RAS, ITMO University, Saint Petersburg). **Control of the mobile robot is based on neurofeedback**

Abstract. The structure of the software for realization of neurofeedback between the user and the control object is offered. Mobile robot is used as a control object. The software described in the work, allows us to identify several sensor-motor states of the user based on the signal of the electroencephalograph coming from his head. This can be achieved by combining the algorithms of temporal (frequency) and spatial filtering. Further, the recorded states of the user are compared with the incoming real-time signal, which allows us to form the controller which impact on the control object.

УДК 681.532.1

Д.А. ГАЛКИНА
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

СОГЛАСОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ФОРМАЦИЕЙ МОРСКИХ РОБОТИЗИРОВАННЫХ НАДВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ

Выявлены проблемы при организации сетецентрического пространства в условиях морской неопределенности. Выдвинуты основные требования к системе управления формацией, а также к самим агентам формации. Предложен алгоритм работы системы согласованного управления формацией морских роботизированных надводных объектов.

Введение. В последнее время для эффективного и оптимального решения задач группового управления на море и под водой активно применяется сетецентрическая идеология построения пространства [1]. Особенно хорошо использование такой идеологии заметно в случаях проведения работ с применением робототехнических комплексов.

Основой сетецентрической идеологии является создание единой информационно-коммутационной сети в районе выполнения задач, связывающей источники освещения обстановки, центры управления роботизированными объектами и непосредственно морские роботизированные надводные объекты (далее – агенты). Сетецентрическая идеология превосходит аналоги за счет оперативного доведения информации об обстановке до всех потребителей непосредственно в районе действий.

Для организации сетецентрического пространства в районе проведения работ в настоящее время участниками научного коворкинг-проекта разрабатывается единая локальная информационно-управляющая система (далее – Система) [2].

Система представляет собой пространственно-распределенную на поверхности моря сеть агентов с навигационным и приемо-передающим оборудованием. Для непрерывной и устойчивой работы Системы требуется, чтобы агенты, находящиеся в узлах сети, располагались в заданном местоположении с допустимой погрешностью. Поскольку на узлы Системы оказывают воздействие гидрометеорологические условия (ветер, ветровое волнение, зыбь, течения), то смена их положения будет неизбежна, что поставит под угрозу корректную работу системы. Таким образом, для обеспечения устойчивой и непрерывной работы Системы требуется разработать автоматизированную систему согласованного управления (далее – АССУ), контролирующую местоположение узлов Системы в заданных областях пространства и корректирующую их местоположение в случае выхода за пределы установленных допустимых значений.

Предлагаемая работа посвящена разработке алгоритма согласованного управления несколькими морскими роботизированными надводными объектами. Поскольку для функционирования такой системы необходимым и достаточным являются три аппарата, было принято решение работать с этим количеством объектов для удобства и большей наглядности.

Организация автоматизированной системы согласованного управления. Для получения корректных результатов разрабатываемой АССУ был предъявлен ряд основных требований. Система должна обладать определенным запасом устойчивости в случае незначительного перемещения агента под влиянием внешних факторов; статической и динамической точностями, обеспечивающими постоянное местоположение агентов на заданном расстоянии друг от друга. Также АССУ должна быть робастной, то есть малочувствительной к сторонним воздействиям, и согласованной, т. е. элементы системы – агенты должны принудительно взаимодействовать между собой [3]. Каждый агент должен локально контролировать свое собственное положение, так что расстояние до соседних объектов лежит в допустимых пределах, задающихся дальностью работы антенн [4, 5].

Алгоритм работы предлагаемой автоматизированной системы согласованного управления заключается в следующем. Каждый из агентов передает сигнал соседним агентам по радиосвя-

Научный руководитель к.т.н. Борисов О.И.

зи. В структуре сигнала кодируются уникальный идентификационный номер и время отправки сигнала. По этим данным каждый из аппаратов просчитывает расстояния между собой и соседями. Затем каждым из участников группы производится сравнение расстояния d, заданного ему заранее, с расстоянием z, полученным путем вычислений. Если расстояние z лежит в промежутке [d – r; d + r], где r – допустимая погрешность местоположения, то задача системы выполнена, и никаких дополнительных действий предпринимать не требуется. Если расстояние z вышло за пределы промежутка [d – r; d + r], то аппарат получит команду включения двигателей и будет двигаться до тех пор, пока расстояние z снова не будет лежать в пределах промежутка. После этого аппараты снова обменяются сигналами.

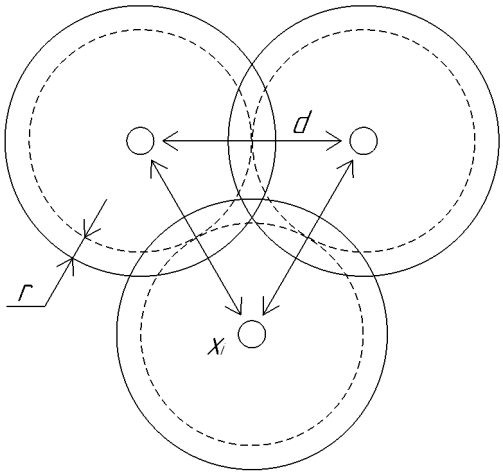


Схема относительного положения агентов с учетом погрешностей

Таким образом, предложенный алгоритм позволит сформировать устойчивую пространственно-распределённую сеть, обеспечивающую надежное и непрерывное функционирование Системы в районе проведения работ.

Заключение. Выявлены основные проблемы при организации сетецентрического пространства на море, выдвинуты требования к автоматизированной системе согласованного управления агентами. На примере построения сетецентрического пространства, состоящего из нескольких агентов, предложен алгоритм построения системы согласованного управления формацией морских роботизированных надводных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морская доктрина Российской Федерации на период до 2020 года. Министерство иностранных дел Российской Федерации. 2001. URL: http://www.mid.ru/foreign_policy/official_documents/-/asset_publisher/CptICkB6BZ29/content/id/462098 (Дата обращения 10.01.2019)
2. **Галкин И.А.** Организация навигационного обеспечения морских робототехнических комплексов в оперативно-важных районах Мирового океана. СПб: Издательско-полиграфический комплекс "Гангут", 2017, с. 183–188.
3. **Мирошник И.В.,** Теория автоматического управления. СПб: Питер, 2005, с. 41–42.
4. **Cao M., Morse A.S., Dasgupta S.** Controlling a Triangular Formation of Mobile Autonomous Agents. Conference on Decision and Control. 2007. P. 3603.
5. **Cao M., Yu C., Morse A.S., Dasgupta S.** Maintaining a Directed, Triangular Formation of Mobile Autonomous Agents. Communications in Information and Systems. 2011. №11. P. 1–16

D.A. Galkina (ITMO University, Saint-Petersburg). **Coordinated management of triangular formations marine robotized surface objects**

Abstract. Problems in the organization of network-centric space under conditions of uncertainty is identified. The main requirements for the management system of formation, as well as for the agents of the formation is proposed. A method for organizing a system for coordinated formation management of marine robotized surface objects is proposed.

УДК 681.51

К.А. ГОРДИЕВИЧ, А.А. КРЕЧИН, И.В. ШЕСТАКОВ, А.А. СИНИШИН
(Санкт-Петербургский государственный морской технический университет)

МАКЕТ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ СИМУЛЯЦИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОДВОДНЫХ РОБОТОВ

Рассмотрена реализация мультиагентной системы для обучения студентов алгоритмам группового управления с использованием ROS и Python в виртуальном симуляторе Turtlesim и на практике с использованием Aruco Markers и роботов EduMIP.

Введение. Классический подход к решению задач в робототехнике основывается на создание одного робота, который будет способен решить поставленную задачу. Однако существуют задачи, которые сложно или невозможно решить с помощью одного робота или монолитной системы. Для таких задач можно использовать мультиагентный подход. В основе мультиагентного подхода лежит использование группы взаимодействующих между собой роботов (агентов) и декомпозиция общей задачи на ряд локальных задач, которые агенты самостоятельно распределяют между собой. Подобные системы широко применяются, в том числе в космической [1] и морской робототехнике [2, 3]. В деле подготовке специалистов по групповому применению роботов крайне важна возможность практической проверки алгоритмов, как в симуляции, так и на практике с реальными роботами [4]. Предлагаемый доклад посвящен созданию такой мультиагентной системы, с помощью которой студенты смогут тестировать алгоритмы группового управления в симуляции и на реальных роботах.

Существующие мультиагентные системы. Уже сейчас существуют МАС (мультиагентные системы), на которых можно тестировать алгоритмы, например, Droplets [5] и Robotarium [6]. К сожалению, эти и другие существующие системы разработаны для конкретных роботов или не соответствуют следующим требованиям:

- открытость системы к доработкам и изменению исходного кода;
- поддержка языка Python;
- наличие удобного симулятора;
- возможность симуляции системы передачи данных, включая различные виды задержек и искажений сигналов;
- простой перенос на физические модели роботов для базовой симуляции на практике.

Реализация МАС. Для реализации системы, которая будет соответствовать поставленным требованиям, используется ROS (Robot Operating System) – это фреймворк для программирования роботов. ROS бесплатен для использования как в исследовательских, так и в коммерческих целях, имеет большое количество готовых пакетов (библиотек) с уже готовыми робототехническими алгоритмами (навигации, движения и т. д.) и инструментов для создания алгоритмов, поддерживает Python, имеет встроенный примитивный 2D-симулятор Turtlesim и физический 3D-симулятор Gazebo. ROS основан на архитектуре графов, где обработка данных происходит в узлах (вершины), которые могут получать и передавать сообщения (ROS msg) между собой по топикам (рёбрам), т. е. каждый агент системы представляет из себя отдельный узел.
Структурная схема макета состоит из следующих частей (рис. 1):

система позиционирования – необходима для передачи агентам их координат;

имитатор среды – модуль имитации распространения сигналов, имитирующий потери сигналов при росте расстояния между агентами, задержку распространения и т. д.;

алгоритм управления роботом – модуль, формирующий команды движения (angular и velocity) для управляющего модуля агента, на основе поступающей информации;

управляющий модуль – отвечает за взаимодействие с сенсорами и приводами. В случае программной симуляции это модуль симулятора, а в случае натурной симуляции – модуль, отвечающий за работу с реальными устройствами.

Научный руководитель начальник студенческого конструкторского бюро Чемоданов М.Н.

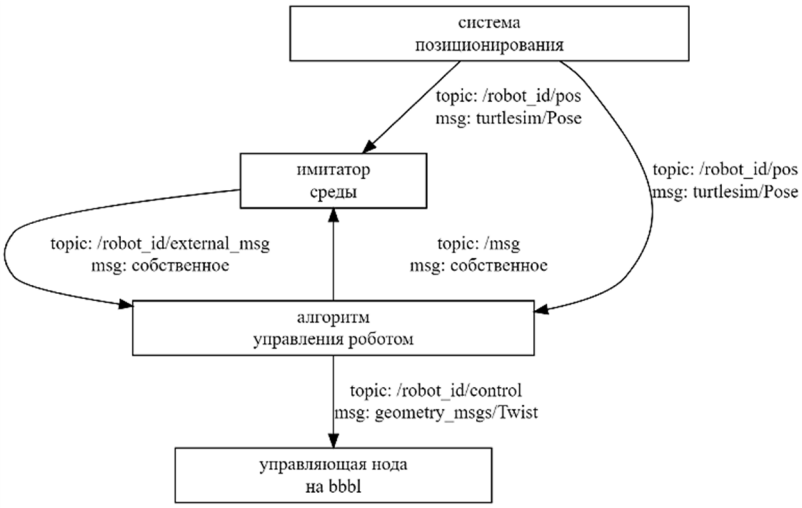


Рисунок 1. Структурная схема макета для симуляции МАС

В качестве примера запрограммирован сценарий автоматического выстраивания группы агентов в кильватерный строй и следование за лидером или к заданной точке. Выбран следующий алгоритм решения задачи:

1. Агент получает сообщение Mission.msg с координатами цели (формат сообщения Mission: [name, x, y], где name, x и y – это имя и координаты цели).
2. Агент рассылает это сообщение другим агентам в группе.
3. После получения подтверждения получения сообщения от всех агентов они начинают торговлю за место в группе, рассылая друг другу сообщение Trade.msg (формат [name, price], где name и price – это имя и цена агента, за цену можно принять расстояние от агента до цели). Агент с самой низкой ценой занимает первое место, второй после него занимает второе и т. д.
4. После окончания торговли агенты выстраиваются в линию и начинают движение к цели.
5. При достижении заданной цели группа останавливается.

Для визуализации работы системы использовался симулятор Turtlesim, а в качестве агентов – встроенные в симулятор примитивные роботы Turtle (рис. 2).

Перенос МАС на реальных роботов. Для переноса системы на реальных роботов было решено использовать в качестве агентов роботов EduMiP [7]. Для получения их координат применялись Aruco маркеры, закрепленные на каждом роботе, веб-камера и открытая ROS библиотека aruco_detect. Координаты маркеров отсчитываются относительно камеры. Система была легко перенесена на реальных роботов и подтвердила свою работоспособность (рис. 3).

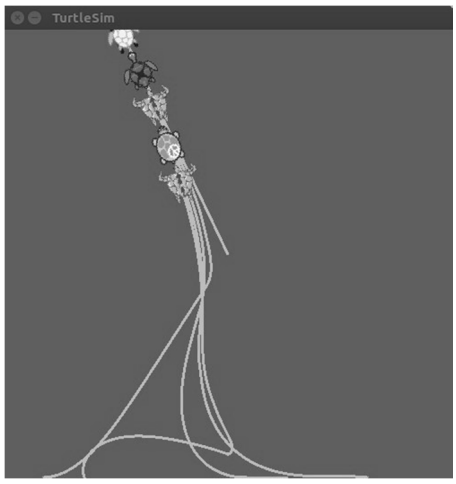


Рис. 2. Следование роботов за лидером в кильватерном строю (симуляция в Turtlesim)

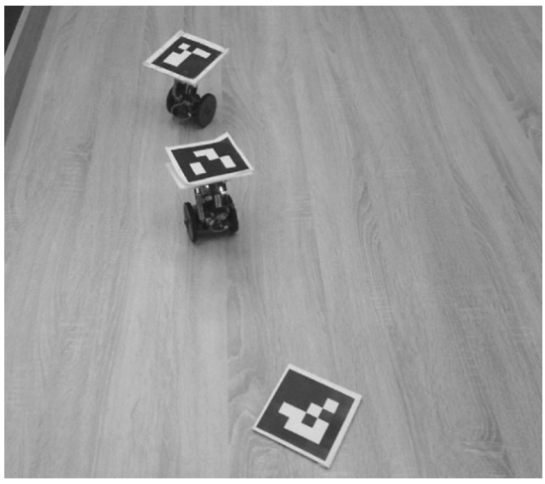


Рис. 3. Следование группы роботов к точке (обозначена Aruco маркером)

Заключение. Мультиагентная система для обучения студентов была выполнена в соответствии с поставленными требованиями**.** В планах развития системы переход на 3D-симулятор Gazebo, с поддержкой физического моделирования и возможностью создания реалистичной модели робота, реализация нескольких типовых задач группового управления, открытие исходных кодов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Городецкий В.И., Карасев О.В.** Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. Т. 187. № 2. С. 234–247.
2. Aquabotix SwarmDiver: A micro drone for ocean swarming // Электронный ресурс: URL: https://www.therobotreport.com/aquabotix-swarmdiver-ocean-swarming/ - (дата обращения: 31.01.2019).
3. **Городецкий, В. И.** Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 3. С. 55–75.
4. **Kitts C., Egerstedt M.,** Design, control, and applications of realworld multirobot systems // Robotics Automation Magazine, IEEE, vol. 15, no. 1, p. 8, 2008.
5. Droplet // Электронный ресурс, URL: http://correll.cs.colorado.edu/?page_id=2687 - (дата обращения: 31.01.2019).
6. Robotarium // Электронный ресурс, URL: https://www.robotarium.gatech.edu/ - (дата обращения: 31.01.2019).
7. UCSD Flow Control & Coordinated Robotics Labs: EduMIP // Электронный ресурс, URL: https://www.ucsdrobotics.org/edumip - (дата обращения: 31.01.2019).

K. Gordievich, A. Krechin, I. Shestakov, A. Sinishin (Saint-Petersburg State Marine Technical University). **Model of a multi-agent system for simulating the interaction of underwater robots**

Abstract. This paper describes the results of development and testing of multi-agent system for teaching students. For development of the system was used ROS and Python, for testing the system was used 2D simulator Turlesim and EduMIP robots with Aruco markers.

УДК 681.51

D.S. IAROSH, A.V. KORNILOVA
(Saint Petersburg State University, Saint Petersburg)

MULTIAGENT SYSTEM OF MOBILE ROBOTS FOR ROBOTIC FOOTBALL

This article presents our ongoing research on development of cross-platform framework, designed for creation and investigation of algorithms of multi-robot control and navigation in a highly dynamic environment with centralized control system. Our solution provides centralized monitoring system based on SSL-Vision system. Data from monitoring system is available in MATLAB-engine, where control signals for robots can be calculated. Also, there is a replaceable module for connection with robots, which can be transformed in accordance with used robots. In this paper overview of framework and its architecture, and arised problems are described, practical cases of this system in experiments of multi-agent navigation and control are provided.

Introduction. Nowadays robots are increasingly replacing human in tasks, that requires high accuracy, and in situations, where man may suffer [1]. The need to create such robots has appeared in many areas of science and technology, in particular when conducting space and underwater research [2], while addressing the effects of emergency situations and man-made disasters [3,4], while protecting the territories and survey areas, when performing combat operations, etc. However, it is becoming more and more obvious that a single robot is capable for solving a rather narrow class of tasks, while solving complex tasks is possible only for group of robots, possessing various functionalities. Over the past 10 years a lot of state of the art works related to navigation and interaction in groups of robots have appeared, but a large number of these researches stop at the stage of mathematical justification and simulation without testing algorithms on real robots. In this paper framework for development and comparison of control and navigation algorithms of multi-agent system is presented, as well as its application in Robocup-SSL challenge [5] and in research on comparison of path-planning algorithms. Other teams, participating in this challenge, also publish their solutions but they are focused for competitions and their rules, which make it difficult and almost impossible to reuse software components in other fields of research. Talking about existing open source solutions, it is worth to mention the following commands with available open source software:

- GT RoboJackets [6];
- Immortals [7];
- TIGERs Mannheim [8];
- RoboTeam Twente [9];
- ER-Force [10].

The main problem of the proposed solutions is the use of low-level programming languages to optimize the execution time of the algorithms, which hinders the ability to quickly develop and prototype algorithms without deep knowledge of programming in low-level languages. The robots used by the teams are also very specific to the competition, have a high cost and do not exist in mass production. The main goal of this work is to create cross-platform software:

- allows to implement robots group cooperation algorithms using high-level tools (MATLAB, Python);
- scalable for various protocols of communication with budget and robots available in scientific laboratories: TRIK (Wi-Fi) [11], Lego EV3, NXT (Bluetooth) [12], Raspberry Pi [13].

Overview. Our framework consists of two main parts: *centralized monitoring system* for robot positions detecting and *centralized control system* for calculating control signals for robots using Matlab-engine.

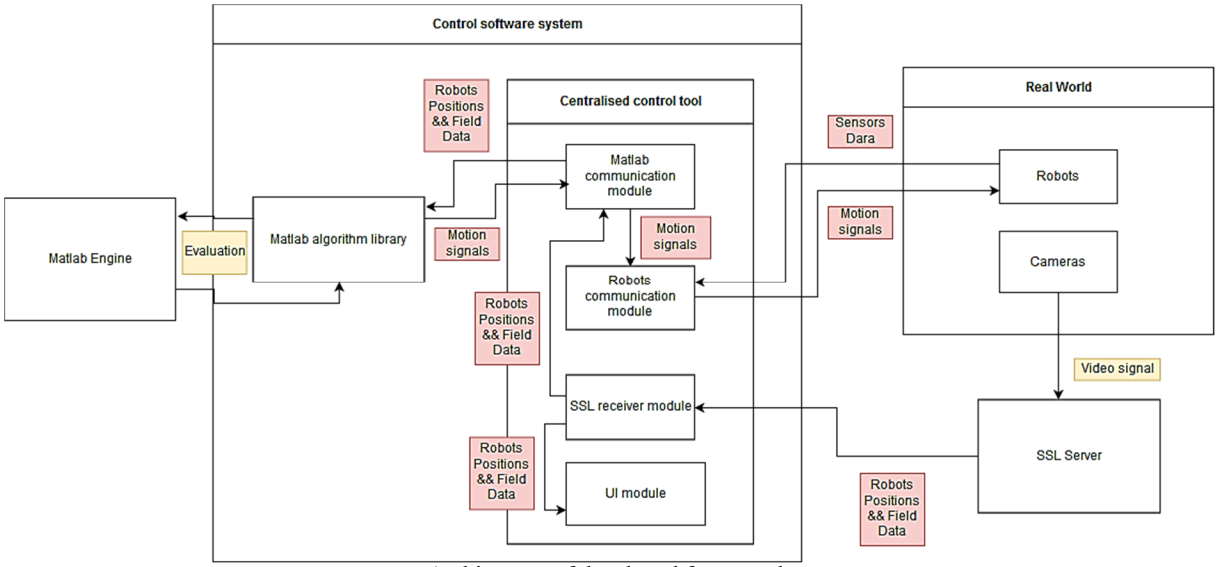
Centralized monitoring system detects robots using SSL-Vision [14], which estimates current robot positions using camera above the scene and sends this data to the *centralized control system* using

Научный руководитель ст. преп. кафедры системного программирования Кириленко Я.А.

network**.** Robots positions are detected using by special pattern on the robot top, which allows to differ robot number and robot orientation.

Centralized control system receives data from *centralized monitoring system* and robots (for example, from their intrinsic sensors) and transfer this data to the Matlab-engine, where this information can be used to calculate control signals for robots. After calculation, control signals are exported from the Matlab-engine and sent to the robots.

Presented software was developed by using C++ with Qt framework; this choice was partly motivated by its cross-platform nature. Software implementation of the algorithms was performed by using Matlab, partly due to its convenience at the stage of prototyping. Figure 1 illustrates interaction between all modules. *SSL receiver module* solves the problem of obtaining data about the size of the field and the game situation from the video system. *Robots communication module* solves the problem of sending the calculated control signals to robots and receiving data from their sensors. The objective of *Matlab communication module* is to interact with the library of algorithms - downloading information about the game situation (object locations, sensor readings), starting the calculation of control signals and extracting the result from the MATLAB environment. Currently, a solution that allows programming algorithms using Python is also being actively developed. *UI module* solves the problem of demonstrating the events occurring on the field to the operator, and also allows you to control the robots in manual mode. Matlab algorithm library analyzes data obtained from other parts of the framework, and calculates control signals for robots.



Architecture of developed framework

Experiments and practical cases. At the moment this framework is actively used by URoboRus team [15] which is developing a solution for RoboCup-SSL challenge. For this purpose, special omnibased robots are used. Using this framework URoboRus team [16] have implemented a Matlab-library, which includes basic algorithms for omnibased robot control, as well as advanced algorithms: path-planning with obstacle avoidance, different behaviour models in accordance with RoboCup-SSL rules [17].

This framework is also actively used in research of obstacle avoidance algorithms with non-static obstacles. This framework allows to simulate moving obstacle.

Conclusion. During our research, framework designed for creation and investigation of algorithms of multi-robot control with centralized control system was developed. The described framework was successfully used by the URoboRus team for RoboCup-SSL challenges and is actively testing in research on algorithms of path-planning and obstacle avoidance.

REFERENCES

1. **C. Heyer**. "Human-robot interaction and future industrial robotics applications," *2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, 2010, pp. 4749-4754.
2. **K. Yoshida,** "Achievements in space robotics," in *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 16, no. 4, pp. 20-28, December 2009.
3. **S. Tadokoro.** "Special project on development of advanced robots for disaster response (DDT project)," *IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts, 2005.*, Nagoya, 2005, pp. 66-72.
4. **M. N. Kiyani and M. U. M. Khan**. "A prototype of search and rescue robot," *2016 2nd International Conference on Robotics and Artificial Intelligence (ICRAI)*, Rawalpindi, 2016, pp. 208-213.
5. **Robocup-SSL challenges**. http://wiki.robocup.org/Small_Size_League/
6. **GT RoboJackets**, official webpage, https://robojackets.org
7. **Immortals**, official repository, https://github.com/lordhippo/ImmortalsSSL
8. **TIGERs Mannheim**, official webpage, https://tigers-mannheim.de
9. **RoboTeam Twente**, official webpage, https://www.roboteamtwente.nl
10. **ER-Force**, official webpage, https://www.robotics-erlangen.de
11. **TRIK**, official webpage, https://trikset.com
12. **LEGO NXT and EV3**, official webpage, https://www.lego.com/ru-ru/mindstorms
13. **Raspberry PI**, official webpage, https://www.raspberrypi.org
14. **SSL-Vision**. https://github.com/RoboCup-SSL/ssl-vision
15. **URoboRus, official page on GitHub, https://github.com/robocup-ssl-russia**
16. **URoboRus Qualification Video 2019.** https://www.youtube.com/watch?v=W6JNIaXGRRk
17. **Robocup SSL Rules.** https://ssl.robocup.org/rules/

УДК 621.865

П.А. КОНОВАЛОВ, Г.В. РЕНЕВА, И.Ю. ШИРОКОЛОБОВ
(Санкт-Петербургский государственный университет)

АЛГОРИТМЫ МУЛЬТИАГЕНТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ И НАВИГАЦИИ В КОМАНДЕ РОБОТОВ-ФУТБОЛИСТОВ

Одним из условий прохождения на международные соревнования по робофутболу RoboCup в Small Size League является демонстрация простейшей модели игры, что приводит к необходимости разработки алгоритмов контролирующих поведение вратаря и нескольких атакующих. В работе описаны модель игры и алгоритмы, разработанные и использованные для подачи заявки на участие в финале RoboCup командой URoboRus.

Введение. С 1996 года проводятся международные соревнования среди роботов – RoboCup [1]. Целью соревнований является создание автономных роботов-футболистов для содействия научным исследованиям в областях технического зрения, навигации, группового и мультиагентного взаимодействия. На данный момент соревнования RoboCup имеют множество лиг, из которых самой первой и, на взгляд авторов, сложной является Small Size League (SSL). Российские команды ни разу не принимали участия в данном виде соревнований. Стоит отметить, что разработанный в 2012 стенд RoboCup, успешно использовался для научных исследований [2–4] и популяризации соревнований управляемого футбола роботов среди школьных команд [5]. В предлагаемой работе описываются базовые алгоритмы для управления как отдельным роботом-футболистом, так и группой таких роботов. Разработка алгоритмов велась согласно правилам международных соревнований [6].

Модели роботов. Основой робота-футболиста является четырехколесная омниплатформа, позволяющая перемещаться в любом направлении (рис. 1). Робот оснащен двумя ударными устройствами (кикерами): для прямого удара и навеса мяча. Для связи с роботом используется Wi-Fi. С торцевой стороны установлены лазерные датчики для определения мяча перед роботом. Верхняя часть роботов маркирована цветными кругами для идентификации на поле (координаты и направление) с помощью камеры и SSL-Vision. Приведенные ниже алгоритмы апробированы на шести роботах.

Рис. 1. Внешний вид робота

Алгоритмы. Роботы контролируются единым вычислительным центром. Цикл управления состоит из следующих шагов: получение информации о положении роботов на поле и мяча, вычисление управляющих сигналов робота (вектор скорости, угловая скорость, сигнал об ударе), передача на робота управляющих сигналов.

Научный руководитель проф., зав. кафедрой Фрадков А.Л.

Алгоритм движения в точку контролирует модуль скорости робота при перемещении в направлении цели, реализован как П-регулятор, где в качестве регулируемой величины выступает расстояние между роботом и целью, которое поддерживается около нуля. *Алгоритм поворота на точку* контролирует модуль угловой скорости робота при повороте на цель, реализован как ПД-регулятор, где в качестве регулируемой величины выступает наименьший угол между направлением робота и вектором, соединяющим позицию робота и цель, который поддерживается около нуля. *В алгоритме движения по окружности* вектор скорости робота складывается из касательного к окружности вектора фиксированной длины и ортогональному ему вектора, модуль которого контролируется алгоритмом движения вокруг точки. Данный алгоритм реализован как П-регулятор, где в качестве регулируемой величины выступает расстояние между позицией робота и центром окружности, которое поддерживается около некоторого заданного значения. Угловая скорость устанавливается при помощи алгоритма поворота на точку, таким образом, чтобы робот смотрел на центр окружности. Далее считаем, что все перемещения выполняются при помощи этих базовых алгоритмов.

Алгоритм приема паса работает в случае, если мяч движется в сторону робота и траектория движения мяча проходит в некоторой окрестности робота. В таком случае робот движется в точку на траектории движения мяча, выбираемую таким образом, чтобы проекция скорости робота на эту траекторию была направлена от мяча (чтобы смягчить столкновение с мячом). С использованием алгоритма построения маршрута, описанного в статье [7], был реализован *алгоритм движения с объездом препятствий*.

Алгоритм поведения вратаря вычисляет точку пересечения траектории движения мяча с линией ворот и движет робота в нее, если она существует, в противном случае, робот перемещается в центр ворот. *Алгоритм удара мяча в цель* направляет робота в точку на линии, соединяющей цель и мяч, так чтобы робот встал перед мячом. Затем робот прицеливается, подъезжая ближе к мячу и бьет в тот момент, когда мяч будет находиться вплотную к роботу. Для подачи на квалификацию RoboCup SSL, была разработана модель игры двух атакующих против одного вратаря. В данной модели поле делится на несколько зон A1 и A2 – зоны атакующих, B – зона вратаря. S1 и S2 – начальные позиции атакующих, P1 и P2 – позиции, в которых атакующие принимают пас (рис. 2). Каждому роботу сопоставляется некоторое число – его приоритет (вратарь имеет наибольший приоритет).

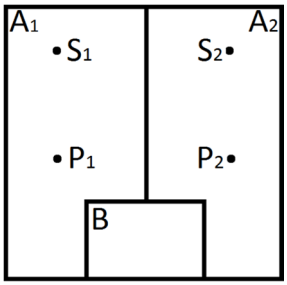


Рис. 2. Разбиение поля на зоны

Вначале определяется владелец мяча. Им является робот, который находится на расстоянии от мяча не дальше заданного значения. В случае если на поле несколько таких роботов, то владельцем назначается робот с большим приоритетом. Если все роботы расположены далеко от мяча, то владельцем назначается робот, в зоне которого оказался мяч. Если мяч вылетел за пределы поля, то владелец не определён, и роботы ожидают возвращения мяча на поле.

Если владелец вратарь, то он отбивает мяч в ближайшего атакующего робота, с помощью алгоритма удара мяча в цель. В это время атакующие роботы перемещаются в стартовые позиции своих игровых зон, при помощи алгоритма движения в точку (пока вратарь нацеливается для удара) и ловят мяч (когда он приходит в движение), при помощи алгоритма приёма паса. Если владелец атакующий робот, то он либо пасует мяч другому роботу, либо пробивает по воротам, при помощи алгоритма удара мяча в цель, решение принимается случайно равновероятно. В это время другой атакующий робот занимает позицию для приема паса в своей игровой зоне и ловит мяч при помощи алгоритма приёма паса (если мяч не движется робот стоит), а вратарь защищает ворота, руководствуясь алгоритмом поведения вратаря.

Заключение. Описанные в работе базовые алгоритмы управления роботов-футболистов были использованы для записи квалификационного видео [8] и подготовки документа описания команды URoboRus при подаче заявки на участие в финале RoboCup SSL, который пройдет в июле 2019 года в Сиднее, Австралия.

ЛИТЕРАТУРА

1. RoboCup competitions URL: https://www.robocup.org/ (дата обращения: 12.05.2019)
2. **Matveev A.S., Colin M. H., Ovchinnikov K.S., Anisimov A.M**. Robot navigation for monitoring unsteady environmental boundaries without field gradient estimation. Automatica 62, 2015, 227-235.
3. **Лучин Р.М., Широколобов И.Ю., Овчинников К.С**., **Облапенко Г.П.** Исследование алгоритмов мультиагентного взаимодействия с помощью робототехнического комплекса. 5-я Российская мультиконференция по проблемам управления, 13-215, Санкт-Петербург, 2012
4. **Shirokolobov I., Filippov S., Luchin R., Ovchinnikov K., Fradkov A**. Control engineering at high schools and universities: project-based learning. Handbook of Research on Estimation and Control Techniques in E-Learning Systems. 2016, p. 141-170, IGI Global.
5. Управляемый футбол 4x4 URL: https://robofinist.ru/event/info/competitions/id/213#kind1399 (дата обращения: 12.05.2019)
6. RoboCup Small Size League rules URL: https://ssl.robocup.org/rules/ (дата обращения: 12.05.2019)
7. **Rodrguez S., Rojas E., Perez K., Lopez J., Quintero C., Calder J.** Fast Path Planning Algorithm for the RoboCup Small Size League. RoboCup 2014: Robot World Cup XVIII, p. 407-418, 2014
8. Квалификационное видео команды URoboRus для RoboCup SSL URL: https://www.youtube.com/watch?v=W6JNIaXGRRk (дата обращения: 12.05.2019)

P.A. Konovalov, G.V. Reneva, I.U. Shirokolobov (SPBU, Saint Petersburg). **Algorithms of multiagent interaction and navigation in the team of soccer robots**

Abstract. One of the conditions for passing to the international competitions RoboCup in the Small Size League is a demonstration of the simplest model of the game. This leads to the need for development algorithms that control the behavior of the goalkeeper and several attackers. The paper describes the model of the game and the algorithms developed and used to apply for participation in the final of RoboCup competitions by the URoboRus team.

▪ ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ▪

УДК 681.51

А.М. АФАНАСЬЕВА, Е.В. ДРАНИЦЫНА
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

СРАВНЕНИЕ ДИСКРЕТНЫХ АЛГОРИТМОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОРИЕНТАЦИИ

Рассмотрены дискретные алгоритмы определения ориентации движущихся объектов. Разработана модель, позволяющая оценить точность определения углов ориентации исходя из динамики объекта, используемого метода и шага численного интегрирования.

Ключевые слова: параметры ориентации, вектор Эйлера, дискретные алгоритмы

Введение. В теории управления движением различных объектов (наземных, морских, космических и т.д.) важное место занимает задача определения ориентации объекта в навигационной системе координат. Во многих современных системах ориентация объекта определяется с помощью численного интегрирования в реальном масштабе времени кинематических уравнений абсолютного или относительного вращательного движения твердого тела по измеренной с помощью гироскопов абсолютной угловой скорости объекта. Для интегрирования могут быть использованы стандартные методы численного интегрирования дифференциальных уравнений, такие как метод Эйлера, метод трапеций, метод Рунге–Кутта, использующие мгновенную информацию об угловой скорости, а также специально разработанные численные методы, использующие мгновенную, либо интегральную информацию [1–9].

Целью работы является исследование точности различных дискретных алгоритмов решения задачи ориентации, использующих интегральный выход датчиков угловой скорости и вектор Эйлера в качестве промежуточного кинематического параметра.

Методы решения задачи ориентации. Определение ориентации подвижного объекта, рассматриваемого как твердое тело, по его известной абсолютной угловой скорости ω осуществляется с помощью бесплатформенных инерциальных навигационных систем. В качестве чувствительных элементов используются датчики угловой скорости, выдающие интегральную дискретную первичную информацию в виде проекций приращения угла поворота:

$$\gamma_k = \int_{t_{n-1}}^{t_n} \omega_k(t)dt,\ k = 1,2,3. \tag{1}$$

В докладе рассматриваются дискретные алгоритмы решения задачи ориентации, использующие в качестве промежуточного параметра вектор Эйлера $\vec{\phi}$, для которого кинематическое уравнение вращательного движения имеет вид [2]

$$\dot{\vec{\phi}} = \vec{\omega} + \frac{1}{2}\vec{\phi}\times\vec{\omega} + \frac{1}{\phi^2}\left[1 - \frac{\phi\cdot\sin\phi}{2\cdot(1-\cos\phi)}\right]\vec{\phi}\times\left(\vec{\phi}\times\vec{\omega}\right), \tag{2}$$

где $\phi = \left|\vec{\phi}\right|$ – модуль вектора $\vec{\phi}$ (значение угла поворота).

При вычислении параметров Эйлера возникают методические погрешности, обусловленные тем, что направление вектора угловой скорости меняется на шаге интегрирования, а не остается постоянным [6].

Методы, использующие интегральную информацию и вектор Эйлера в качестве промежуточного параметра, можно разделить на три группы [2]:

1. Полиномиальное разложение вектора угловой скорости на такте интегрирования [5]. Интеграл представляется через коэффициенты полиномиальной модели вектора угловой скорости, которые выражаются в свою очередь через интегральную информацию о выходных сигналах гироскопов. Количество коэффициентов полиномиальной модели равно количеству выходных сигналов гироскопов, доступных на интервале интегрирования.

2. Метод малого параметра [1]. Считая вектор Эйлера и приращение показаний гироскопов величинами первого порядка малости, решение кинематического уравнения (2) ищется на ограниченном шаге интегрирования методом малого параметра.

3. Метод кратных интегралов угловой скорости [8]. Алгоритм пошагового интегрирования кинематического уравнения (2), основанный на использовании информации от гироскопов в виде кратных интегралов угловой скорости на шаге опроса датчиков.

Каждый метод включает группу алгоритмов различных порядков точности. Определение порядка точности алгоритма вытекает из того факта, что методическая накапливающаяся погрешность алгоритма пропорциональна h^n, где h – шаг интегрирования, n – порядок точности алгоритма [6].

Результаты моделирования. Для оценки точности различных дискретных алгоритмов была разработана имитационная модель в среде MATLAB Simulink, которая включает в себя: блок задания углового движения объекта посредством углов рыскания, крена и дифферента; блок формирования интегральных показаний датчиков угловой скорости; блок решения задачи ориентации. Определение ориентации объекта осуществлялось с использованием следующих алгоритмов численного интегрирования системы: метод малого параметра 4-го порядка; метод, использующий полиномиальное разложение вектора угловой скорости по информации гироскопов, полученной на текущем и предыдущем целом интервале интегрирования; метод кратных интегралов 4-го порядка, использующий информацию в виде первого и второго интегралов от угловой скорости. Шаг интегрирования h выбирался равным 0,001 с, 0,01 с и 0,1 с. Интервал движения – 100 с.

При моделировании в качестве движения задавалась трехосная качка. Амплитуды крена, дифферента и рыскания составляли 15°, 5° и 15° соответственно. При этом рассматривалось два режима: конусное движение (частоты изменения углов совпадали) и регулярная качка.

Погрешность определения углов ориентации определялась как разность между рассчитанными алгоритмом и заданными величинами. Результаты моделирования показывают, что погрешность вычисления каждого из углов ориентации имеет две составляющие: медленно изменяющуюся составляющую, монотонно возрастающую во времени, и быстро изменяющуюся периодическую составляющую, период изменения которой определяется периодом гармонических колебаний объекта. Рассматривается только накопленная методическая погрешность. На рис. 1 представлен график зависимости погрешности вычисления углов ориентации от шага интегрирования в логарифмическом масштабе для каждого метода. Сплошными линиями изображены результаты для регулярной качки, пунктирными – для конусного движения.

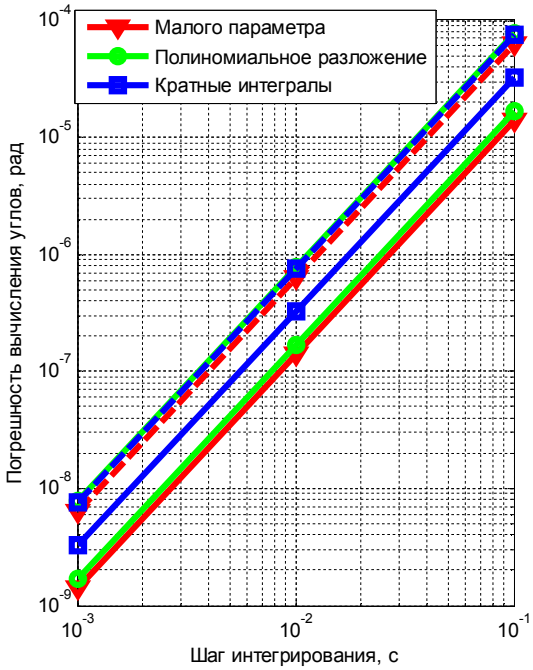


Рис. 1. Зависимость погрешности вычисления углов ориентации от шага интегрирования

По результатам моделирования наименьшую погрешность вычисления углов ориентации из рассмотренных дает метод малого параметра. Стоит отметить, что методы малого параметра и кратных интегралов дают методическую погрешность, практически постоянную во времени. Методическая погрешность метода, использующего полиномиальное разложение угловой ско-

рости, в свою очередь монотонно возрастает во времени, что может приводить к значительному снижению точности определения углов на длительных промежутках работы.

По графикам видно, что погрешность алгоритмов зависит и от динамики движения объекта. При совпадении частот колебаний точность определения углов падает.

Можно отметить, что выбор того или иного алгоритма определения ориентации движущегося объекта в конечном счете определяется классом движущихся объектов (параметрами углового движения объекта, временем его движения), требуемой точностью решения задачи ориентации и характеристиками используемого вычислителя.

Заключение. Рассмотрены дискретные алгоритмы определения ориентации движущихся объектов. Разработана модель, позволяющая оценить точность определения углов ориентации исходя из динамики объекта, используемого метода и шага численного интегрирования. Показано, что наиболее эффективным средством повышения точности алгоритмов ориентации является уменьшение шага интегрирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бранец В.Н., Шмылевский И.П.** Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат.лит., 1992. 280 с.
2. **Емельянцев Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. 394 с.
3. **Лесючевский В.М., Литманович Ю.А.** Новые подходы к разработке дискретных алгоритмов выработки параметров поступательного движения объекта в инерциальных навигационных системах // Гироскопия и навигация. 1994. No 2. С. 39–58.
4. **Литманович Ю.А., Лесючевский В.М., Гусинский В.З.** Исследование алгоритмов преобразования информации акселерометров в БИНС, использующих кратные интегралы от измеряемого ускорения // Гироскопия и навигация. 1997. No 4. С. 34–38.
5. **Миллер Р.Б.** Новый алгоритм определения параметров ориентации бесплатформенных систем // Аэрокосмическая техника. 1984.
6. **Челноков Ю.Н.** Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 512 с**.**
7. **Слюсарь В.М.** Актуальные вопросы проектирования алгоритмов ориентации БИНС. Часть 3. Анализ-синтез алгоритмов с учетом влияния частотных характеристик гироскопов // Гироскопия и навигация. 2006. No 4. С. 21–36.
8. **Gusinsky V.Z.** and etc. Optimization of a Strapdown Attitude Algorithm for a Stochastic Motion // Navigation: Journal of Institute of Navigation. 1997. Vol.44, No.2. Summer.
9. **H. Fourati, D. Eddine, C. Belkhiat.** Multisensor Attitude Estimation: Fundamental Concepts and Applications // CRC Press. 2017.

A.M. Afanaseva, E.V. Dranitsyna (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, S.-Petersburg). **Comparison of discrete algorithms for solving the problem of orientation.**

Abstract. Discrete algorithms for determining the orientation of moving objects are considered. A model has been developed that makes it possible to estimate the accuracy of determining orientation angles based on the object's dynamics, the numerical integration method used, as well as the integration step.

УДК 681.751

Р.Л. НОВИКОВ, С.А. НОСКОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

СИСТЕМА ВИЗУАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА НАМОТКИ ВОЛОКОННОГО КОНТУРА

Рассматривается разработанная система визуального наблюдения для контроля качества намотки волоконного контура волоконно-оптического гироскопа. Приводятся существующие аналоги, описывается конструкция системы и принцип её работы. Важное место занимают примеры работы системы в части определения дефектов укладки.

Введение. Одним из важнейших элементов волоконно-оптического гироскопа, обуславливающих его точностные характеристики, является волоконный контур. Основные параметры контура – симметричность, оптические потери, h-параметр – во многом зависят от качества намотки, которое определяется как степень упорядоченности структуры контура [1, 2]. При этом диаметр волоконного световода с сохранением поляризации, из которого он изготавливается, как правило, не превышает 0,3 мм. Это сильно усложняет непосредственный контроль за укладкой световода в бухту каркаса.

Для решения этой задачи современные станки для намотки оптического волокна оснащают микроскопом с камерой, позволяющими в режиме реального времени наблюдать картину укладки световода на экране монитора [3, 4]. При этом микроскоп подводится непосредственно к приемной катушке на рабочее расстояние его объектива.

Предлагаемый доклад посвящен построению системы визуального наблюдения в уже имеющемся станке намотки волоконного световода.

Описание системы визуального наблюдения. Поскольку конструкция станка не позволяла встроить в него микроскоп, система визуального наблюдения была установлена сзади станка. На рис. 1 приведена ее конструкция. Микрообъектив 2 и окуляр 3 служат здесь в роли микроскопа для увеличения изображения в 400 раз. В силу того, что приемная катушка располагается на расстоянии порядка 0,5 метра, в систему включен фотообъектив 1. Сформированное на окуляре 3 изображение попадает в камеру 4, откуда затем передается на экран монитора. Все элементы закреплены в сборном корпусе 5, который обеспечивает их надежную фиксацию и, при необходимости, регулировку.

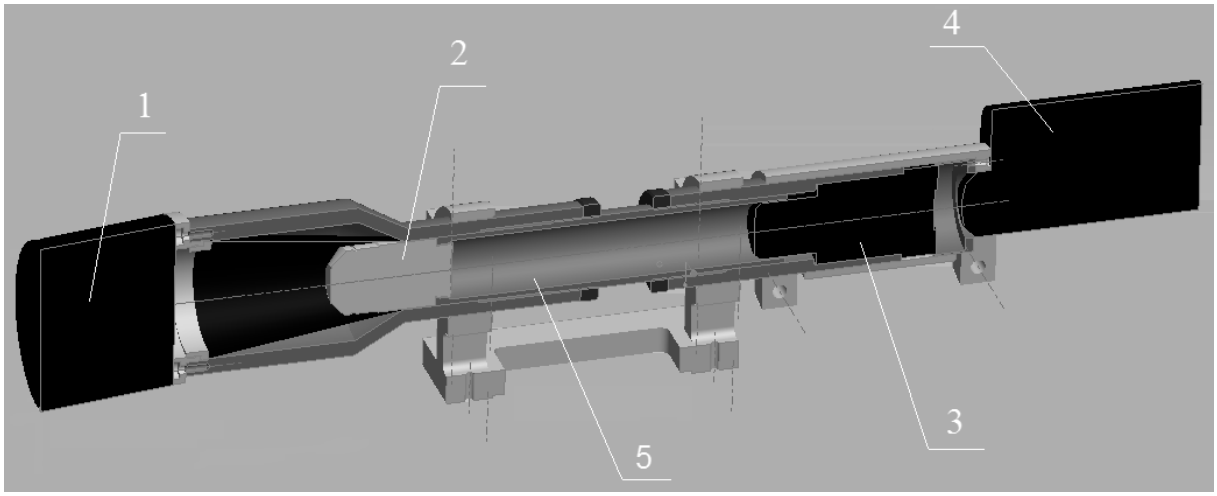


Рис. 1. Конструкция системы

Применение системы визуального наблюдения. На рис. 2 показан снимок, сделанный системой визуального наблюдения для третьего слоя регулярной укладки волоконного световода. Аналогичный снимок приведен на рис. 3 для третьего слоя укладки с дефектами. На нем замет-

ны как перескоки витков, так и в целом неровный характер намотки, связанный с трансляцией дефектов, возникших на нижних слоях [5].

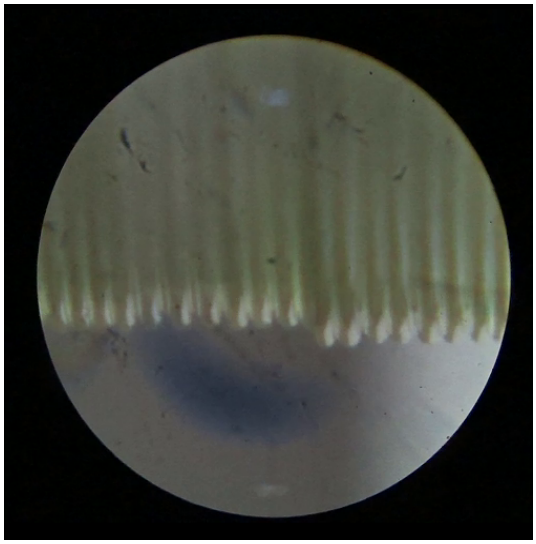


Рис. 2. Регулярная укладка

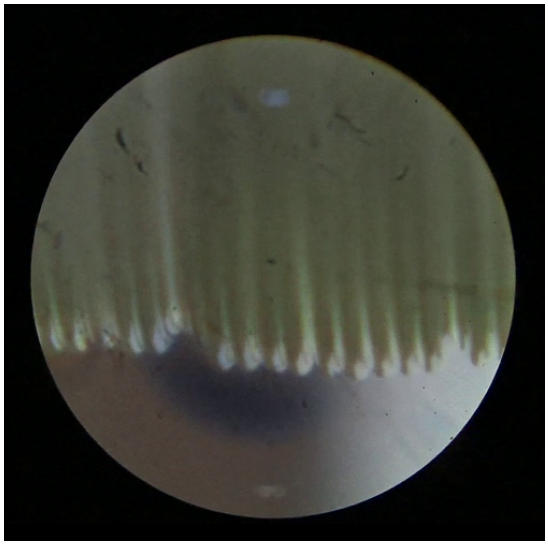


Рис. 3. Укладка с дефектами

Заключение. Результаты тестовой эксплуатации системы визуального наблюдения показали возможность ее применения для контроля качества намотки волоконного контура в части регистрации дефектов укладки. Дальнейшая работа предполагает автоматизацию этой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мешковский И.К., Унтилов А.А., Киселев С.С., Куликов А.В., Новиков Р.Л.** Качество намотки чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, №7. С. 75–78.
2. **Andre Sharon, Stephen Lin.** Development of an automated optic winding machine for gyroscope production. Robotics and Computer Integrated Manufacturing. 17 (2001). p.p. 223–231.
3. Idealphotonics, Inc.: [Электронный ресурс]. URL: http://idealphotonics.com. (Дата обращения: 26.01.2019).
4. FOG Photonics, Inc.: [Электронный ресурс]. URL: http://www.fogphotonics.com. (Дата обращения: 26.01.2019).
5. **Мешковский И.К., Киселев С.С., Куликов А.В., Новиков Р.Л.** Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра // Приборостроение. 2010. №2. С. 47–51.

R.L. Novikov, S.A. Noskov (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg). **Visual observation system for quality control of fiber optic coil winding.**

Abstract. The paper presents the developed visual observation system which is used for quality control of fiber coil winding of fiber-optical gyroscope. Existing analogues, the design of system and a principle of its work are described. The important place is occupied with examples of work of system regarding definition of defects of winding.

УДК 519.6:527

В.А. БОТНЕВ
(Санкт-Петербургский политехнический университет им. Петра Великого)

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЧЕК ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ОРТОДРОМИЧЕСКОГО ОТРЕЗКА С ЛОКСОДРОМИЧЕСКИМ НА ПОВЕРХНОСТИ СФЕРОИДА

Предложен алгоритм для нахождения точки пересечения двух отрезков на поверхности эллипсоида вращения. Представленный метод обеспечивает высокую точность и необходимое для практического применения быстродействие. Метод включен в состав программного продукта Navi Sailor и может быть рекомендован для использования в других коммерческих навигационных продуктах, удовлетворяющих международным стандартам.

Введение. В геодезии и многочисленных приложениях навигации часто возникает задача нахождения точки пересечения двух отрезков на поверхности сфероида. Она не имеет аналитического решения, а существующие способы численной реализации обладают определенными недостатками и невысоким быстродействием. Предлагаемый доклад посвящен алгоритму нахождения точек пересечения двух отрезков: ортодромы (кратчайшей линии, соединяющей две точки поверхности) и локсодромы (линии постоянного курса) [1]. Этот алгоритм свободен от недостатков прежних методов и выигрывает у них по быстродействию.

Практические применения. На актуальность предлагаемого метода указывают следующие реальные задачи.

1. Нахождение точек пересечения траекторий. Два объекта движутся по поверхности Земли. Один из них по ортодроме, а другой по локсодроме. Нужно определить точки пересечения их траекторий.
2. Нахождение точек пересечения маршрутов. Даны два маршрута, состоящие из локсодромических и ортодромических отрезков. Нужно найти точки пересечения этих маршрутов.
3. Проверка маршрута на опасности. Даны: маршрут, состоящий из локсодромических и ортодромических отрезков, и набор протяженных объектов, представляющих опасность и заданных локсодромическими или ортодромическими ломаными. Нужно определить, пересекается ли маршрут с этими опасностями, и, если пересекается, то где именно.

Постановка задачи. На поверхности сфероида заданы географические координаты двух пар точек, которые определяют два отрезка, соединяющие одну пару точек кратчайшей линией (ортодромой), а другую линией постоянного курса (локсодромой). Нужно определить, пересекаются ли эти два отрезка, и если пересекаются, то найти все точки пересечения.

Описание алгоритма. Алгоритм сводится к следующей последовательности действий.

Шаг 1. Приведение отрезков к единому диапазону долгот.

Шаг 2. Проверка на отсутствие пересечения ограничивающих отрезки гео-прямоугольников (другое название – сфероидическая трапеция [2]).

Шаг 3. Разбиение при необходимости ортодромического отрезка на две части – в северном и южном полушариях, и применение для каждого из них действий *шага 2*. Только для тех, чьи гео-прямоугольники пересекаются с гео-прямоугольником локсодромического отрезка, осуществляются следующие шаги.

Шаг 4. Переход в проекцию Меркатора [3]: построение по локсодромическому отрезку прямой в этой проекции.

Шаг 5. Формирование функции расстояния со знаком в проекции Меркатора от точек ортодромического отрезка, параметризуемых по расстоянию на сфероиде вдоль этого отрезка от начала отрезка, до указанной в *шаге 4* прямой.

Научный руководитель проф. Устинов С.М.

Шаг 6. Если концы ортодромического отрезка находятся по разные стороны от прямой, то гарантированно есть только одна точка пересечения. Она находится применением одного из универсальных методов нахождения корней функции [4, 5]. Осуществляется проверка, лежит ли точка в пределах локсодромического отрезка. В этом случае работа алгоритма заканчивается.

Шаг 7. Если условие *шага 6* не выполнено, и в своей начальной точке ортодромический отрезок удаляется от прямой, а в конечной сближается с ней (это можно определить по соотношению между азимутом в точке ортодромы и направлением локсодромы), то пересечения заведомо не будет. В этом случае работа алгоритма заканчивается.

Шаг 8. Если условия *шагов 6* и *7* не выполнены, то осуществляется поиск точки на ортодромическом отрезке, где азимут равен направлению локсодромы.

Шаг 9. Если такой точки нет, или она находится по ту же сторону от прямой, что и концы ортодромического отрезка, то пересечения нет, и работа алгоритма заканчивается.

Шаг 10. Если эта точка находится по другую сторону от прямой, то есть ровно две точки пересечения, и они находятся одним из универсальных методов нахождения корня [4, 5]. Для каждого из них осуществляется проверка на принадлежность локсодромического отрезку.

Проверка алгоритма. В составе ранних версий программного продукта Navi Sailor 4000 компании Транзас был реализован другой алгоритм нахождения пересечений отрезков, который основывался на методе деления пополам. Эффективность нового алгоритма оценивалась по сравнению со старым. Для этого случайным образом были сформированы 10^5 наборов из двух отрезков на поверхности Земли. Для каждого такого набора решалась задача определения точек пересечения отрезков. Выяснилось, что время обработки всех наборов отрезков новым алгоритмом в 4,3 раза меньше, чем старым. Кроме того, точность полученного решения для нового алгоритма составила порядка 1 метра, в то время как для старого эта величина могла достигать нескольких десятков метров. Существенный вклад в увеличение эффективности по сравнению со старым алгоритмом внесло более совершенное детектирование ситуаций с заведомым отсутствием пересечений, а также применение вместо метода деления пополам метода Ньютона (знание азимута ортодромы позволяет определять значение производной функции расстояния в проекции Меркатора).

Заключение. Предложен алгоритм нахождения точек пересечения локсодромического и ортодромического отрезков на поверхности сфероида. Этот алгоритм включен в состав коммерческого программного продукта Navi Sailor 4000 [6], разработанного в компании Транзас, для нужд морской навигации. В данном продукте разработанный метод показал высокую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Deakin, R.E.** Geometric Geodesy. Part A / R.E. Deakin, M.N. Hunter // Lecture Notes. School of Mathematical and Geospatial Sciences, RMIT University, Melbourne, Australia, 2008. 140 p.
2. **Морозов В.П.** Курс сфероидической геодезии [Текст]: учеб. для вузов / В.П. Морозов. М.: Недра, 1979. 296 с.
3. **Лебедев П.П.** Картография. Учебное пособие / П.П. Лебедев Академический проект, 2017. 153 с.
4. **Устинов С.М.** Вычислительная математика [Текст]: учеб. для вузов / С.М. Устинов, В.А. Зимницкий // СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 336 с.
5. **Press, W.H.** Numerical Recipes in C, The Art of Scientific Computing, Third Edition / W.H. Press, S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling et al. // Cambridge University Press, 2007. 1235 p.
6. http://www.transas.ru/products/Navi-SailorECS

V.A.Botnev (Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University). **Method for determining cross points of the orthodromic and loxodromic segments on the surface of a spheroid**

Abstract. An algorithm is proposed for finding the intersection points of two segments on the surface of an ellipsoid of revolution. The presented method provides high accuracy and appropriate efficiency for practical applications. The method is included in the Navi Sailor software product and can be recommended for use in other commercial navigation products that meet international standards.

УДК 531.3:681.5.01

А.А. ПРУТЬКО, С.Н. АТРОШЕНКОВ
(ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва», г. Королёв)

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПО РАСХОДУ ТОПЛИВА РАЗВОРОТА КРУПНОГАБАРИТНОЙ ОРБИТАЛЬНОЙ СТАНЦИИ

В работе представлены результаты летного эксперимента по проведению оптимальных по расходу топлива разворотов крупногабаритной орбитальной станции. Для поиска оптимальных траекторий был использован псевдоспектральный метод. Маневр проводился в режиме слежения за траекторией, рассчитанной заранее и заложенной на борт. Результаты эксперимента были признаны успешными и показали существенную экономию топлива, а также сокращение количества включений реактивных двигателей ориентации орбитальной станции.

Введение. В работе представлены результаты летного эксперимента по проведению оптимальных по расходу топлива разворотов по рысканью на ~180° крупногабаритной орбитальной станции с использованием реактивных двигателей. Выполнение ряда задач по программе полёта (стыковки и расстыковки с транспортными кораблями, коррекции орбиты и др.) требует периодической смены ориентации станции. Любой пространственный разворот такой многотонной конструкции невозможен без интенсивной работы реактивных двигателей ориентации и, как следствие, значительного расхода рабочего тела. В настоящей работе представлены результаты по расходам топлива и количеству включений двигателей ориентации во время проведения оптимальных маневров.

Оптимальные по расходу топлива траектории. В предыдущей работе [1] был описан алгоритм поиска оптимальных по расходу топлива траекторий, использующий псевдоспектральный метод Лобатто [2], для приведения задачи оптимизации к задаче нелинейного математического программирования, которая впоследствии была решена при помощи метода последовательного квадратичного программирования.

Были получены два вида траекторий с фиксированным временем выполнения, с требуемыми массово-инерционными характеристиками, с требуемыми начальными и конечными угловыми скоростями и ориентациями относительно орбитальной системы координат: первый тип траекторий, являющийся локальным минимумом задачи оптимизации; второй тип траекторий, являющийся глобальным минимумом задачи оптимизации.

Было принято решение в летном эксперименте при проведении прямого разворота использовать первый тип траекторий, а при проведении обратного разворота – второй тип траекторий.

Краткое описание алгоритма слежения за траекторией. Разворот осуществляется под управлением на двигателях ориентации орбитальной станции. Командная ориентация и угловая скорость рассчитываются из упорядоченного набора кватернионов ориентации орбитальной станции относительно орбитальной системы координат в равностоящих точках вдоль траектории разворота. Интервал между точками составляет $\Delta t = 55$ с. На каждом вычислительном такте рассчитывается командная ориентация относительно орбитальной системы координат как результат поворота текущего кватерниона $\mathbf{q}_j$ траектории на вектор конечного поворота

$$\vec{\boldsymbol{\theta}}(t) = \frac{\left(t - t_j\right)}{\Delta t}\vec{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{j,j+1}}, \qquad (1)$$

где t – текущее время в секундах, t_i – время в секундах прохождения j-го кватерниона траектории, $\vec{\boldsymbol{\theta}}_{\mathrm{j,j+1}}$ – вектор кратчайшего поворота между j-м и $j+1$-м кватернионами траектории. Командная угловая скорость рассчитывается на каждом такте как сумма векторов орбитальной

угловой скорости и $\vec{\boldsymbol{\theta}}_{j,j+1}/\Delta t$, перепроектируемых на оси связанной системы координат. Таким образом, система управления движением орбитальной станции в таком режиме разворота старается непрерывно отслеживать заложенную на борт траекторию.

Результаты летного эксперимента. Прямой и обратный развороты были проведены штатно и признаны успешными. После проведения летного эксперимента была обработана телеметрическая информация, полученная с орбитальной станции, из которой был получен расход топлива, потребовавшийся для выполнения пространственных маневров, а также информация по количеству включений двигателей ориентации орбитальной станции. В таблице 1 приведена сводная информация по результатам проведения оптимальных разворотов, а также сравнение с разворотом при помощи штатного алгоритма управления, полученного при моделировании.

Таблица 1

Сводная информация по результатам проведения разворотов

Тип разворота	Время, с	Расход топлива, кг	Количество включений
Прямой разворот (небольшой крен)	5400	6,42	469
Обратный разворот (переворот по крену)	5400	4,61	344
Штатный разворот (моделирование)	3000	50,78	2211

Заключение. Летный эксперимент по проведению разработанных оптимальных по расходу топлива траекторий показал существенную экономию расхода топлива, а также значительное сокращение количества включений двигателей ориентации, что позволит продлить их ресурс. В дальнейшем планируется разработка оптимальных траекторий, требующих не более 10 включений двигателей, что является на текущий момент одной из важных задач, а также учет аэродинамики [3] и нагрузок на элементы конструкции [4, 5].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Прутько А.А., Атрошенков С.Н.** Оптимальное управление разворотами больших космических конструкций // Юбилейная XXV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам, СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 345–348.
2. **Garg, D., Patterson, M. A., Hager, W. W., Rao, A. V., Benson, D. A., and Huntington, G. T.**, "An Overview of Three Pseudospectral Methods for the Numerical Solution of Optimal Control Problems," 2009 AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Pittsburgh, PA, August 10–13, 2009.
3. **Атрошенков С.Н., Прутько А.А., Крылов А.Н., Крылов Н.А., Губарев Ф.В.** Моделирование сил и моментов сил набегающего потока атмосферы в целях верификации динамических режимов системы управления движением и навигации МКС и синтеза оптимального управления // Космическая техника и технологии. 2017. № 4(19). С. 72–88.
4. **Прутько А.А., Сумароков А.В.** О нагрузках на элементы конструкции Многоцелевого лабораторного модуля на автономном участке полета // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 2. С. 123–138. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-2-123-138.
5. **Прутько А.А., Сумароков А.В.** Использование спектральных методов для анализа собственных частот колебаний конструкции МКС и амплитуды шумов измерителя угловой скорости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 4. С. 59–68. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-4-59-68.

Prutko A.A., S.N. Atroshenkov (S.P. Korolyev Rocket and Space Public Corp. Energia, Korolyev, Moscow region).
The results of carrying out the optimal propellant maneuver of a large-size orbital station

Abstract. In this work there is described the results of flight test carrying out the optimal propellant maneuver at ~180° in yaw of a large-size orbital staion. Performance of several tasks according to flight program (dockings and undockings with transporting spacecraft, orbit adjust maneuvers and etc.) demands periodic change of orbital station attitude. Any spatial maneuver of a large-tonnage construction is impossible without intensive work of jet attitude engines and significant fuel consumption as effect. In this work there are results of fuel consumption and number of jet fires during the flight test.

УДК 629.5.066:621.311

М.А. АНТОНОВА
(ООО «Научно-технологический центр «АНК», Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВТОРИЧНЫХ ХИМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ ТОКА ДЛЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ, УПРАВЛЕНИЯ И СВЯЗИ

Проведен анализ эксплуатационных характеристик кислотных, щелочных и литий-ионных источников тока и физико-химических процессов, протекающих при их эксплуатации в составе систем резервного и бесперебойного электропитания. Отмечено, что ни один тип аккумуляторов не удовлетворяет одновременно всем требованиям данных систем. Предложено решение имеющейся задачи созданием гибридных батарей.

Введение. Современное судно представляет собой сложную иерархическую структуру, состоящую из большого числа подсистем и комплексов, значительная часть которых характеризуется высокой степенью автоматизации [1]. Вследствие чего достаточно остро стоит проблема обеспечения системой бесперебойного и резервного электропитания (СБРЭ) ответственных потребителей, решающих задачи навигации, связи и управления движением, отвечающих за безопасность людей и судовых объектов. Наиболее широко применяются СБРЭ на основе вторичных химических источников тока (ХИТ) – аккумуляторов, с различным электрохимическим составом, и отличающихся номинальными и эксплуатационными характеристиками. Последние определяются природой протекающих в аккумуляторе физико-химических процессов, растянутых во времени, зависящих от внешних воздействий окружающей среды и режимов эксплуатации. Основной задачей доклада является описание этих процессов и их влияния на срок службы и безопасность аккумуляторов и батарей.

Доклад посвящен анализу эксплуатационных характеристик аккумуляторов при работе в составе средств резервного электропитания систем навигации, управления и связи. Обозначены перспективы развития источников тока и аккумуляторных батарей.

Анализ исходных электрических и стоимостных характеристик современных вторичных ХИТ различных электрохимических систем.

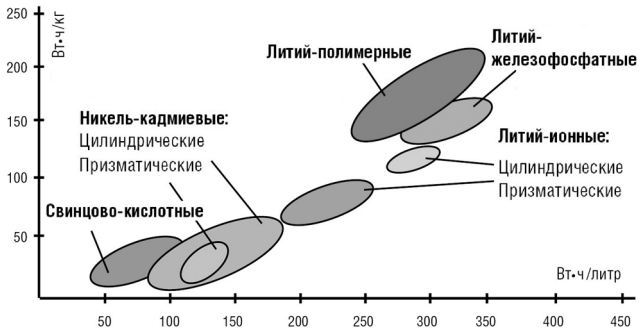


Рис. 1. Удельная энергоемкость ХИТ массовая (Вт·ч/кг) и объемная (Вт·ч/литр) [6]

Электрические параметры аккумулятора обеспечиваются свойствами выбранной электрохимической системы (рис. 1), т.е. материалами отрицательного и положительного электродов (разностью их электрических потенциалов и удельной энергоемкостью каждого), а также свойствами электролита и конструкционными решениями, примененными при его разработке [2, 3]. Анализ информации, представленной в источниках [2, 3, 4, 5], позволяет сделать следующие выводы:

1. Свинцово-кислотные аккумуляторы имеют стоимостное преимущество, однако не являются полностью герметичными (открытые системы требуют постоянного контроля, а герметизированные повышают стоимость аккумулятора, приближая её к литий-ионным), кроме того, данная электрохимическая система имеет низкие удельные характеристики.

2. Никель-кадмиевые аккумуляторы наряду с высокой стоимостью имеют невысокие удельные характеристики, однако это компенсируется широким диапазоном рабочих температур и полной герметичностью за счет замкнутого кислородного и водородного циклов внутри корпуса аккумулятора.

3. Литий-ионные системы имеют самые высокие удельные характеристики и относительно низкую стоимость самих ХИТ, однако нуждаются в сложной и дорогостоящей системе контроля из-за пожароопасности и метастабильности компонентов аккумуляторов. Наиболее безопасные типы литий-ионных аккумуляторов имеют невысокие удельные характеристики.

Эксплуатационные характеристики вторичных ХИТ, входящих в состав СБРЭ систем навигации, управления и связи. Рассматривая эксплуатационные характеристики ХИТ [2, 3, 4, 5], необходимо учесть режимы их эксплуатации в составе СБРЭ (буферный и аварийный), а также влияние протекающих при этом физико-химических процессов внутри аккумулятора. Для буферного режима характерно длительное нахождение аккумуляторов в режиме постоянного напряжения при ограничении тока, а также нерегулярные и неглубокие разряды [3], оказывающие влияние на морфологию активной массы электродов различных электрохимических систем и на возникновение "эффекта памяти" у никель-кадмиевых аккумуляторов в частности [2, 4]. Для эффективного использования в буферном режиме подходит только свинцово-кислотный аккумулятор. Аварийный режим характеризуется постоянным компенсационным подзарядом малыми токами или обеспечивается низким саморазрядом аккумулятора в течение длительного времени. Компенсационный подзаряд без должного контроля вызывает повышенное газовыделение и может стать причиной выхода щелочных и кислотных аккумуляторов из строя. Для работы литий-ионных ХИТ в аварийном режиме используются особые алгоритмы заряда и бездействия [7].

Эксплуатационные характеристики зависят от химического состава ХИТ, его конструкционных особенностей и механизма протекания реакций: жидкофазный механизм характеризуется процессом кристаллизации, а твердофазный – процессом изменения структуры электродов. На протекание данных процессов влияет множество факторов: скорость образования ионов, сила тока, концентрация ионов в объеме электролита и в приэлектродном слое, скорость перемешивания электролита под действием диффузии (или под влиянием вибрации), температура, наличие добавок и примесей и т.д. [2, 3, 4]. Каждый физико-химический процесс имеет свои побочные эффекты. Свинцово-кислотные аккумуляторы имеют низкий ресурс работы и высокую способность к деградации в процессе эксплуатации. Никель-кадмиевые ХИТ отличаются длительным сроком службы, высокой стойкостью к внешним условиям и режимам эксплуатации и ремонтопригодностью. Литий-ионные аккумуляторы максимально безопасного химического состава и защищенной конструкции, при должном контроле могут обеспечить высокую мощность и длительный ресурс работы.

Заключение. Выбор типа аккумулятора для СБРЭ среди большого разнообразия представленных на современном рынке вариантов только по исходным электрическим и стоимостным характеристикам аккумулятора не является оптимальным. Необходимо также учитывать и эксплуатационные характеристики (надежность, срок службы, технический ресурс, саморазряд, и т.д.), оказывающие ключевое влияние на реальный ресурс работы. Анализ эксплуатационных характеристик вторичных ХИТ выявил невозможность создания на сегодняшний день универсального аккумулятора для СБРЭ [8]. Возможным направлением дальнейших исследований может стать разработка полного комплекса автоматизированной СБРЭ на базе гибридного использования в составе одного устройства ХИТ нескольких типов аккумуляторов, отвечающих за различные режимы эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Рябинин И.А., Киреев Ю.Н.** Надежность судовых электроэнергетических систем и судового электрооборудования. Л., «Судостроение», 1974. 264 с.
2. **Коровин Н.В.** Новые химические источники тока: Справочник / Под ред. Н.В. Коровина и А.М. Скундина. М.: Издательство МЭИ, 2003.
3. **Варыпаев В.Н.** и др. Химические источники тока: Учеб. пособие для хим.-технол. спец, вузов / В.Н. Варыпаев, М. А. Дасоян, В. А. Никольский; Под ред. В. Н. Варыпаева. М.: Высш. шк., 1990. 240 с.: ил.
4. **Теньковцев В.В., Центер Б.И.** Основы теории и эксплуатации герметичных никель-кадмиевых аккумуляторов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. 96 с.

5. **Каменев Ю.Б., Лушина М.В.** К вопросу о выборе перспективных химических источников тока для подводных лодок и погружных аппаратов. // Системы управления и обработки информации: науч. техн. сб. / ОАО «Концерн «НПО «Аврора» СПб, 2011 Вып. 22 С. 166–181.
6. **José Goldemberg** Perspectives of the World's Energy System // Polytechnica (2018) 1:4–9
7. **Орлов С.Б.** Развитие рынков источников тока новых электрохимических систем // Компоненты и технологии. 2007, № 4, № 5.
8. **Емельянов В.И.** Перспективы совершенствования промышленных аккумуляторных батарей // Электротехнический рынок, 2010. №05. С. 64-69.

M.A. Antonova (STC "ANK", St. Petersburg). **Analysis of exploitation characteristic secondary chemical energy sources for reserve and uninterruptible power supplies being used in systems of navigation, control and radio communication**

Abstract. The analysis of the exploitation and electrical characteristics of acid, alkaline and lithium-ion batteries has been carried out. The features of the physicochemical processes occurring during their exploitation in the buffer and emergency modes of the reserve and uninterruptible power supplies (UPS) are considered. It was found that there are no type of advanced batteries properly meets all the requirements of these systems at the same time. A creation of hybrid systems is proposed as one of the most promising solutions to the existing problem.

УДК 658.512.2-52

М.В. ВЕРЕЩАГИН, Е.Н. КАРТАШЕВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

Р.А. КУЛЕШОВ
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина))

ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛИЗАЦИИ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОРПОРАТИВНОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»

Предложена концепция применения технологии виртуализации аппаратного обеспечения для построения вычислительных сетей и консолидированных серверов.

Введение. Нестабильная работа или выход из строя любой составляющей, на которой реализуется ИТ-сервис, приведет к некорректной его работе. Технология виртуализации позволяет ослабить связь между аппаратным обеспечением и системным программным обеспечением, что позволяет при выходе из строя компонента аппаратного обеспечения продолжить предоставлять ИТ-услугу, что в свою очередь позволит организации продолжать нормально выполнять свои функции, а ИТ-службе восстановить работу аппаратного обеспечения не в авральном порядке [1]. Кроме того, за счет виртуализации локальных сетей (Virtual Local Area Network – VLAN) снижается риск некорректной работы системного и прикладного обеспечения в связи с нарушением прав доступа к ним. Целью работы является построение технологии виртуализации аппаратного обеспечения вычислительных сетей и серверных решений, без которых невозможно создание сквозной технологии проектирования и производства изделий на предприятии (электронных архивов и баз данных нормативно-справочной документации; систем автоматизации, обеспечивающие электронный административный, технический и финансовый документооборот на предприятии).

Использование технологий виртуализации. Виртуализация — предоставление набора вычислительных ресурсов или их логического объединения, абстрагированное от аппаратной реализации, и обеспечивающее при этом логическую изоляцию друг от друга вычислительных процессов, выполняемых на одном физическом ресурсе. В работе рассматриваются подходы к построению сложных вычислительных сетей и кластеров серверов [1].

Виртуализация сетей (VLAN) – это метод, используемый, чтобы объединить сетевые ресурсы в единую платформу. Это достигается за счёт программного обеспечения и услуг, которые позволяют делить хранение, пропускную способность, приложения и другие сетевые ресурсы. Виртуальная сеть обрабатывает всё аппаратное и программное обеспечение в сети как единый набор ресурсов, которые могут быть доступны независимо от физических границ. В простых терминах, виртуализация сети позволяет каждому авторизованному пользователю совместно использовать сетевые ресурсы с одного компьютера.

Виртуальная вычислительная сеть – группа устройств, имеющих возможность взаимодействовать между собой напрямую на канальном уровне, хотя физически при этом они могут быть подключены к разным сетевым коммутаторам. И наоборот, устройства, находящиеся в разных VLAN'ах, невидимы друг для друга на канальном уровне, даже если они подключены к одному коммутатору, и связь между этими устройствами возможна только на сетевом и более высоких уровнях. В современных сетях VLAN — главный механизм для создания логической топологии сети, не зависящей от её физической топологии. VLAN'ы используются для сокращения широковещательного трафика в сети.

Виртуализация серверов реализуется следующим образом. Для начала на физический сервер устанавливается гипервизор. Гипервизор – это специальная операционная система для виртуальных машин. Поверх гипервизора устанавливается одна или несколько гостевых операционных систем, в каждой из которых есть возможность развернуть своё приложение. Для гостевой операционной системы сервер с гипервизором похож на сервер, который состоит из стандартизован-

ных виртуальных серверных компонентов, таких как процессоры, память, контроллеры дисковой подсистемы, жесткие диски и так далее. Набор виртуальных серверных компонентов, гостевой операционной системы и приложения называется виртуальной машиной (*ВМ)*.

Пути внедрения виртуализации серверного оборудования на базе программного обеспечения технологии VMware ESXi привели к построению полноценного кластера с пятью серверами, системы хранения данных для сохранения работоспособности в случае выхода их из строя и двумя оптическими коммутаторами для повышения отказоустойчивости системы [1]. В работе описывается практическая реализация сервисов, которые обеспечили надежную систему управления вычислительными ресурсами в управлении жизненным циклом изделий в единой информационной среде [2]. Эта реализация включает:

- файловый сервер электронного архива;
- сервер систем юридической поддержки «Гарант» и «Консультант+»;
- сервер информационно-справочной системы нормативной документации "Технорма документ";
- терминальный сервер автоматизированной системы управления производством (АСУПр);
- систему электронного документооборота «Тезис»;
- сервер совместной разработки электронных узлов и модулей;
- визуализацию PLM Windchill (средство просмотра трехмерных моделей PLM (англ. product lifecycle management) – это прикладное программное обеспечение для управления жизненным циклом продукции);
- сервер отчетов КИС Галактики и т.п.

Заключение. Результатом работы является создание виртуальной платформы, в которой функционируют 40 подсетей и 100 единиц виртуальных сервисов.

Предлагаемая технология позволила:

1. Консолидировать серверы (возможность использования вычислительных мощностей одного аппаратного сервера несколькими задачами).
2. Повысить скорость восстановления из архива резервной копии образа данных или настроенных операционных систем.
3. Обеспечить возможность дальнейшей масштабируемости других программных продуктов или их клонирование.
4. Повысить надежность функционирования сервисов служб информационных технологий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Виды виртуализации. Виртуализация платформ, [Электронный ресурс], 2012, Режим доступа: http://cyroot.ru/resursy/blog-portala/entry/vidy-virtualizatsii-virtualizatsiya-platform
2. А.Г. Баженов, Е.Н. Карташев, В.С. Красовский. Пути импортозамещения общесистемного и офисного программного обеспечения // XIX Международной научно-практической конференции МОРИНТЕХ-ПРАКТИК "Информационные технологии в судостроении-2018».

M.V. Vereshchagin, E.N. Kartashev (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg), **R.A. Kuleshov** (V.I. Ul'yanov (Lenin) St. Petersburg State Electrotecnical University LETI). **Implementation of Hardware Virtualization Technology in Corporate Computer Network of Concern CSRI Elektropribor, JSC**

Abstract. An application concept is proposed for hardware virtualization technology to build computer networks and consolidated servers.

УДК 338.5

М.Р. МЯСНИКОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
Санкт-Петербургский Государственный Экономический Университет)

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ

Рассматриваются вопросы оценки затрат на создание высокотехнологичного программного обеспечения. Предлагается разработка актуальной методики оценки в виде параметрической модели на основе отбора факторов и анализа фактических данных по разработанным программам.

Введение. Сегодня в мировой теории и практике оценивания затрат по разработке программных продуктов существует большое количество инструментов, которые можно свести к трем группам: экспертные оценки, опытно-статистические методики и параметрические модели [1]. Многочисленные исследования показывают, что последняя группа инструментов обеспечивает наиболее точный результат с высокой степенью надежности [2, 4]. Однако не все параметрические модели в равной степени применимы для определения затрат на разработку программ различного профиля [3]. В частности, многие из них оказываются непригодны для оценки современного высокотехнологичного программного обеспечения, используемого, например, в бортовых системах авиационной и космической отрасли, военной продукции и атомной энергетике [5]. Большинство существующих моделей опираются на показатель размера в строках исходного кода, как на наиболее существенный «драйвер затрат» [6], но для рассматриваемого класса программного обеспечения (ПО) данный фактор не может являться самым значимым. В этом классе ПО гораздо более важную роль играет сложность математических алгоритмов и внутренней логики программы. Цель настоящего исследования заключается в разработке актуальной модели оценки затрат ПО реального времени, предназначенного для автоматизированного управления и обработки информации, поступающей от внешних объектов.

Разработка модели. К разрабатываемой модели предъявляются следующие требования: актуальность исходных данных, достаточная точность, простота использования, возможность использования модели неспециалистом, возможность применения на ранних стадиях проекта, сопоставимость с известными моделями оценки. Последнее требование определило устройство модели, которое основано на принципах одной из наиболее известных методик оценки ПО – COCOMO II (Constructive Cost Model II) [2]. Также модель должна отражать влияние факторов, оказывающих наибольшее влияние на формирование трудозатрат при разработке программ конкретного типа. Для этого на первом этапе исследования непосредственными разработчиками ПО производилась экспертная оценка влияния факторов из широкого перечня. В группу опрашиваемых экспертов вошли более 40 сотрудников организации различных категорий: системные аналитики, специалисты по разработке алгоритмов, программисты. В результате опроса выявлено, что наиболее значимыми факторами в создании ПО первого класса являются сложность, квалификация и коллективные качества исполнителей, применение типовых решений, надежность функционирования, стабильность требований, размер программного обеспечения, объем документации. На следующем этапе исследования ставилась задача анализа фактических данных по разработанному программному обеспечению с целью установления взаимосвязи между итоговыми технико-экономическими показателями и факторами разработки. Кроме этого, необходимо было установить технический фактор-признак, поскольку выявленные на первом этапе факторы скорее определяют условия разработки и требования к разрабатываемым программам. В работе сформирована выборка из 50 готовых программ, по каждой из которых был произведен сбор и анализ информации об исходном коде. Обнаружена высокая зависимость результативного показателя трудозатрат от определений класса, применяемых в методологии объектно-ориентированного программирования. При этом в процессе анализа была установлена относительно слабая зависимость трудозатрат от размера в строках кода, что подтвердило исходную гипотезу о невысокой значимости данного показателя для оценки рассматриваемого класса ПО.

В результате построена параметрическая модели оценки затрат ПО первого класса следующего вида:

$$\text{Tp} = 3{,}517 + 0{,}015DEF + 1{,}951CPX + 0{,}569NEW + 2{,}212RLB - 4{,}148EXP - 2{,}861DOC + 0{,}187RSK\ ,$$

где Tp – трудозатраты в человеко-месяцах, DEF – количество определений класса в терминологии объектно-ориентированного программирования, CPX – уровень реализации в программном обеспечении сложных математических и алгоритмических задач, NEW – новизна (отсутствие технических решений и повторно используемых модулей и решений), RLB – требуемая надежность функционирования, EXP – квалификация программистов и сработанность коллектива, DOC – объем и качество документации, RSK – общий риск по проекту (в том числе из-за нестабильности требований). Все указанные факторы оцениваются экспертом по шкале от 1 до 6 баллов по каждому программному продукту.

Заключение. Предложена параметрическая модель, устанавливающая зависимость трудоемкости от одного технического фактора и шести факторов условий разработки, которая позволяет на основе доступных данных об объекте разработки определить плановую трудоемкость его создания. Дальнейшие направления исследования связаны с увеличением выборки для улучшения репрезентативности модели. Полученная модель может быть использована для прогнозной оценки стоимости продукта и других ключевых показателей проекта (времени разработки, количества необходимых специалистов) в целях определения сметной стоимости проектов при планировании работ и заключении договоров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Арчибальд Р.** Управление высокотехнологичными программами и проектами. 3-е изд. М.: Компания АйТи, ДМК Пресс, 2004. 472 с.
2. **Липаев В.В.** Проектирование и производство сложных заказных программных продуктов. Высшая школа экономики. М.: СИНТЕГ, 2011. 408 с.
3. **Макконнелл С.** Сколько стоит программный проект / пер. с англ. М.: «Русская Редакция»: СПб.: Питер, 2007. 297 с.
4. **Шафер Д., Фатрелл Р., Шафер Л.** Управление программными проектами: достижение оптимального качества при минимуме затрат – пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1136 с.
5. **Глазова М.А.** Системы оценки стоимости проектов по разработке программного обеспечения // Прикладная информатика. 2008. № 3 (15). С. 12–27.
6. **Сидоров Н.А., Баценко Д.В., Василенко Ю.Н., Щебетин Ю.В.** Модели, методы и средства оценки стоимости программного обеспечения // Проблемы программирования. 2006. С. 290–298.

M.R. Myasnikov (Concern CSRI Elektropribor, JSC; St.-Petersburg State Economical University, St. Petersburg). **Development of the model of Hi-Tech software evaluation**

Abstract. The cost evaluation for the creation of high-tech software is considered in the article. The author proposes to develop the actual evaluation technique as a parametric model based on the selection of factors and analysis of the actual data on the developed software.

УДК 681.51

А.А. АРИСТОВ, М.А. ЕПРИНЦЕВ, Л.С. МАМЕДОВА
(Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЗАИМНОЙ НАВИГАЦИИ И ОРИЕНТАЦИИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ГРУППЕ

Исследуется оптико-электронный метод относительной навигации и ориентации с использованием системы технического зрения для управления группой микроспутников. Он позволит повысить надёжность системы, оптимизировать расход энергии и топлива. Разработаны математическая модель управления, её алгоритм работы.

Введение. В современных реалиях вместо крупногабаритных спутников массой порядка сотен или тысяч килограммов более выгодно использовать системы из спутников весом порядка десяти килограммов. При этом повышается надёжность, так как группа спутников способна продолжить выполнять поставленную задачу после потери нескольких аппаратов. Также обеспечивается некоторое понижение стоимости всего проекта за счёт уменьшения массогабаритных характеристик и сложности изготовления отдельных спутников, возможность вывода на орбиту нескольких спутников, принадлежащих разным системам.

Для относительной навигации и ориентации микрокосмических аппаратов (МКА) можно использовать оптико-электронный метод. При его реализации в дальнейшем предстоит решить как теоретические задачи – разработать алгоритмы и математические модели, так и прикладные – разработать систему технического зрения. В данной работе рассматривается алгоритм работы системы технического зрения.

Математическое описание оптико-электронного метода относительной навигации и ориентации МКА. Для проведения исследований используется модель спутника формата cubesat (рис. 1). Рассмотрим на её примере схему оптико-электронной относительной навигации. На модели установлено 24 инфракрасных светодиода, которые расположены на гранях группами по 4 штуки. Зная геометрические размеры модели и точное расположение светодиодов на каждой грани, можно определить координаты вершин куба. Далее в расчётах используются именно эти координаты для упрощения вычислений.

Рис. 1. Модель микроспутника

Положение ведомого спутника относительно ведущего определяется тремя углами Эйлера. Определяются матрицы направляющих косинусов при переходе от исходной системы координат OXYZ, которая связана с ведомым спутником, к системе координат $OX_bY_bZ_b$, связанной с ведущим МКА, несущим камеру. Сначала рассматривается поворот спутника вокруг оси OX на угол ψ [1]. Матрица соответствующего преобразования с переходом от координат [XYZ] к координатам [X'Y'Z'] имеет вид:

$$A_\psi = \begin{bmatrix} \cos\psi & 0 & -\sin\psi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\psi & 0 & \cos\psi \end{bmatrix}. \qquad (1)$$

Аналогично рассматривается поворот вокруг оси OY' на угол ϑ с переходом от координат [X'Y'Z'] к координатам [X''Y''Z''], а также поворот вокруг оси OZ'' на угол γ с переходом от координат [X''Y''Z''] к координатам $[X_bY_bZ_b]$. Матрицы соответствующих преобразований имеют следующий вид:

Научный руководитель к.т.н., доцент Перлюк В.В.

$$A_\vartheta = \begin{bmatrix} \cos\vartheta & \sin\vartheta & 0 \\ -\sin\vartheta & \cos\vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \; A_\gamma = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}. \qquad (2)$$

Полная цепочка преобразований такова:

$$\left[X_b Y_b Z_b\right] = A_\gamma \left[X'Y'Z'\right] = A_\gamma \, A_\vartheta \left[X''Y''Z''\right] = A_\gamma \, A_\vartheta A_\psi \left[XYZ\right], \qquad (3)$$

т.е.

$$\left[X_b Y_b Z_b\right] = A\left[XYZ\right], \qquad (4)$$

где $A = A_\gamma \, A_\vartheta A_\psi$, $\boldsymbol{A}$ – матрица преобразования из начальной системы координат OXYZ в систему координат $OX_bY_bZ_b$, связанную с камерой.

Так как матрица направляющих косинусов A является ортогональной, то можно записать $C = A^{-1} = A^T$. Эта матрица позволяет перейти от системы координат, связанной с камерой, к начальной системе координат. Она используется для дальнейших измерений и имеет следующий вид:

$$C = \begin{bmatrix} \cos\vartheta \cdot \cos\psi & \sin\gamma \cdot \sin\psi - \cos\gamma \cdot \cos\psi \cdot \sin\vartheta & \sin\gamma \cdot \cos\psi \cdot \sin\vartheta + \cos \cdot \sin\psi \\ \sin\vartheta & \cos\gamma \cdot \cos\vartheta & -\sin\gamma \cdot \cos\vartheta \\ -\cos\vartheta \cdot \sin\psi & \cos\gamma \cdot \sin\psi \cdot \sin\vartheta + \sin\gamma \cdot \cos\psi & \cos\gamma \cdot \cos\psi - \sin\gamma \cdot \sin\psi \cdot \sin\vartheta \end{bmatrix}. \qquad (5)$$

Отсюда следует, что:

$$\left[XYZ\right] = C\left[X_b Y_b Z_b\right]. \qquad (6)$$

Для измерений координат и углов Эйлера ведомого спутника используется учебный прибор NI myRIO, который позволяет создать систему технического зрения на основе шаблона state machine (конечный автомат) [2]. Также используются web-камера, среда разработки LabVIEW с подключенными необходимыми библиотеками.

Описание алгоритма работы системы технического зрения. Проведение измерений с помощью NI myRIO, заключается в следующем: камера фотографирует макет, передаёт изображение на вычислитель. Определяются координаты только тех светодиодов, которые находятся на обращённой к камере грани. Так как положение этих светодиодов на спутнике известно, то рассчитывается положение макета относительно камеры. Затем рассчитывается положение макета относительно базовой системы координат с помощью формул, описанных выше.

При калибровочном измерении модель спутника устанавливается на заданном расстоянии и обращается одной гранью к камере. Производится съёмка макета, определяется его положение относительно базовой системы координат. Полученные данные сравниваются с внесёнными в память вычислительной машины требуемыми параметрами. Настраивается фокусное расстояние камеры, проверяются и при необходимости корректируются коэффициенты масштабирования, точность измерения.

После калибровки модель спутника располагается в произвольном положении относительно камеры с помощью регулируемых управляющих элементов (сервоприводов), с помощью системы технического зрения определяется положение спутника в пространстве. Полученные результаты сравниваются с реальными значениями, вычисляются математическое ожидание и дисперсия ошибок многократно проведённых измерений. Эти результаты могут быть использованы для оценки изменения положения модели относительно камеры с течением времени, что обеспечивает возможность управления моделью.

Ранее правильность теоретических исследований была проверена с помощью другой системы технического зрения, непригодной для применения в бортовых условиях из-за низкого быстродействия. На данный момент проведена настройка системы технического зрения, работающей по рассмотренному выше алгоритму, выполнены первые тестовые измерения. Полученные с её помощью результаты подтвердили правильность теоретических исследований.

Заключение. Рассматриваемый в данной работе метод должен обеспечить управление относительным положением находящихся на орбите МКА, образующих единую сеть [3]. Проведены теоретические исследования, разработан алгоритм работы системы технического зрения, выполнена настройка этой системы. В ближайшее время планируется провести исследования по оценке вероятностных характеристик ошибок измерений, добиться повышения быстродействия системы при сохранении приемлемой точности измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лурье А. И.** Аналитическая механика. М. : Физмалит, 1961.
2. **Эд Доуринг.** Основы машинного зрения с NI myRIO. National Technology and Science Press, 2015.
3. **Panferov A., Nebylov A., Brodsky S.** Synthesis of a control system for relative motion of closely spaced satellites // 3rd International Conference and Exhibition on Satellite & Space Missions. Spain, 2017.

A. A. Aristov, M. A. Eprintsev, L. S. Mamedova (State University of Aerospace Instrumentation, SUAI, St Petersburg).
Exploration of the technology of relative navigation and orientation of small satellites in the group

Abstract. It is proposed to use microsatellite systems instead of typical satellites. These systems are more reliable and cost-effective. To manage such a system, a relative navigation method must be developed. This paper describes the opto-electronic method. A mathematical model of control, a new algorithm and the structure of the technical vision system are considered.

УДК 621.396.61

М.С. СИДОРОВА
(АО «ЦНИИАГ», Москва)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕГО ТРАКТА ДАЛЬНОМЕРНОГО МОДУЛЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЛОКАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Рассматривается радиоэлектронный модуль системы локальной навигации летательных аппаратов. Реализована замкнутая модель модуля в части определения времени задержки сигнала, пропорциональной расстоянию от летательного аппарата до наземного радиомаяка. Проанализированы основные результаты моделирования.

Введение. Радиотехническая система локальной навигации (РТСЛН), состоящая из бортового и наземного сегментов оборудования, находит применение в системе посадки летательных аппаратов (ЛА) без использования приемников спутниковых навигационных систем. Бортовой сегмент аппаратуры включает в себя радиоэлектронный модуль (РЭМ), представляющий собой запросчик и малогабаритное антенное устройство, устанавливаемое под фюзеляжем ЛА. Наземный сегмент оборудования включает несколько компактных переносных наземных радиомаяков (НРМ), состоящих из РЭМ с антенным устройством и блоком питания. Принцип работы РТСЛН основан на определении координат ЛА согласно измерениям дальности от бортового РЭМ-запросчика до НРМ (РЭМ-ответчик) с учетом информации о координатах НРМ. Точность измерения дальности между ЛА и НРМ зависит от многих факторов, в частности, от реализации схемотехнической части РЭМ и условий распространения радиосигналов между компонентами дальномерной системы. Основу РЭМ составляет приемо-передающий тракт дециметрового диапазона волн и аппаратура обработки импульсных сигналов на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). Настоящий доклад посвящен созданию имитационной модели приемо-передающего тракта дальномерного модуля РТСЛН для исследования и визуализации процессов преобразования сигнала в тракте при различных условиях, в том числе при воздействии различных помех.

Имитационная модель РЭМ. Предусмотрено функционирование РЭМ в двух режимах: ответчика и запросчика. Наземные и бортовые РЭМ схемотехнически выполнены идентично, а режим работы реализован с помощью соответствующего ПО.

Для осуществления приема полезного сигнала необходимо усиление ЭДС, наводимой в антенне радиоволнами, отделение полезного сигнала от помех и преобразование его к виду, удобному для использования в оконечном устройстве.

Приемный тракт в РЭМ построен по принципу супергетеродинного приемника (рис. 1). При такой схеме построения представляется возможным обеспечить высокую избирательность и чувствительность приемника, большое стабильное усиление. Также данная схема построения приемного тракта обладает удобством перестройки при работе в различных частотных диапазонах.

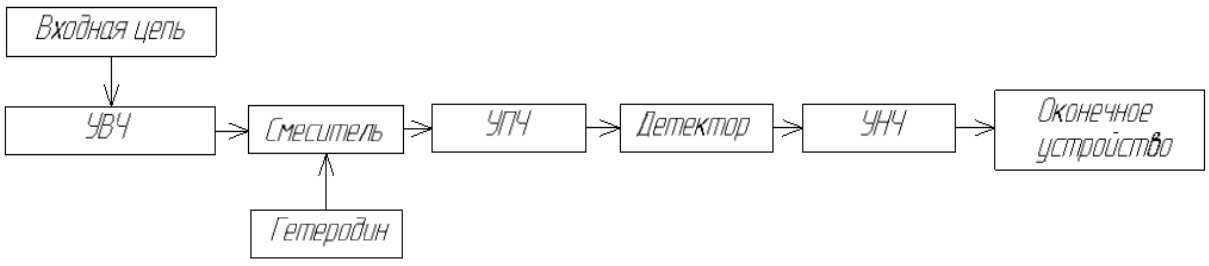


Рис. 1. Структурная схема приемника РЭМ

Научный руководитель д.т.н., начальник научно-технического отделения Щербинин В.В.

Сигнал, поступающий на вход приемного устройства, обладает невысоким уровнем мощности, поскольку ослабевает в процессе распространения. В связи с этим только что поступивший сигнал необходимо усилить. Первичное усиление сигнала осуществляет каскад усиления высокой частоты, в состав которого входят, в основном, малошумящие усилители. В приемниках супергетеродинного принципа построения основное усиление до детектора осуществляется каскадами усилителя промежуточной частоты, настроенными на фиксированную частоту, которая образуется в смесителе в результате взаимодействия входного сигнала и сигнала гетеродина. При прохождении сигнала через детектор происходит выделение низкочастотной составляющей. Для более точного выделения информационного сообщения из низкочастотной составляющей необходимо усилить сигнал до нужного уровня, данное усиление происходит в каскаде усиления низкой частоты.

В приемнике используется система автоматической регулировки усиления, которая работает по алгоритму двоичного взвешивания. Управление системой автоматической регулировки усиления осуществляется с помощью программируемой логики.

В состав схемы передающего устройства входят: блок возбудителя высокочастотного колебания определенной (заданной) частоты, блок умножения частоты и предварительного усиления мощности, каскад выходных усилителей мощности (рис. 2).

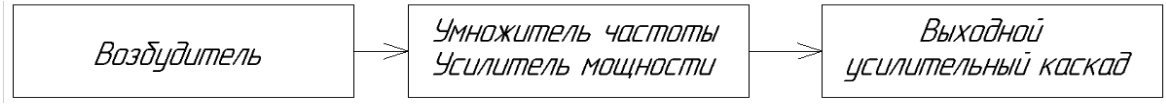


Рис. 2. Функциональная схема передатчика

Имитационная модель приемо-передающего тракта дальномерного модуля РТСЛН приведена на рис. 3, где блоки ПРД1, ПРД2 представляют собой передающий тракт, а блоки ПРМ1 и ПРМ2 отвечают за прием сигнала. В модуле «Трасса» учтено влияние различных факторов на затухание сигнала в процессе его распространения.

При разработке модели использованы [1–3].

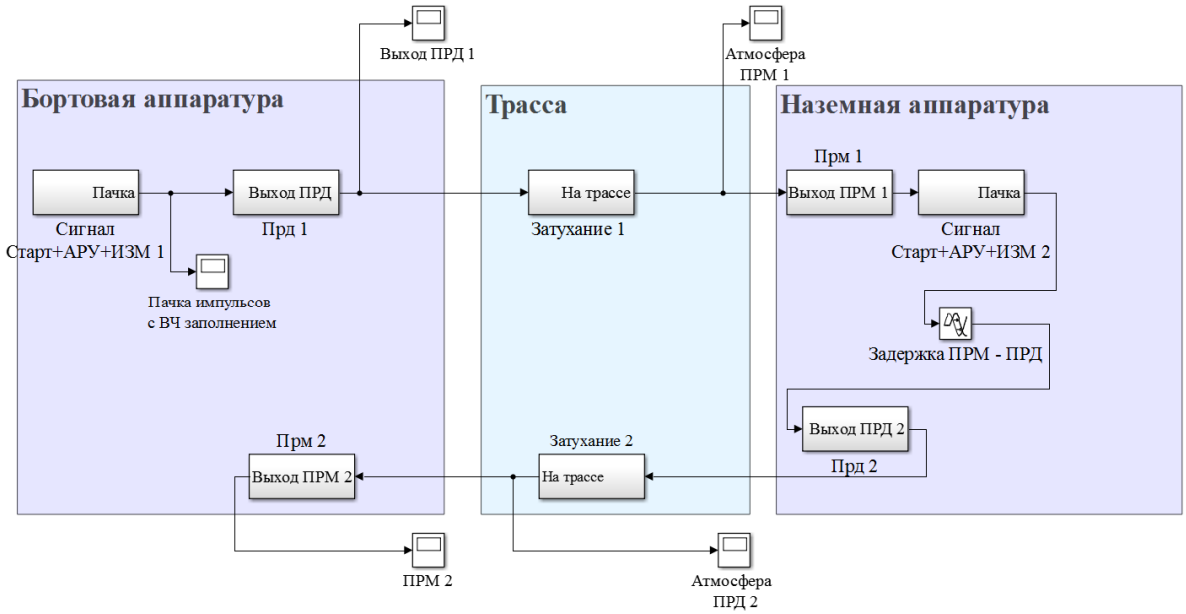


Рис. 3. Имитационная модель

Принятый сигнал – ответ, от НРМ на ЛА, а также временная задержка, определяемая в имитационной модели автоматически, представлены на рис. 4. С использованием измеренной временной задержки вычисляется дальность от ЛА до НРМ, и дальнейшее определение координат ЛА. Для простоты вычислений считается, что передача сигнала-запроса происходит в нулевой момент времени, что соответствует маркеру №1.

Сигналы «Запрос дальности» и «Ответ дальности» представляют собой пачку радиоимпульсов. Для наглядного понимания работы имитационной модели предполагается, что задержка времени, пропорциональная расстоянию от ЛА до НРМ, вычисляется относительно первого импульса в пачке информационного сигнала, что соответствует маркеру 2 на рис. 4.

На рис. 4 по оси абсцисс отложена временная задержка, по оси ординат – амплитуда сигнала, пропорциональная напряжению.

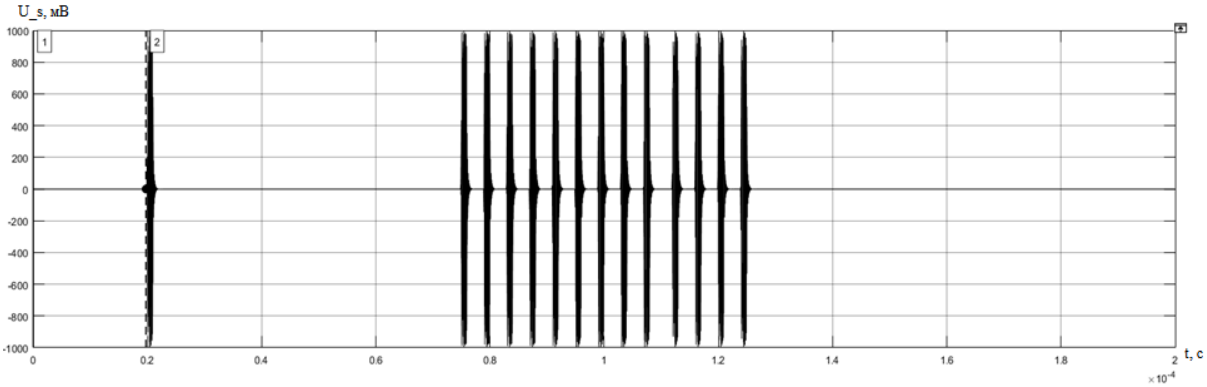


Рис. 4. Принятый сигнал-ответ от НРМ на ЛА

Заключение. Результатом работы является замкнутая модель функционирования РЭМ в части определения задержки сигнала, пропорциональной расстоянию от запросчика до ответчика. На основании вычисленной задержки происходит дальнейшее определение расстояния для расчета координат ЛА.

Модель приемо-передающего тракта реализована с помощью различных сред имитационного моделирования, а также с помощью программ схемотехнического и системотехнического моделирования. Построение модели предполагает её использование как на уровне макромоделей составляющих, так и на уровне схемотехнического анализа. Отдельно рассматривается возможность объединения данных результатов экспериментального исследования и результатов моделирования прототипа. Таким образом, у пользователя появляется инструмент, позволяющий повысить качество и сократить длительность проектной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Макаренко В.** Моделирование радиоэлектронных устройств с помощью программы NI Multisim // Электронные компоненты и системы, 2008, №№ 1–3.
2. **Харнитер Марк Е.** Multisim 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств / Пер. с англ. Осипов А.И. М.: Издательство ДМК Пресс, 2006. 488 с: ил.
3. **Дьяконов В.П.** Simulink 5/6/7 Самоучитель / Издательство ДМК Пресс, 2008. 393 с.

M. S. Sidorova (JSC “Central Research Institute for Automatics and Hydraulics”, Moscow). **Simulation modeling of the transmitting-and-receiving highway of the rangefinder module of the local navigation radio engineering system**

Abstract. The radio-electronic module of the local navigation system, the possible simulation modeling implementation method of the transmitting-and-receiving highway and the analysis of the main results are described in this article.

УДК 004.383.3

А.А. КУМАРИН
(Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева)

ПОСТРОЕНИЕ АВТОМАТА ВЫЧИСЛЕНИЯ СИНУСА И КОСИНУСА В МОДУЛЕ СЛЕЖЕНИЯ ЗА СИГНАЛОМ ПРОГРАММНОГО НАВИГАЦИОННОГО ПРИЕМНИКА

Описана модификация алгоритма вращения координат (CORDIC) для системы слежения за сигналом в программном навигационном приемнике. Он позволяет вычислять значение синуса и косинуса. Модификация позволяет уменьшить число операций для случая, когда требуется вычисление синусов и косинусов углов, последовательно меняющихся на одну и ту же величину. Приведен расчет вычислительной сложности полученного алгоритма, оценено накопление погрешности

Введение. Гибким решением для определения позиции объектов являются навигационные приемники на основе программно определяемого радиоприемника. Одной из вычислительно-затратных стадий работы приёмника является слежение за сигналом [1]. Наиболее трудоемкой здесь является подготовка и работа трех коррелляторов. В подготовку входит вычисление реплики несущей, которая требует вычисления синусов и косинусов. Отличительной особенностью является то, что аргументы являются членами арифметической прогрессии с не часто меняющейся разностью. Для вычисления значений синуса и косинуса на процессорах архитектуры x86 используются специальные ассемблерные инструкции или их неявный вызов с помощью языков высокого уровня. Выполнение операции занимает 170-200 тактов для совмещенного вычисления. При вычислении с использованием цифровых сигнальных процессоров или программируемых логических матриц особенно острой становится проблема большого числа операций с плавающей точкой [2].

В работе используется вычислитель поворотов координат, также известной как CORDIC. Предлагаемый доклад посвящен оптимизации алгоритма вычисления синуса и косинуса для последовательности равноудаленных точек.

Вычислитель CORDIC. В основе вычислителя лежит операция преобразования вектора с помощью матрицы поворота [3]. В алгоритме берется исходный вектор, параметры которого известны. Далее этот вектор последовательно поворачивается на углы, дающие необходимый суммарный угол. Величина этого угла поворота определяется направлениями поворотов $d_i=\pm1$ на каждый из промежуточных углов ϕ_i. Число поворотов обычно фиксировано и равно разрядности искомого результата. Формула итерационного процесса для координат вектора x и y имеет вид:

$$\begin{cases} x_n = \cos\phi_n \left(x_{n-1} - d_n \tan\phi_n y_{n-1} \right), \\ y_n = \cos\phi_n \left(d_n \tan\phi_n x_{n-1} + y_{n-1} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где ϕ_n – n-й угол поворота, d_n – направление n-го поворота.

В такой форме минимизируется число умножений, т.к. произведение косинусов всех углов можно вычислить заранее, оно постоянно. Для избавления от необходимости проводить умножение чисел при умножении вектора на матрицу поворота берутся углы поворота, тангенс которых является степенью числа 2. Таким образом, умножение заменяется на битовый сдвиг на нужное число разрядов. Недостатком большинства программных реализаций является то, что предварительно вычисленные величины углов обычно хранятся в памяти. Во время вычислений они извлекаются из памяти, что создает дополнительные задержки.

Предлагаемые модификации. Требуется уменьшить частоту обращения к памяти, а также исключить невостребованные в случае многократного вычисления синуса и косинуса фиксированного угла операции. Требование к входным данным: известный начальный угол и его синус и косинус, целевой угол поворота не должен превышать 90°.

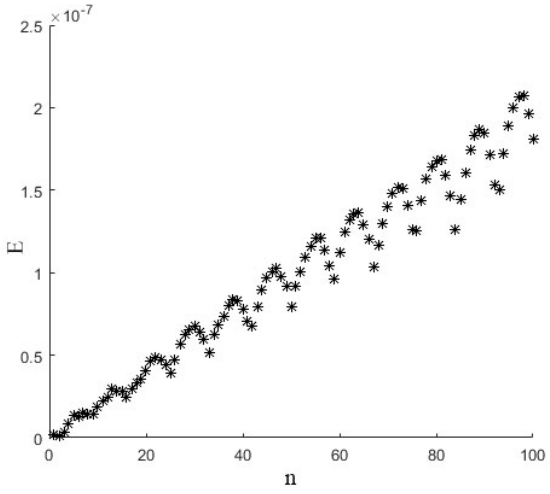
Исходя из того, что угол поворота меняется редко, последовательность направлений итерационных поворотов можно вычислить один раз. Поскольку для хранения направления поворота достаточно одного бита, то для хранения всей последовательности достаточно одной ячейки памяти разрядности, совпадающей с разрядностью результата. Таким образом, нет необходимости обращения к массиву в памяти, что позволяет хранить его в виде одной переменной, которая с большой вероятностью окажется в регистровой памяти. Это уменьшает потенциальные задержки при синхронизации кэша процессора.

В результате работы алгоритма полученный результат отличается от требуемого, так как алгоритм увеличивает модуль вращаемого вектора. Для возвращения модуля вектора к единице необходимо умножить результат на коэффициент, равный произведению обратных косинусов всех промежуточных углов ϕ_i .

При необходимости данный коэффициент может быть учтен в формуле, где используется искомый синус или косинус.

Результаты моделирования. Предложенный алгоритм был смоделирован в среде Matlab. Количество итераций настраивается. На одну итерацию алгоритма приходится 2 операции сложения, 2 сдвига, 2 смены знака. Для масштабирования итогового результата производится еще 2 умножения. Таким образом, общее количество операций оценивается как 6N+2, где N – число итераций. Для 32-битного результата число операций составит порядка 188, что сопоставимо со встроенной функцией. Однако 31 итерация далеко не всегда необходима, возможно сокращение при пониженной разрядности требуемого результата. Кроме того, при использовании программируемых логических микросхем возможно свести задержку всего до 2 тактов на итерацию, что даст задержку в 63 такта для 32-битного результата без использования программируемых таблиц истинности.

Среднее арифметическое разниц посчитанного описанным методом синуса и косинуса с функциями, вычисленными с помощью Matlab от порядкового номера в арифметической прогрессии аргументов (n), представлены на рисунке.



Накопление ошибки

Каждый результат посчитан за 31 итерацию. Из графика можно судить о том, что ошибка накапливается. Для уменьшения этого эффекта требуется периодически сбрасывать ошибку путем начала отсчета от точно известного вектора традиционным алгоритмом, либо заранее ограничивать длину последовательности. Допустимая погрешность значений функций определяется решаемой задачей.

Выигрыш по времени исполнения для процессоров x86 в сравнении с обычным CORDIC составляет порядка 12-30% в зависимости от разрядности.

Заключение. Разработанная модификация алгоритма CORDIC позволяет конкурировать с встроенными командами архитектуры x86, а также экономить логические ячейки при его синтезе на программируемой логической матрице. Особое преимущество алгоритм получает при

реализации на системе на кристалле, где подготовку данных и итоговое масштабирование будет осуществлять процессор, а сам алгоритм – логическая матрица. Оценен рост погрешности. Результаты могут быть использованы в различных реализациях навигационных приемников и иных приложениях вычислительной математики.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Borre K., Kudryavtsev I.** Software Defined GNSS Receiver. 3d IAA-RACTS Conference on Scientific and Technological Experiments on Automatic Space Vehicles and Small Satellites. Samara, Russia, 9-11 sept. 2014. P. 9-14.
2. **Корнилин Д.В., Кудрявцев И.А., Шафран С.В.** Параллельные вычисления на суперкомпьютере для модели специализированного ГНСС приемника определения азимута. Информационные технологии и нанотехнологии. Самара, 25-27 апреля 2017. С. 1676–1678.
3. **Meher P.**, et. al. CORDIC Designs for Fixed Angle of Rotation. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration. 2013. Vol. 21. № 2. P. 217–228.

A.A. Kumarin (Samara University). **Development of a sine and cosine computer for a tracking module of a software navigational receiver**

Abstract. A modification of the coordinate rotation digital computer (CORDIC) algorithm is presented for a tracking module of a software navigational receiver. It allows computation of sine and cosine functions. The presented modification allows to reduce computational load in case of sequential rotation of a vector by the same angle. The resulting computational complexity is similar to x86 build-in function. However, it allows reducing the load by reducing result bit depth, while the build-in's bit depth is fixed. The error accumulation is assessed. A programmed logic or system-on-chip implementation is supposed to consume less logic cells than traditional implementations.

▪ НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ В ШКОЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ ▪

УДК 62-5

Г.М. ВЫДРЕВИЧ, Н.Г. ТЕН
(ГБОУ «Президентский физико-математический лицей №239», Санкт-Петербург)

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ РОБОТОВ В РАМКАХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТА «КОЛОБОК»

Представлен робототехнический проект, созданный для сценического представления по мотивам сказки «Колобок». Описываются конструкция и элементная база четырех роботов в составе проекта и способы их позиционирования. Совокупность конструктивных и алгоритмических приемов позволила обеспечить стабильное взаимодействие роботов и отказоустойчивость всей системы.

Введение. Развитие робототехники приводит к созданию все более сложных, мультифункциональных, многозадачных механизмов. В частности, повсеместно внедряются роботы, которые должны самостоятельно перемещаться в пределах рабочей зоны. Среди них можно выделить робокары, перемещающиеся по производственным помещениям, сервисные роботы, проводящие экскурсии в музеях и выставочных центрах, и роботы, используемые в театральных представлениях и на съемочных площадках. В настоящей работе описывается робототехнический проект, созданный для сценического представления по мотивам сказки «Колобок» и включающий четыре автономных робота: сам Колобок, качели и две платформы с фигурами Зайца и Медведя на одной и Волка с Лисой на другой (рис. 1).

Рис.1. Робототехнический проект «Колобок»

Система позиционирования роботов является ключевой для проекта, поскольку от неё зависит функционирование всей системы. Настоящая работа посвящена описанию указанной системы.

Описание качели. Робот имитирует лесную дорожку, наклон которой задает движение Колобку. Конструкция качели спроектирована в среде SolidWorks и изготовлена из фанеры на лазерном станке. Направляющие, по которым катится Колобок, изготовлены из конструкционного алюминиевого профиля квадратного сечения. Вращение качели осуществляется при помощи двигателя Tetrix [1]. Лазерные дальномеры (1, рис. 2), установленные на расстоянии 70 см друг от друга, используются для управления положением Колобка: контроллер Arduino Uno получает от них данные и передает по протоколу I2C на контроллер LEGO NXT, регулирую-

щий угол наклона качели. На основании показаний акселерометра (6, рис. 2) задается желаемая скорость движения Колобка. Программные экспоненциальные фильтры используются для коррекции зашумленных значений от лазерных дальномеров, повышают помехоустойчивость системы. Программный ПИД-регулятор [2] обеспечивает плавность хода качели и повторяемость движения Колобка.

Описание Колобка. Робот оснащен Arduino Uno, гироскопом (5, рис. 2) и RGB светодиодами с пиксельной адресацией, имитирующими лицо Колобка. Данные с гироскопа используются для демонстрации зрителям лица Колобка всегда в одном положении: глаза сверху, рот внизу. Корпус робота представляет собой напечатанный на 3D-принтере полый шар, состоящий из 3 частей. Средняя часть наполнена маленькими легкими пластмассовыми шариками, рассеивающими кинетическую энергию и обеспечивающими Колобка плавным и медленным движением. Количество шариков подбиралось экспериментально и составило примерно 600 штук по 0,1 г диаметром 6 мм.

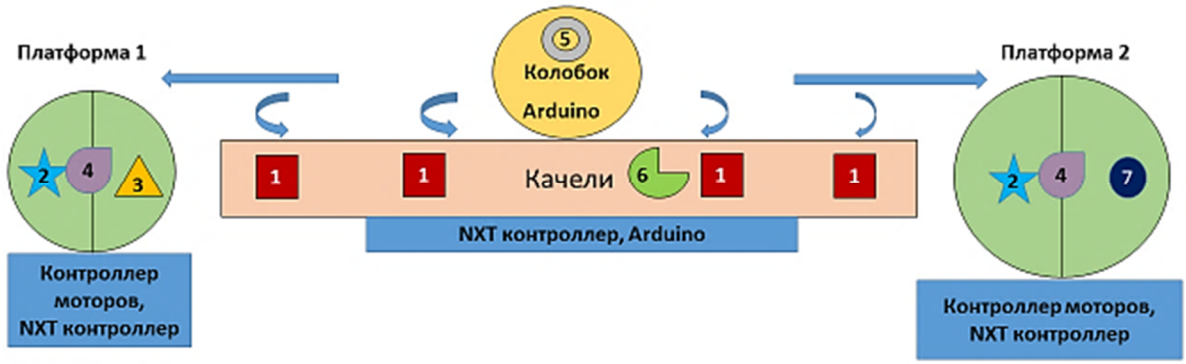


Рис. 2. Схема робототехнического проекта «Колобок»
1 - Лазерные дальномеры; 2 - Инфракрасные дальномеры; 3 - Ультразвуковой дальномер;
4, 5 - Гироскопы; 6 - Акселерометр; 7 - Датчик касания
Стрелками указано взаимодействие роботов при помощи указанных датчиков

Описание платформ с фигурами зверей. В соответствии с сюжетом сказки, в ходе представления Колобок сначала катится к Зайцу, фигура которого установлена на платформе 1. При приближении главного героя срабатывает ультразвуковой дальномер (3, рис. 2), в результате чего Заяц начинает двигать лапами и ушами при помощи трех моторов NXT. Каркас робота изготовлен из алюминиевого профиля.

После Зайца Колобок катится к волку, который располагается на платформе 2. На его теле установлен инфракрасный дальномер (2, рис. 2), активирующий сервомоторы и приводящий тем самым в движение руки и голову Волка. Тело зверя изготовлено из фанеры, конструктора Tetrix и пластиковых водопроводных труб.

Использование различных типов дальномеров обуславливается тем, что фигура Зайца ниже фигур остальных зверей, а, следовательно, менее освещенная, в связи с чем применение инфракрасного датчика нецелесообразно в конструкции Зайца. Отдаление Колобка от платформ, фиксируется соответствующим датчиком расстояния, в результате чего они поворачиваются, демонстрируя следующего героя сказки. Таким образом, при возвращении Колобка к платформе 1, его встречает уже фигура Медведя, принцип действия и конструкция которой аналогичны фигуре Волка, а при возвращении к платформе 2 – фигура Лисы. Последняя сделана из алюминиевых труб и фанеры. Рот Лисы открывается механизмом с верёвочным приводом. На языке Лисы расположен датчик касания (7, рис. 2), после нажатия на который рот закрывается, что фиксируется при помощи энкодера.

Вращение обеих платформ на месте с минимальной силой трения и низком вращательном моменте [3] с высокой повторяемостью движений обеспечивается за счет использования базы из четырех колес: 2 омни-колеса и 2 обычных, управляемых двумя моторами Tetrix. Определение угла поворота платформ осуществляется при помощи гироскопов (4, рис. 2). Обработка сигналов с гироскопов и датчиков расстояния осуществляется при помощи контроллера NXT и

программного дискретного регулятора, реализованного на языке RobotC. Конструкция платформ с фигурами зверей спроектирована в программе Autodesk Inventor.

Заключение. Совокупность конструктивных и алгоритмических приемов, использованных в конструкциях роботов из состава робототехнического проекта «Колобок», позволило обеспечить стабильное взаимодействие роботов и отказоустойчивость всей системы. Проект участвовал во Всемирных соревнованиях роботов Robocup 2018 в г. Монреаль, Канада, в категории OnStage, где занял второе место [4]. Полученные в ходе работы результаты могут быть использованы при проектировании роботов для других театральных или кинематографических представлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Паспорт изделий TETRIX. - Datasheets. https://www.pitsco.com/TETRIX_DC_Gear_Motor
2. **Филиппов С.А.** Робототехника для детей и родителей. СПб.: Наука, 2013. С.176–198.
3. **Филиппов С.А.** Уроки робототехники. Конструкция. Движение. Управление. Лаборатория знаний, 2018 г. С.79–84.
4. Правила соревнований RoboCupJunior OnStage – Rules 2019. https://junior.robocup.org/wp-ontent/uploads/2019Rules/onstage_rules_final_2019.pdf

---

Vydrevich G.M., Ten N.G. (Presidential Lyceum of Physics and Mathematics #239, Saint-Petersburg). **Enabling robotics navigation stability:"Kolobok" case study**

Abstract. A robotics project created for a theatrical performance based on a Russian folk tale "Kolobok" is described. The project components: five robots, their interaction method and movement coordination are given.

УДК 681.51

М.Н. МИХАЙЛОВ
(ГБОУ «Президентский физико-математический лицей №239», Санкт-Петербург)

МЕТОДЫ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ АВТОМОБИЛЕЙ

Представлен обзор известных и перспективных методов определения местоположения автономных автомобилей и проанализирована возможность их применения в автономных роботах-прототипах. С позиции применимости в роботах-прототипах проанализированы ограничения и недостатки датчиков положения, таких как приемники спутниковых навигационных систем, лазерные сканеры, видеокамеры, датчики расстояния и инерциальные системы. Показано, что наиболее перспективным методом создания автономных роботов-прототипов является метод совместного позиционирования.

Введение. В предыдущей работе автора представлены принципы построения автономной робототехнической платформы, способной работать совместно с лесопатологами, собирая данные о деревьях, и дано описание робота “Forester”, являющегося функциональной моделью указанной платформы [1]. Местоположение робота “Forester” определялось по принципу счисления пути на основе анализа видеопотока с горизонтально расположенной камеры. Очевидно, что при таком подходе происходит накопление погрешности определения исчисленных координат, что со временем может привести к неприемлемо высоким погрешностям определения местоположения. Кроме того, робот „Forester“ работал на стенде в помещении, что делало невозможным использование спутниковых навигационных систем (СНС), в то время как следующие поколения роботов-прототипов лаборатории молодёжной робототехники Университета ИТМО подразумевают их использование в условиях открытых стендов, т.е. в условиях, приближенных к автономным автомобилям (АА).

Таким образом, разработка методов позиционирования автономных роботов-прототипов является важной практической задачей.

Предлагаемая работа представляет результаты первого этапа решения задачи – обзор известных и перспективных методов определения местоположения АА и анализ применимости этих методов для создания автономных роботов-прототипов.

Актуальность работы определяется тем, что на сегодняшний день не существует единого подхода к определению местоположения роботов-прототипов, работающих вне помещений, и разработка такого подхода является одной из первоочередных задач прикладной робототехники.

Практическая значимость работы заключается в том, что в результате анализа определен наиболее перспективный подход к определению местоположения автономных роботов-прототипов. Дополнительная практическая значимость работы состоит в том, что полученные в перспективе результаты могут быть использованы в АА.

Требования к точности местоопределния АА. Несмотря на множество исследований в этой области, нам не удалось найти единых (стандартных) требований к навигации АА. В качестве требований мы рассматривали многократно упоминаемую в литературе (см., например, [2]) “субметровую“ погрешность определения плановых координат (географических широты и долготы), полагая, что 90% измерений имеют погрешность менее одного метра по каждой из плановых координат.

Используемые методы позиционирования АА. Благодаря относительной дешевизне наиболее распространенным методом определения местоположения автомобиля является использование приемников СНС. Однако последние не обеспечивают требуемой точности определения местоположения в неблагоприятных условиях, таких как районы плотной городской застройки. Известные методы борьбы с многолучевым распространением сигнала [3] – главной причиной погрешности СНС в неблагоприятных условиях – не дают требуемой точности. По

Научный руководитель руководитель Лаборатории молодёжной робототехники И.А. Лосицкий

этой причине приемники СНС комплексируются с другими датчиками положения. Традиционное комплексирование с инерциальными навигационными системами повышает точность местоопределения АА, но для достижения субметровой погрешности на сравнительно долгом интервале времени (минуты) требуются относительно дорогие инерциальные системы. Данные от бортового компьютера автомобиля, такие как показания одометрических датчиков, улучшают точность позиционирования АА только в условиях, когда длительное время отсутствует сигнал СНС и позиционирование осуществляется при помощи, например, инерциальных систем.

Перспективные методы позиционирования АА. В последнее время для определения местоположения АА используются такие датчики, как лазерные сканеры, системы видеозрения и радары. Известны две проблемы использования подобного рода датчиков: они весьма дороги и, в отличие от СНС и инерциальных навигационных систем, не определяют местоположение пользователя автономно, т.е. в глобальной системе координат, требуя не всегда тривиального перехода от локальной к глобальной координатной системе. В тоже время активно развиваются методы совместного позиционирования АА [4], в которых каждый из автомобилей представляет собой узел сети, обменивающийся данными и сообщениями с другими автомобилями (узлами). Для реализации таких методов на каждом автомобиле дополнительно устанавливается датчик, измеряющий расстояние от автомобиля до ближайших автомобилей. Обмен информацией между автомобилями, включающей в себя псевдодальности, измеренные на каждом из автомобилей, и расстояние между ними, позволяет получить положение каждого из автомобилей с дециметровой точностью даже в условиях плотной городской застройки [4].

Применение методов позиционирования АА для построения роботов-прототипов. Ограничения на стоимость робота-прототипа однозначно определяют конфигурацию датчиков положения: СНС и измерители дальности типа «автомобиль–автомобиль». Они обеспечивают близкую к требуемой точность местоопределения. С учетом наработок лаборатории молодёжной робототехники Университета ИТМО в области видеозрения, система может быть дополнена видеопозиционированием.

Заключение. Проанализирована возможность применения методов позиционирования АА для автономных роботов-прототипов. Показано, что наиболее перспективным методом является комплексирование СНС и измерителей дальности типа «автомобиль–автомобиль». В дальнейшем планируется реализация выбранного метода в следующих поколениях роботов-прототипов лаборатории молодёжной робототехники Университета ИТМО.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mikhaylov M., Lositskii I.** Control and navigation of forest robot // XXV Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, 2018.
2. **Koskinen, Jarkko , et al.** Positioning, location data and GNSS as solution for Autonomous driving, [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://vayla.fi/documents/20485/421308/Koskinen_Aurora_Summit.pdf/bf11703e-fc5a-4377-98ef-d784469e5be0. [дата обращения 02.02.2019].
3. **Bhuiyan, Mohammad Zahidul and Lohan, Elena Simona.** Advanced Multipath Mitigation Techniques for Satellite-Based Positioning Applications, *International Journal of Navigation and Observation*, 2010 (10).
4. **Hoang, Minh.** Cooperative multisensor localization for connected vehicles. 2018.

M.N. Mikhaylov (Lyceum 239, St. Petersburg). **Robot “Forester”: concept, design and implementation**

Abstract. Based on the prototype of robot “Forester” developed by the author and his colleagues, the task setting of designing such robots is considered. The actuality of the problem is shown, an example of the solution is given and implementation details are discussed. Design of the neural network used to determine the type of trees is explained, next steps for neural network development are discussed. The robot design and method of determining its location are described too.

УДК 681.51

М.Р. ЛАЗАРЕВ, М.П. ТРУДОВ
(ГБУ ДО Центр детского (юношеского) технического творчества Московского района, Санкт-Петербург)

СИСТЕМА ПОЖАРОТУШЕНИЯ МАЛЫХ ОЧАГОВ ВОЗГОРАНИЯ В ЛЕСНОЙ МЕСТНОСТИ

В работе приводятся результаты разработки прототипа системы пожаротушения для малых очагов возгорания в лесной местности. Для обнаружения очагов возгорания предлагается использовать беспилотный летательный аппарат, оборудованный газоанализатором и оптической системой. Для доставки средств пожаротушения разработан проект ракеты с пусковой установкой и предложен вариант аппаратного обеспечения компонентов системы.

Введение. В современном мире чрезвычайные ситуации природного и техногенного характера являются одной из наиболее актуальных проблем человечества. И одной из таких чрезвычайных ситуаций является лесной пожар. По статистике, ежегодно на нашей планете возникает до 400 тыс. лесных пожаров, около 350 млн. гектаров лесных угодий и зеленых насаждений уничтожаются, а число жертв насчитывается сотнями [1]. Также, лесные пожары являются одним из самых труднодоступных для человека и техники видов природного бедствия. На их устранение могут уходить недели. Данный катаклизм наносит огромный ущерб природным и человеческим ресурсам Земли, поэтому так важно устранять очаги возгорания на стадии их возникновения.

Целью работы является разработка прототипа системы пожаротушения малых очагов возгорания в лесной местности быстрого реагирования, способной самостоятельно определять местоположение очага возгорания и проводить его тушение в кратчайшие сроки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить две задачи: определить положение очага возгорания и доставить средства тушения. Для решения первой задачи предлагается использовать беспилотный летательный аппарат (БПЛА) с установленными на нем оптическим модулем и газоанализатором. В качестве средства доставки предлагается использовать ракету, которая запускается со специальной пусковой установки.

Алгоритм работы системы. БПЛА с помощью собственной системы навигации, оптической системы и газоанализатора устанавливает координаты возникновения очага возгорания. По радиоканалу координаты очага возгорания передаются на пусковую установку, которая вычисляет начальные параметры траектории полета ракеты (угол тангажа и курса) и осуществляет запуск ракеты. При подлете ракеты к очагу возгорания происходит отделение емкости с пожаротушащей смесью и устранение возгорания.

Аппаратный состав системы. Система пожаротушения состоит их трех частей: пусковой установки, ракеты и БПЛА. Пусковая установка может быть реализована на базе платформы Arduino Uno R3 [2] с дополнительным модулем GPS. Также для связи с БПЛА необходим радиоприемник. Вычислительной мощности платформы Arduino UNO R3 достаточно для расчета параметров запуска ракеты и управления сервоприводами направляющей, на которую устанавливается ракета.

На рис. 1 приведена схема ракеты для доставки пожаротушащей смеси. Ракета состоит из двигателя, двух ступеней и «умной» головной части. На этапе разработки прототипа системы можно использовать любой двигатель, применяемый в модельном ракетостроении.

В первой ступени ракеты находится топливо для двигателя системы. Во второй ступени ракеты находится полезная нагрузка — емкость с пожаротушащей жидкостью, состоящей из химических веществ (фосфата аммония, глицерина, карбоната калия и воды), которые при взаи-

Научный руководитель педагог-организатор Кузнецов В.В.

модействии выделяют большое количество углекислого газа, что способствует прекращению горения.

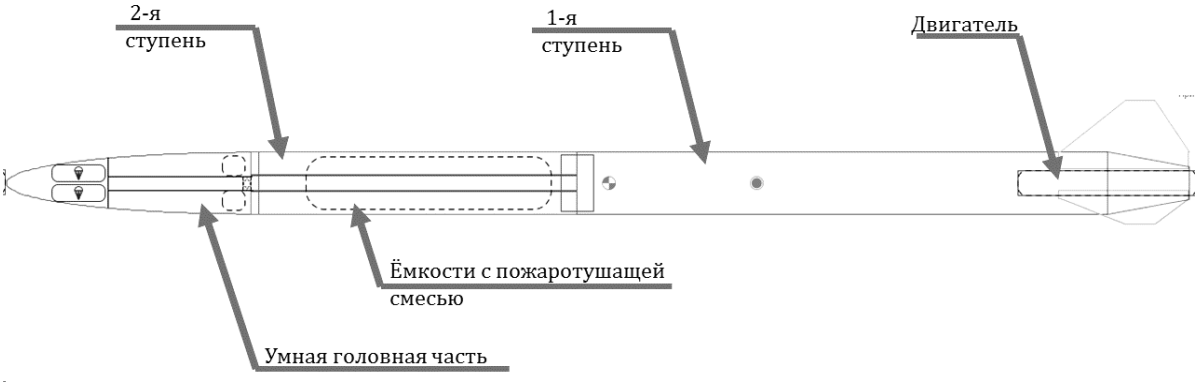


Рис. 1. Схема ракеты

«Умная»» головная часть ракеты построена на базе микроконтроллера AVR Atmega 8A, который управляет запуском ракеты и определяет момент времени отбрасывания головного обтекателя и разбрасывания пожаротушащей смеси. Для определения момента времени выброса полезной нагрузки используется барометр BMP-180. После полного прогорания активного заряда двигателя, ракета начинает движение на пассивном участке по баллистической траектории. При достижении установленной перед пуском области высот (определяется с помощью барометра и микроконтроллера) происходит срабатывание заряда, отбрасывается головной обтекатель и пожаротушащая жидкость разбрасывается на заданную область.

Для определения местоположения очага возгорания предполагается использовать БПЛА. БПЛА может определять свое местоположение и координаты очаг возгорания с помощью газоанализатора и/или оптической системы. После определения координат очага возгорания БПЛА передает эту информацию по радиоканалу на пусковую установку, на которой происходят обработка навигационной информации и расчет необходимых стартовых углов ракеты. Алгоритмы работы этой части системы пожаротушения и ее аппаратная реализация требуют дальнейшей проработки и исследований.

Заключение. Реализация предложенного проекта системы пожаротушения малых очагов возгорания в лесной местности позволит эффективно предотвращать лесные пожары. На данный момент предложенный проект находится в стадии проработки. В рамках дальнейших исследований предполагается: продолжить выбор необходимых материалов и компонентов для создания конструкций частей системы, выполнить детальное проектирование «умной» головной части ракеты, разработать программное обеспечение для пусковой установки, бортового микроконтроллера ракеты и БПЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лесные пожары на территории России: Состояние и проблемы/ Ю. Л. Воробьев, В. А. Акимов, Ю. И. Соколов; Под общ. ред. Ю. Л. Воробьева; МЧС России. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. 312 с.
2. Arduino Uno Rev3 - Boards & Modules – Arduino [Электронный ресурс] // URL: https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3 (Дата обращения 12.08.2019).

M.R. Lazarev, M.P. Trudov (Additional Education Center for Children, St. Petersburg). **Fire-fighting system for forest places**

Abstract. The article presents the results of the development of a prototype fire extinguishing system for small fires in the forest. It is proposed to use an unmanned aerial vehicle equipped with a gas analyzer and an optical system to detect fires. For the delivery of fire-fighting equipment, a missile project with a launcher has been developed. At this stage of the project a variant of the hardware components of the system.

УДК 681.51

И.К. БАКШЕЕВ, А.А. ВЯЗЕМСКИЙ, С.К. ИВАНОВ, С.Д. МОЛЧАНОВ, А.С. ПАПАСИМЕОНИДИ
(ГБУ ДО Центр детского (юношеского) технического творчества Московского района, Санкт-Петербург)

РАЗРАБОТКА ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ МИССИЙ СПУТНИКОВ CANSAT ДЛЯ УЧАСТИЯ В ЧЕМПИОНАТЕ «ВОЗДУШНО-ИНЖЕНЕРНАЯ ШКОЛА»

В работе представлены два проекта дополнительных миссий спутников CanSat для участия в чемпионате «Воздушно-инженерная школа». Первая миссия посвящена использованию наноспутников для предупреждения об опасности схода лавин в горной местности. Вторая миссия исследует возможность генерации кислорода на спутнике путем гидролиза в жестких условиях Марса.

Введение. В конце прошлого века один американский профессор организовал проект по запуску в космос студенческих спутников размером с банку из-под «Кока-колы» объёмом 0,33 л. Этот проект получил название — CanSat [1]. Проект «Cansat в России» появился в 2011 году под эгидой МГУ им. М.В. Ломоносова и поддержке «Роскосмоса» и компании «Иннопрактика». Сегодня организаторы проекта проводят чемпионат «Воздушно-инженерная школа» [2]. Чемпионат включает лигу юниоров (для учащихся 6–8 классов), регулярную (для учащихся 9–11 классов), высшую (для призеров регулярной лиги) и студенческую.

Ракеты для запусков предоставляются организаторами соревнований. Соревнования проходят в несколько этапов, самыми важными из которых являются «Зимняя и Летняя сессии». На «Зимней сессии» команды должны продемонстрировать чертежи аппарата, функциональную, принципиальную и электрическую схемы, а также алгоритмы работы аппарата. На «Летнюю сессию» участники приезжают с готовыми зондами, которые должны пройти предстартовую проверку и сами запуски. После проведения последних команды представляют и защищают полученные результаты. «Зимняя сессия» проходит очно в МГУ, а «Летняя сессия» с 2018 г проводятся в г. Владимир.

Команды чемпионата должны собрать, запрограммировать и испытать свой атмосферный аппарат, придумать и рассчитать для него систему спасения (например, парашют). В ходе квалификационных испытаний оборудование, установленное на аппарате, должно получить и передать по радиоканалу на Землю информацию о его ускорении, температуре и атмосферном давлении. Все вышеперечисленное называется «основной миссией» и является обязательным к исполнению. Каждой командой самостоятельно выбираются «дополнительные» исследовательские задачи, единственным ограничением которых являются массогабаритные характеристики используемого оборудования. Согласно регламенту чемпионата объем спутника увеличился до 0,5 л. Команды стараются максимально креативно подбирать «дополнительные миссии» под актуальные задачи современной космонавтики.

Настоящая работа посвящена описанию двух вариантов дополнительных миссий для чемпионата «Воздушно-инженерная школа».

Миссия в горах. Первая миссия заключается в использовании спутника CanSat для вычисления вероятности схода лавин с использованием расчетов и формул, разработанных Высокогорным геофизическим институтом [3]. При этом необходимо знать разность температур слоев снега, угол склона горы и скорость ветра. Определение последней производится стандартным анемометром, но малогабаритных анемометров по доступной цене на рынке не представлено, поэтому командой был выбран альтернативный способ определения скорости ветра – по его акустическому шуму при помощи микрофона, установленного на верхней крышке спутника (рис. 1). Разность температур слоев снега определяется при помощи трех датчиков температуры одного типа, разнесенных в разные места конструкции. Вычисление угла склона горы осуществляется гироскопом и акселерометром, при этом аппарат фиксируется на склоне при по-

Научный руководитель педагог-организатор Кузнецов В.В.

мощи специальных опор, расположенных с четырех сторон зонда. Во время посадки, на высоте 10-20 м сервопривод поворачивает механизм замка, в результате чего опоры самостоятельно раскрываются под действием пружин.

Рис. 1. Схема спутника CanSat для прогнозирования вероятности схода лавин

Одной из особенностей разрабатываемой конструкции является размещение плат крестом (буквой X), что оставляет место для крепления опор, механизма раскладки и плат основной миссии (рис. 1). Для обеспечения удобства монтажа предложено использовать разъем для проводов, позволяющий мгновенно разъединять пластины между собой.

Миссия на Марсе. Целью этой миссии является создание мобильного атмосферно-поверхностного зонда, который сможет создавать дополнительные ресурсы для жизнеобеспечения колонии людей на Марсе. В процессе перелета с одного места на другое зонд может вырабатывать кислород, необходимый для поддержания жизни. В качестве метода получения кислорода был выбран электролиз воды. Для его реализации создан герметичный отсек (рис. 2) в конструкции зонда, где находятся две колбы – с кислородом и водородом, а также электроды и датчики для контроля процесса электролиза. Чтобы контролировать содержание водорода (как более опасного вещества) установлен датчик водорода. Прибор закреплён на крышке колбы с водородом и подключён через аналого-цифровой преобразователь к бортовому компьютеру. Процесс электролиза регулируется с помощью транзисторного ключа. При достижении концентрации водорода, близкой к критической (4% по объёму), происходит размыкание цепи посредством ключа и электролиз прекращается. Отсек проектируется и печатается на 3D-принтере, далее устанавливаются колбы, электроды и происходит обработка отсека герметиком. Технические характеристики установки при проведении тестовых испытаний: напряжение на источнике питания – 3,7 В , сила тока – 0,3 А, повышение концентрации водорода – со 100 ppm до 1300 ppm за время 10 с. По внешнему диаметру отсек является частью зонда и стыкуется с другими частями конструкции – с нижним отсеком (аккумуляторным) и верхним (приборным). В приборном отсеке находятся платы, радиомодуль, микроконтроллер, а также гироскоп, акселерометр, магнитометр. Верхняя крышка приборного отсека жёстко закрепляется с конструкцией зонда и обладает крюком для крепления парашюта.

Рис.2 Схема спутника CanSat для получения кислорода

Заключение. В ходе выполненных исследований для двух команд, участников чемпионата «Воздушно-инженерная школа», были разработаны дополнительные миссии спутников формата CanSat. В первой миссии представлен проект спутника, который может быть использован на горнолыжных склонах для определения вероятности схода лавины. Во второй миссии исследуется возможность реализации сложных умных систем по синтезу кислорода на базе малогабаритных летательных аппаратов.

Разработанные проекты участвуют в соревнованиях «Воздушной инженерной школы» и успешно прошли «Зимнюю сессию». Планируется запускать спутники в ближайшую «Летнюю сессию» чемпионата.

ЛИТЕРАТУРА

1. CanSat-Wikipedia: [Электронный ресурс] // URL: https://en.wikipedia.org/wiki/CanSat (Дата обращения 12.08.2019).
2. Воздушно-инженерная школа — CanSat в России: [Электронный ресурс] // UR: http://roscansat.com (Дата обращения 12.08.2019).
3. **Зимин М.И.** Руководящий документ «Прогнозирование лавинной опасности», Нальчик, 2000.

I.K. Baksheev, S. K. Ivanov, S.D. Molchanov, A. A. Vyazemsky, A. S. Papasimeonidi (Additional Education Center for Children, St. Petersburg). **Development of additional missions of CanSat satellites for participation in the competition "Air-Engineering School»**

Abstract. The paper presents two projects of additional missions for satellites CanSat for participation in the championship "Air-engineering school". First mission is devoted to the use of nanosatellites to warn about the danger of avalanches in mountainous areas. The second mission explores the possibility of generating oxygen on the satellite by hydrolysis in the harsh conditions of Mars.

УДК 681.51

И.В. ДЫМАШЕВСКАЯ, А.В. ШЕРСТИНОВА, К.А. КУЧЕРОВА, Д.А. САМСОНОВ
(ГБОУ СОШ № 644, «Молодежный творческий Форум Китеж плюс», Санкт-Петербург)

В.В. ПЕРЛЮК
(Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
ГБОУ СОШ № 644, «Молодежный творческий Форум Китеж плюс»)

СИСТЕМА ТРАЕКТОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТОМ МАКЕТА МИКРОСПУТНИКА CANSAT НА УЧАСТКЕ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Анализируется возможность реализации свободно падающего устройства, снабженного системой траекторного управления с использованием аэродинамических рулей на примере макета учебного микроспутника, выполненного в международном формате CanSat. Выполнена конструкторская проработка макета микроспутника. Определена необходимая для управления движением микроспутника площадь поверхности аэродинамических рулей.

Введение. Рассматривается учебный проект макета микроспутника, построенного в стандарте CanSat [1]. Макет запускается ракетой на высоту 1-2 км, отделяется от нее и спускается на парашюте. Во время спуска оборудование микроспутника выполняет заданную условиями соревнований научную миссию и передает информацию о ней на наземную станцию. Настоящая работа посвящена решению задачи управления полетом и точного приземления макета микроспутника в заданной точке. Эта задача является весьма актуальной и значимой в практическом смысле, поскольку при организации запусков макетов CanSat значительная их часть не может быть найдена после приземления.

Результаты проведенных исследований. Проведенный анализ современного состояния «больших» проектов позволяет говорить о том, что системы управления на этапе спуска технических устройств без реактивных двигателей начали активно разрабатываться лишь в последние годы [2]. Хотя впервые такая система в виде авиационной бомбы была реализована еще в 1940-х годах [3], но уже начиная с 1950-х годов управляемые авиационные бомбы стали снабжаться реактивными двигателями.

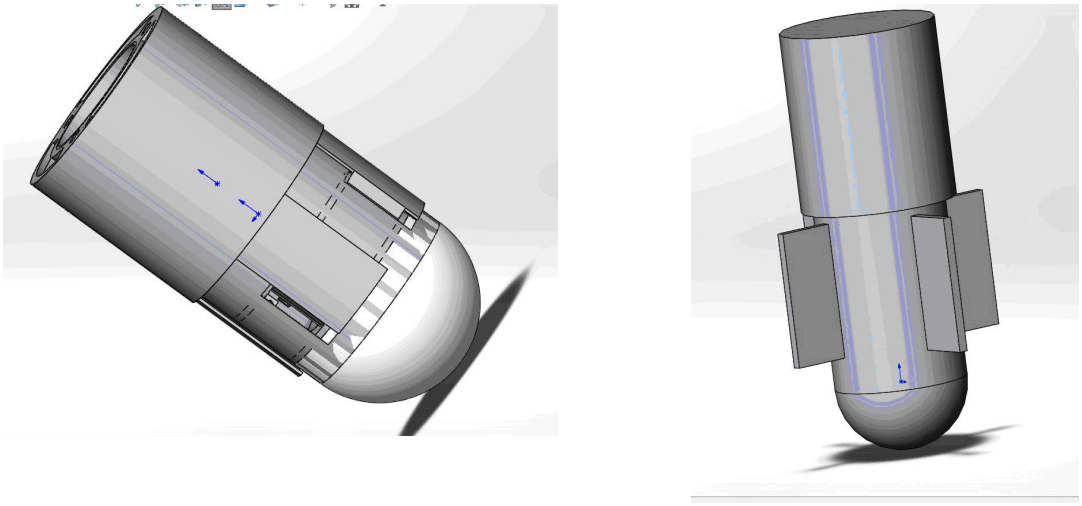
Спуск по баллистической траектории, который применяется на космических кораблях, не обеспечивает высокой точности координат точки их приземления. А при полёте в атмосфере они используют парашютную систему спасения, что делает спускаемый аппарат неуправляемым из-за сильного влияния случайных атмосферных условий (скорость и направление ветра). Разработка устройств, применяющих аэродинамические элементы управления полётом, имеет важное преимущество по сравнению с традиционными аналогами [2] из-за существенно меньшей цены, а также скрытности полета устройства.

Управление полетом макета осуществляется при помощи аэродинамических рулей, которые поворачиваются сервоприводами, построенными на авиамодельных рулевых машинках. Для выработки необходимых управляющих сигналов сервоприводов используется микроконтроллер Arduino NANO. К нему также подключён приемник системы спутниковой навигации (GPS), предназначенный для контроля текущего положения макета в полете. Алгоритм загруженной в микроконтроллер управляющей программы обеспечивает вычисление разности между текущими координатами полёта и требуемыми координатами точки приземления [4], в результате чего рассчитываются углы поворота аэродинамических рулей, которые позволяют уменьшить вычисленную разность. Таким образом осуществляется постоянная коррекция траектории полета, обеспечивающая точное приземление и компенсирующая случайные отклонения, вызванные внешними атмосферными факторами.

Конструкторская проработка макета микроспутника выполнена в пакете трёхмерного компьютерного проектирования Solidworks [5]. Внешний вид разработанного макета представлен на рис. 1. Особенность стандарта CanSat требует ограничивать внешние габариты макета мик-

Научный руководитель зам. дир. ГБОУ СОШ Руденко А.В.

роспутника размерами банки от «Кока-Колы» объемом 0,5 л [6] (рис. 1а). Однако для устойчивого полета объекта цилиндрической формы с четырьмя аэродинамическими рулями соотношение длины корпуса к диаметру должно быть не менее пяти к одному [7]. С целью выполнения обоих условий в проекте используется устройство телескопического раздвижения элементов корпуса (рис. 1б).



а) б)

Рис. 1. Трехмерная модель макета микроспутника в среде Solidworks: а) внешний вид макета микроспутника в собранном состоянии, б) внешний вид макета микроспутника после раздвижения элементов корпуса

Угол поворота аэродинамического руля влияет на силу отклонения $F_{откл}$, действующую на макет и обусловленную воздушным потоком [8], в соответствии с зависимостью

$$F_{откл} = C \cdot \frac{p \cdot V^2}{2} \cdot S \cdot \cos\alpha \,, \qquad (1)$$

где $F_{откл}$ – действующая сила, Н; V – скорость полета макета микроспутника, м/с; S – площадь поверхности аэродинамического руля, м^2; α – угол поворота руля, рад; p – плотность воздуха, Кг/ м^3; C – экспериментально определяемый аэродинамический коэффициент с^2/м.

Зависимость (1) позволяет определить необходимую для управления движением микроспутника площадь поверхности аэродинамических рулей, а также используется в алгоритме управляющей программы.

Заключение. На примере макета микроспутника проанализирована возможность реализации свободно падающего устройства, снабженного системой траекторного управления с использованием аэродинамических рулей. Предварительный расчет показал возможность обеспечить управляемую посадку макета с высоты 1 км в заданную точку с точностью до 50 м (с учетом скорости ветра до 6 м/сек). Для оценки эффективности работы аэродинамических рулей и определения оптимального значения их площади планируется провести цикл компьютерного моделирования аэродинамических процессов в пакете SolidFlow, а также натурный эксперимент путем продувки макета микроспутника в аэродинамической трубе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Небылов А.В., Перлюк В.В., Ху Сяоян.** Опыт разработки бортовых систем макетов микроспутников в рамках международных научно-образовательных программ. Известия вузов приборостроения. 2018. №8.
2. Современные корректируемые авиабомбы (КАБ) США и России, Интернет-журнал. Военное обозрение https://topwar.ru/6792-sovremennye-korrektiruemye-aviabomby-kab-ssha-i-rossii.html
3. Hs.293, Интернет-авиационная энциклопедия «Уголок неба» http://www.airwar.ru/weapon/ab/hs293.html
4. **Остославский И.В., Стражева И.В.** Динамика полета. Траектории летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1969

5. Учебник Solidworks Flow Simulations. Dassault Systems, 2009.
6. Российский Cansat . www.roscansat.com
7. **Шмаков И.А.** Виртуальный физический эксперимент. Томск, 2001. www.esa.int/Education/CanSat/
8. **Трофимова Т.И**. Курс физики. М.: Изд. Центр “Академия”, 2007.

I.V. Dymashevskaya, A.V. Sherstinova, K.A. Kucherova, D.A. Samsonov (GBOU DO “Youth creative forum Kitezh plus", Saint-Petersburg), **V.V. Perliuk** (State University of Aerospace Instrumentation, SUAI, “Youth creative forum Kitezh plus").
Trajector Control System of the Flight of the Cansat Microsprutnik's Flight at the Plot of Free Drop.

Abstract. The project considers the task of controlling the movement at the free-fall stage of a training microsatellite layout, made in the international format CanSat. After separating the training microsatellite model from the launch vehicle at a given height, in accordance with the regulations of the CanSat project, the current position of the model is monitored according to the onboard inertial navigation system and information from the GPS or GLONASS satellite navigation receiver. mockup of the training microsatellite mobile aerodynamic control surfaces, as well as the transformation of its hull with the possibility of the subsequent transition of the flight to the planned mode of This ensures that the training microsatellite layout is placed at a given point on the Earth's surface.

УДК 681.51

Р.А. ФОМИЧЕВ, А.А. ЛАДАНОВ, Г.Г. МАДОЯН, М.Р. КАНЗАФАРОВ
(Клуб образовательной робототехники «РОБОТРЕК», г. Пушкин)

ОБУЧЕНИЕ РАЗРАБОТКЕ АЛГОРИТМА СТАБИЛИЗАЦИИ КВАДРОКОПТЕРА НА МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОМ КОНТРОЛЛЕРЕ ТРЕКДУИНО НА ЗАНЯТИЯХ ПО ОСНОВАМ РОБОТОТЕХНИКИ

Основной объект исследования в работе – квадрокоптер, спроектированный на основе образовательного робототехнического конструктора "HUNA" с использованием многофункционального контроллера "Трекдуино" и дополнительных электронных аксессуаров. На примере разработки алгоритма стабилизации квадрокоптера продемонстрированы возможности использования указанных конструктора и контроллера для преподавания основ робототехники школьникам средней и младшей школы.

Введение. Обучение школьников средней и младшей школы является сложной задачей для любого педагога дополнительного образования. Однако применение детских робототехнических наборов и специальных электронных аксессуаров позволяет существенно упростить задачу изложения сложных алгоритмов, которые используются в робототехнике. В работе описано, как на примере решения задачи стабилизации полета квадрокоптера продемонстрировать школьникам алгоритмы стабилизации квадрокоптера, основанные на применении PID-регуляторов.

Конструкция квадрокоптера. Для сборки квадрокоптера использовался робототехнический конструктор HUNA [1] и многофункциональный контроллер «Трекдуино» [2]. Блок-схема квадрокоптера приведена на рис. 1. В качестве датчика положения квадрокоптера использовался инерциальный модуль MPU 9265, в состав которого входят гироскопы, определяющие углы ориентации квадрокоптера [3]. Данные об угловом положении, выработанные гироскопами, обрабатываются встроенным сигнальным процессором и передаются в контроллер «Трекдуино». Управление квадрокоптером реализовано с использованием мобильного приложения «Роботрек-ПДУ» [4], осуществляющего обмен информацией между мобильным устройством и контроллером по интерфейсу Bluetooth. Контроллер вырабатывает сигналы широтно-импульсной модуляции, поступающие на микросхемы регуляторов оборотов. Регуляторы оборотов генерируют трёхфазный ток, поступающий на бесколлекторные моторы квадрокоптера [5]. На рис. 2 изображен собранный квадрокоптер.

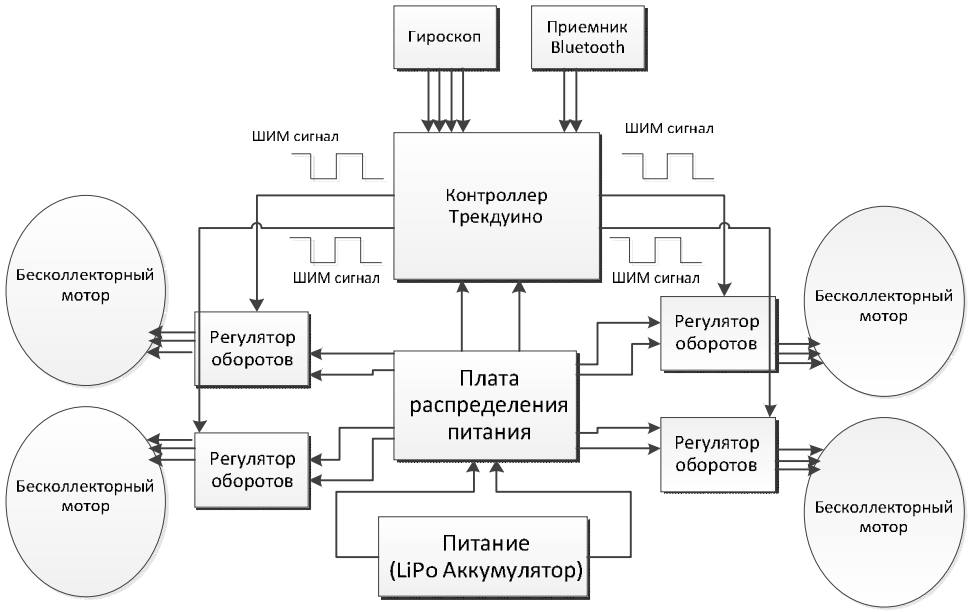


Рис. 1. Блок-схема квадрокоптера

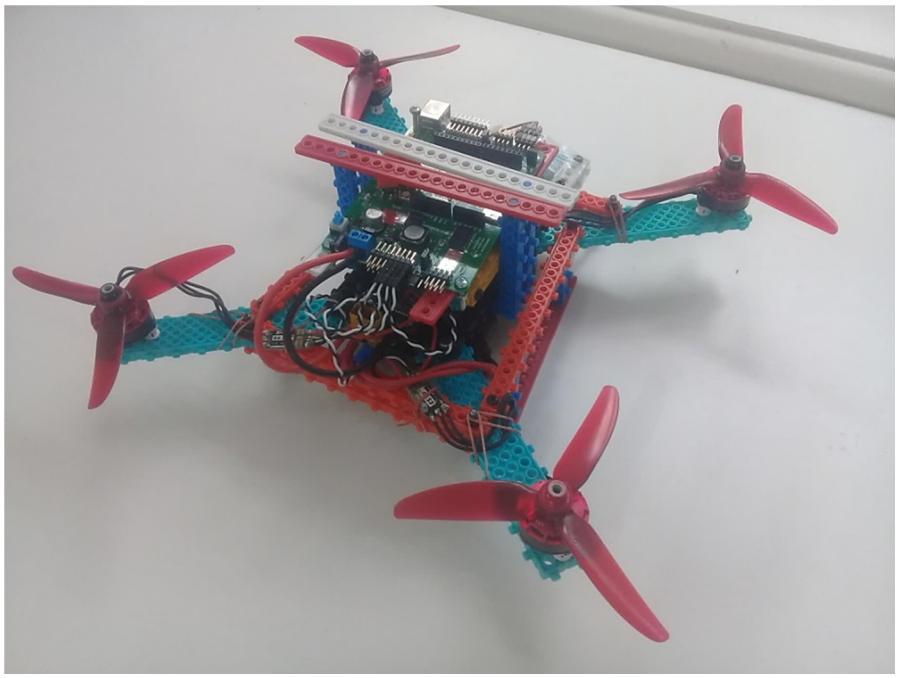


Рис. 2. Квадрокоптер на основе конструктора HUNA и контроллера «Трекдуино»

Реализация алгоритма. Для успешного полета квадрокоптера необходимо стабилизировать его по трем углам: крену, тангажу и рысканию. Стабилизация рыскания обеспечивается за счет вращения соседних винтов в противоположные стороны. В связи с этим пред школьниками ставилась задача разработки PID-регулятора для стабилизации квадрокоптера по крену и тангажу [6].

При обучении разработке алгоритма полета квадрокоптера [7] применение простого языка программирования Arduino и соответствующих библиотек позволило школьникам реализовать алгоритм PID-регулятора. При этом удалось достаточно просто и наглядно продемонстрировать смысл пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора.

Заключение. В результате проведённых школьниками исследований удалось достичь стабилизированного полёта квадрокоптера путем реализации алгоритма PID-регулирования. Выбранные аппаратные компоненты на основе конструктора HUNA, контроллера «Трекдуино» и измерительного модуля MPU 9265 [8] позволили обучающимся успешно освоить простые методы реализации алгоритма стабилизации полета квадрокоптера. Разработанная аппаратная и алгоритмическая база создают основу в дальнейшем для перехода к освоению школьниками более сложных алгоритмов управления квадрокоптером.

ЛИТЕРАТУРА

1. Клуб образовательной робототехники “Роботрек” [электронный ресурс]. URL: https://robotrack-rus.ru.
2. Трекдуино [электронный ресурс]. URL: https://robotrack-rys.ru.
3. Акселерометр MPU-9265 [электронный ресурс]. URL: http://arduino.by.
4. Роботрек ПДУ (приложение для Android). [электронный ресурс]. URL: https://robotrack-rus.ru.
5. **Силантьев О.И.** Как новичку собрать квадрокоптер [электронный ресурс]. URL: https://habr.com.
6. Что такое PID, на что влияет и как настроить [электронный ресурс]. URL: https://profpv.ru.
7. Квадрокоптер на Arduino своими руками [электронный ресурс]. URL: https://arduino-diy.com.
8. Подключение гироскопа GY-521 MPU-6050 к Arduino [электронный ресурс]. URL: https://lesson.iarduino.ru.

R.A. Fomichev, A.A. Ladanov, G.G. Madoyan, M.R. Kanzafarov (Educational robotics club “Robotrack”, Pushkin).
The development of the quadrocopter stabilization algorithm on the trackduino multifunctional controller

Abstract. The main object of research in the work is a quadrocopter, designed on the basis of the educational robotics designer “HUNA” using the multifunctional trackduino controller and additional electronic accessories. Using the example of developing a quadrocopter stabilization algorithm, the possibilities of using a robotic designer and controller for teaching the basics of robotics to middle and lower schoolers are demonstrated.

УДК 629.78

Д.Д. КУПРИЯНОВ
(Молодёжная аэрокосмическая школа института ракетно-космической техники Самарского Университета)

О.Л. СТАРИНОВА
(Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королёва)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСВЕЩЕНИЯ ОКОЛОПОЛЯРНЫХ РАЙОНОВ ЗЕМЛИ КОСМИЧЕСКИМ АППАРАТОМ С СОЛНЕЧНЫМ ПАРУСОМ

Работа посвящена проблеме освещения заданной точки земной поверхности, расположенной в высоких широтах. В качестве осветителя предлагается использовать космический аппарат с солнечным парусом. Поверхность солнечного паруса считается идеально отражающей и ориентированной так, чтобы отражённый луч был направлен на освещаемую точку. Математическая модель движения разработана с учётом нецентральности гравитационного поля и атмосферы Земли, а также светового давления. Проведено численное моделирование движения космического аппарата. Получены результаты возможной длительности освещения для различных рабочих орбит (высота орбиты, наклонение).

Введение. Космический аппарат с солнечным парусом (КАСП) способен выполнять большой спектр различных задач. Он имеет небольшую тягу, что позволяет поддерживать аппарат на цилиндрической орбите, совершать космические перелеты, корректировать параметры своей орбиты, освещать определённые участки на поверхности небесных тел. В околополярных зонах Земли наблюдается полярная ночь – период, когда Солнце не появляется из-за горизонта. Это значительно усложняет работу аварийных и спасательных служб, добычу нефти на арктическом шельфе, понижает температуру поверхности. Использование солнечного паруса для освещения планеты никем не рассматривалось как полноценная миссия для космического аппарата. Следует отметить, что Россия проводила серию похожих экспериментов на орбите. Так в 1993 году на борту корабля «Прогресс» был развернут солнечный парус «Знамя-2», создавший яркое пятно, прошедшее по поверхности Европы. После неудачи эксперимента «Знамя-2,5» проект был закрыт [1]. Предлагаемый доклад посвящён проблеме освещения участка поверхности Земли, находящегося в зоне полярной ночи.

Математическая модель. Рассматривается движение солнечного паруса в пространстве, учитывающее вращение планеты вокруг своей оси и вокруг Солнца. В задаче поле притяжения Земли считается центральным, гравитационные силы со стороны Луны и других небесных тел не учитываются. На рис. 1 изображена используемая инерциальная геоцентрическая система координат. Начало отсчета *O* находится в центре масс Земли, плоскость *xOy* совпадает с плоскостью экватора, ось *x* направлена в точку весеннего равноденствия, от которой ведется отсчет долгот поверхности планеты, ось *z* – по оси вращения планеты, а ось *y* дополняет систему до правой. Широта α и долгота γ освещаемого участка считаются заданными. Угол наклона оси вращения планеты i = 23º, КАСП расположен на геостационарной орбите Земли, высота которой 35786 км над уровнем моря. Указанная орбита выбрана для обеспечения постоянного свечения, однако, она располо-

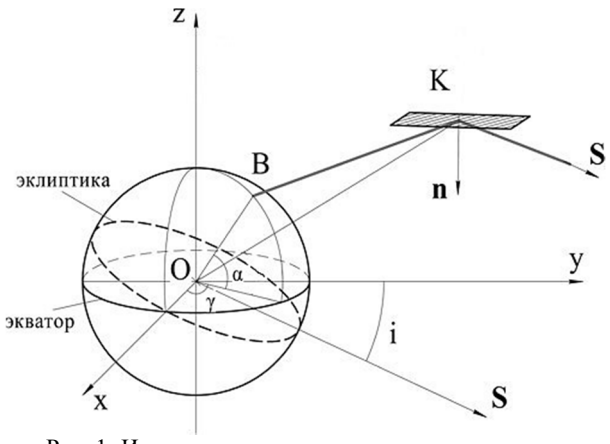


Рис. 1. Используемые координаты, углы и вектора

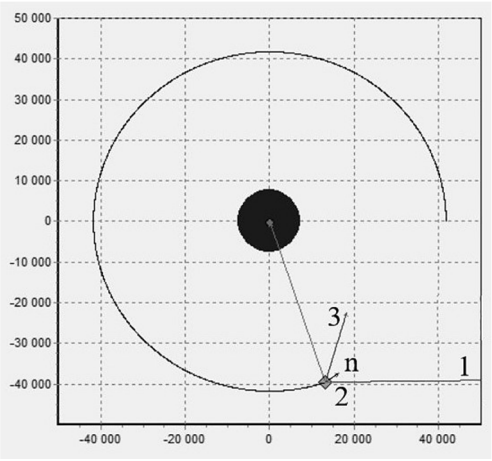


Рис. 2. Окно графического отображения результатов моделирования

жена в плоскости экватора, что увеличивает угол падения солнечных лучей на широтных участках.

Вектор нормали n солнечного паруса определяется как биссектриса угла между падающими лучами света KS (рис. 1) и отраженными лучами света KB (рис. 1), которые должны попадать в заданную точку B на поверхности Земли, где K – центр масс космического аппарата.

Следует отметить, что освещение Земли возможно не на всех участках орбиты [2] – КАСП может попадать в тень планеты или находиться на таких участках орбиты, где аппарат нельзя сориентировать нужным для отражения лучей в заданную точку образом. Для расчёта возможности и времени освещения, был создан программный комплекс с возможностью выбора начальных условий: массы аппарата, площади солнечного паруса, географического расположения освещаемой точки, параметров орбиты КАСП, даты начала движения. На рисунке 2 показано окно графического отображения результатов моделирования. Линия 1-2 показывает направление солнечного излучения, линия 2-3 направление отражённого луча. В результате моделирования получено, что время освещения составит 43200 с для одного витка орбиты при следующих начальных условиях: широта точки освещения $\alpha = 85^{\circ}$, площадь солнечного паруса 500 м^2, масса КАСП 600 кг, начальная высота спутника над геостационарной орбитой 30 км.

Заключение. В результате работы создан программный комплекс. Проведено численное моделирование движения КАСП. Рассчитана длительность освещения заданного околополярного участка с орбиты. Результаты данной работы будут использованы для дальнейшего изучения модели движения КАСП и возможности освещения различных участков Земли и других небесных тел.

ЛИТЕРАТУРА

1. Space Mirror, https://triz-journal.com/space-mirror/
2. Forward, R. L., "Light-Levitated Geostationary Cylinderical Orbits Using Perfortated Light Sails," The Journal of Astronautical Sciences, Vol. 32, No. 2, April-June 1984, pp. 221-226.

O.L.Starinova (Samara National Research University, Samara), **D.D.Kupriyanov** (Junior aerospace school of institute of space rocket engineering of Samara University, Samara). **Modeling of illumination of Earth's near-polar regions by a solar sail spacecraft.**

Abstract. The work is devoted to the problem of illumination of a given point of the Earth's surface located at high latitudes. As an illuminator, it is proposed to use a solar sail spacecraft. The surface of the solar sail is perfectly reflective, and oriented so that the normal was directed to the illuminated point. The mathematical model of motion is developed considering the non-centrality of gravitational field and atmosphere of Earth, as well as the light pressure. The numerical simulation of the spacecraft motion is carried out. The results of possible illumination duration for different working orbits of the spacecraft (orbit height, inclination) are obtained.

▪ ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ▪

УДК 681.51+629.7.05

О.С. ОВЧИННИКОВА, В.Д. ДИШЕЛЬ
(ФГУП «НПЦАП им. Н. А. Пилюгина», Москва)

МЕТОДЫ КОМПЕНСАЦИИ ВЛИЯНИЯ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ТОЧНОСТЬ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Исследуется влияние различного рода возмущений на точность начальной выставки бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС). Предложен алгоритм компенсации влияния колебаний БИНС на точность выставки. Рассматриваются вопросы локализации информационных отказов инерциальных датчиков и восстановления их работоспособности во время предстартовой подготовки.

Введение. Решается задача автономной выставки БИНС, расположенной на ракете-носителе, в условиях колебаний.

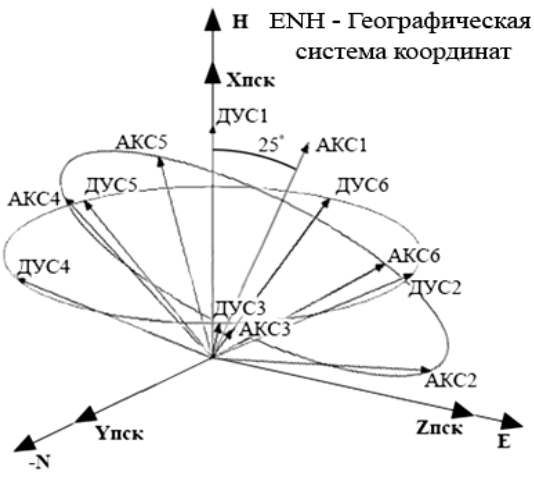


Рис. 1. Ориентация осей чувствительности датчиков БИНС в ПСК

Рассматриваемая БИНС разработана в НПЦАП им. Н.А. Пилюгина и включает 6 акселерометров и 6 датчиков угловой скорости (ДУС). Их оси чувствительности направлены по нормалям к граням додекаэдра. Ориентация осей чувствительности датчиков в приборной системе координат (ПСК) представлена на рис. 1 [1].

Алгоритм начальной выставки, используемый в работе, базируется на сравнении измеренных по показаниям датчиков значений векторов угловой скорости и кажущегося ускорения с их расчетными значениями.

Работа посвящена исследованию влияния и методам компенсации различных возмущений: колебаний объекта, на котором установлена БИНС, инструментальных ошибок датчиков (в том числе шума квантования) – на точность начальной выставки.

Влияние инструментальных ошибок. Инструментальные ошибки разделяются на две категории: 1) ошибки, включающие традиционный набор погрешностей БИНС: смещение нуля, масштабный коэффициент, ошибки ориентации осей чувствительности в ПСК; 2) шумы квантования.

Что касается последних, то эффективным средством борьбы с ними является метод, в основе которого лежит переход от одномоментных показаний инерциальных измерений к их интервальным аналогам. Применительно к задачам навигации объекта в полете [2–4] возможность этого перехода обуславливается специфическими свойствами траекторного и углового движений рассматриваемых классов объектов. Результаты, полученные при использовании данного подхода в решении задачи начальной выставки, о чем будет сказано ниже, подтверждают эффективность метода и при стоянии объекта.

В таблице представлены результаты моделирования процесса начальной выставки при учете тех или иных возмущающих факторов. Результаты получены для случая нахождения объекта на экваторе.

При задании наихудшей комбинации предельных (на уровне 3σ) ошибок акселерометров (смещение нуля 0,0015 м/с^2, ошибка масштабного коэффициента 0,015 %, ошибка ориентации осей чувствительности в ПСК 1 угл. мин.), ошибка горизонтирования БИНС составляет

±0,5 угл. мин. Установлено, что влияние этих ошибок на качество азимутальной выставки существенно меньше влияния погрешностей ДУС.

Таблица

Ошибка азимутальной выставки при различных условиях выставки БИНС

	Номер ДУС с ошибкой в измерениях	Ошибка выставки в азимут, угл. мин.		
		Смещение нуля (0.05 °/ч)	Масштабный коэффициент (0.03%)	Ошибка ориентации осей (1')
A) Без колебаний, с шумом квантования (начальная выставка – 1500 с), угл. мин.	без ошибок	2,98E-05	2,98E-05	2,98E-05
	ДУС1 (ДУС6)	0,0006 (0,003)	0,01 (0,01)	0,01 (0,01)
	ДУС2 (ДУС5)	4,86 (4,86)	0,13 (0,12)	0,41 (0,41)
	ДУС3 (ДУС4)	3,00 (3,01)	0,21 (0,21)	0,20 (0,19)
B) С колебаниями, с шумом квантования, с компенсацией колебаний (накопление - 1000 с, усреднение - 1000 с), угл. мин.	без ошибок	0,93	0,93	0,93
	ДУС1 (ДУС6)	0,93 (0,24)	0,93 (0,93)	0,93 (0,93)
	ДУС2 (ДУС5)	5,79 (4,60)	1,05 (1,05)	0,98 (1,33)
	ДУС3 (ДУС4)	3,93 (2,78)	1,13 (0,73)	1,11 (1,05)
C) С колебаниями, с шумом квантования, с алгоритмом компенсации колебаний, с восстановлением датчиков (коррекция – 3600 с (параллельно))	ДУС1 (ДУС6)	0,22 (0,24)	нет корр.	нет корр.
	ДУС2	0,01	0,89	нет корр.
	ДУС3	-0,05	0,87	0,84
	ДУС4	0,39	нет корр.	0,88
	ДУС5	0,57	0,86	0,73

Каждому ДУС по отдельности задавались погрешности на уровне 3σ. Измерения всех датчиков при этом были искажены шумом квантования. Значения полученных ошибок азимутальной выставки приведены в таблице в строках «А». Из всех составляющих модели погрешностей ДУС наибольшее влияние на азимутальную ошибку оказывает ошибка смещения нуля. Как и ожидалось, наибольшее влияние оказывают те датчики, оси чувствительности которых ориентированы ближе к плоскости параллели – наиболее информативному направлению с точки зрения решения задачи начальной выставки (измеряют восточную составляющую скорости вращения Земли). Ошибки ДУС с симметричными относительно направления на восток осями (см. в скобках) приводят к практически идентичным ошибкам начальной выставки. Значение в строке «без ошибок», близкое к нулю, говорит о почти полной компенсации влияния шума квантования.

Влияние колебаний. В модель были введены колебания объекта с частотой 1,5 Гц и амплитудой 1 м, ориентация плоскости которых в течение каждого испытания была близка к постоянной. Зависимость точности азимутальной выставки от ориентации плоскости колебаний в разных испытаниях представлена на рис. 2. Наибольшую ошибку выставки в азимут вызывают колебания в плоскости меридиана (ΔAz=0°).

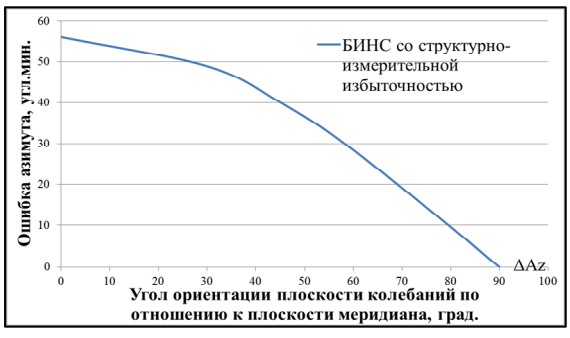


Рис. 2. Зависимость ошибки азимутальной выставки от ориентации плоскости колебаний

Компенсация колебаний. Алгоритм компенсации влияния колебаний объекта основан на нахождении параметров колебаний по накопленным измерениям и дальнейшем исключении колебательной составляющей из показаний ДУС.

Из показаний датчиков вычитаются составляющие угловой скорости колебаний с найденными параметрами, а оставшаяся из-за неточности определения параметров колебательная составляющая усредняется. Затем скорректированные показания ДУС используются для начальной выставки.

Результаты выставки с использованием алгоритма компенсации приведены в таблице в строках «В».

Коррекция параметров модели ошибок. Каждому ДУС по очереди задается тот или иной вид ошибки (значения ошибок приведены в таблице). Находятся шесть разностей между накопленными показаниями отдельных датчиков и проекциями векторов измерений, построенных по накопленным показаниям оставшихся пяти датчиков [2–4]. Наибольшая разность из шести, превышающая установленный порог, интерпретируется как информационный отказ датчика. Найденная разность с использованием функций влияния пересчитывается в поправку и при расчете новых параметров модели погрешностей приписывается «доминирующему фактору», а именно смещению нуля.

Результаты моделирования приведены в строках «С» таблицы. Полученные значения для ошибок смещения нуля эквивалентны случаям задания их на уровне 0,1-0,2 σ. Остальные факторы либо не корректировались (т. к. установленный порог разности не был достигнут на заданном интервале времени), либо их коррекция практически не повысила точность выставки.

На высокоточном трехосном стенде Acutronic были проведены испытания БИНС с решением задачи выставки в условиях колебаний. Они подтвердили полученные результаты.

Заключение. Исследовано влияние различного рода возмущений на точность начальной выставки БИНС: инструментальных погрешностей, колебаний объекта. Предложен алгоритм компенсации влияния колебаний БИНС. Продемонстрирована возможность применения разработанных ранее для полета объекта алгоритмов локализации информационных отказов инерциальных датчиков и восстановления их работоспособности. Эти алгоритмы и найденные зависимости получены для случая нахождения БИНС на экваторе (как и численные значения, приведенные в таблице), однако они справедливы и для низких и средних широт. Полученные результаты моделирования подтверждают работоспособность алгоритмов.

Дальнейшие исследования будут нацелены на разработку более полной модели колебательного движения, ввод в нее параметров, нарушающих регулярность движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дишель В.Д., Межирицкий Е.Л., Немкевич В.А, Сулимов В.Г, Деревянкин А.В.** Принципы обеспечения отказоустойчивости при додекаэдроизбыточной структуре БИБ // Труды МНТК “Системы и комплексы автоматического управления ЛА, посвященной 105-ю с дня рождения акад. Н.А.Пилюгина”, Москва, 2013, НТсб. под общ. ред. акад. РАН Васильева С.Н. Изд. ФГБУ “ИПУ” РАН, С.72–83.
2. **Дишель В.Д., Межирицкий Е.Л., Овчинникова О.С., Быков А.К., Соколова Н.В.** Технология интервально-динамического оценивания и её развитие применительно к задачам БИНС с измерительной избыточностью // Труды ФГУП НПЦ АП. 2018. №1. С. 7–29.
3. **Дишель В.Д., Межирицкий Е.Л., Пояцыка (Овчинникова) О.С., Соколова Н.В.** Технология интервально-динамического оценивания и идентификации как средство повышения точности и отказоустойчивости систем управления космических комплексов выведения сегодняшнего и следующего поколений // XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С.53–63.
4. **Пояцыка (Овчинникова) О.С.** Идентификация некондиционных инерциальных измерителей в составе избыточного бесплатформенного измерительного блока и восстановление их работоспособности // VIII научно-техническая конференция молодых учёных и специалистов, Москва, ФГУП «НПЦАП». 2018. С.151–153.

O.S. Ovchinnikova, V.D. Dishel (Academician Pilyugin Scientific-Production Center of Automatic & Instrument Making, Moscow). **The compensation methods of disturbances influence on strapdown inertial measurement unit alignment accuracy**

Abstract. The various disturbances influence on alignment accuracy is analyzed. The compensation algorithm of vibrations influence on strapdown inertial measurement unit alignment accuracy is proposed. The problems of inertial sensors informational failure localization and their normal performance recovery are considered.

УДК 629.7.052

В.А. ПОЛОСКОВ
(Санкт-Петербургский государственный университет авиационного приборостроения)

УЧЕТ ОСОБЕННОСТЕЙ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПРИ ВЫРАБОТКЕ ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ И ДАТЧИКОВ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ

Рассматриваются два подхода к оцениванию погрешностей бескарданных инерциальных навигационных систем в условиях отсутствия движения центра масс.

Введение. С развитием элементной базы, чувствительных элементов и вычислительных средств широкое распространение для решения различных прикладных задач получили бескарданные инерциальные навигационные системы (БИНС). Уровень ошибок выработки навигационных и динамических параметров определяется точностными характеристиками чувствительных элементов, акселерометров и гироскопов, и эти ошибки имеют нарастающий во времени характер [1, 2, 3]. Как правило, повышение точности выработки параметров обеспечивается решением задачи оценивания ошибок БИНС и медленно меняющихся ошибок измерений по разностным измерениям показаний БИНС и средств внешней коррекции с использованием различных алгоритмов оценивания, например, алгоритмов калмановской фильтрации [3]. В ряде случаев повышения точности можно достичь, используя особенности движения объекта, на котором установлена БИНС, например, отсутствие его движения. Под такую постановку задачи оценивания параметров попадают задачи калибровки БИНС на неподвижном стенде, координаты которого известны, а также задачи с применением ZUPT-технологий, использующих прекращение движения объекта с целью коррекции показаний БИНС по информации о нулевой скорости движения объекта. [4].

В работе производится сравнение двух вариантов ZUPT-коррекции.

Сравнение моделей, описывающих особенности движения объекта. В рамках первого подхода используется стандартная модель ошибок БИНС [3, стр. 190] с вектором состояния:

$$X = \left|\alpha, \beta, \chi, \Delta V_{Xg}, \Delta V_{Yg}, \Delta V_{Zg}, \Delta\varphi, \Delta\lambda, \Delta h, \varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z, \delta a_X, \delta a_Y, \delta a_Z\right|^T, \quad (1)$$

где α – азимутальная ошибка БИНС; β, χ – ошибки построения вертикали; $\Delta\varphi$, $\Delta\lambda$, Δh – ошибки координат, ΔV_{Xg}, ΔV_{Yg}, ΔV_{Zg} – ошибки скоростей в географической системе координат, ε_X, ε_Y, ε_Z, δa_X, δa_Y, δa_Z – систематические ошибки чувствительных элементов, гироскопов и акселерометров соответственно в связанной системе координат.

Факт неподвижности объекта отражается через формирование разностных измерений по координатам и скоростям:

$$\begin{aligned}
Z_\varphi(t) &= \varphi(t) - \varphi_0(t) = \Delta\varphi(t),\\
Z_\lambda(t) &= \lambda(t) - \lambda_0(t) = \Delta\lambda(t),\\
Z_h(t) &= h(t) - h_0(t) = \Delta h(t),\\
Z_{Vxg}(t) &= V_{Xg}(t) - 0 = \Delta V_{Xg}(t),\\
Z_{Vyg}(t) &= V_{Yg}(t) - 0 = \Delta V_{Yg}(t),\\
Z_{Vzg}(t) &= V_{Zg}(t) - 0 = \Delta V_{Zg}(t)
\end{aligned} \quad (2)$$

с последующей их обработкой с использованием фильтра Калмана [5]. Отметим, что в этой модели белошумные ошибки измерений равны нулю, что не допускает использования непрерывного фильтра Калмана в его традиционном варианте. Обычно при обработке таких измерений предполагается, что модель измерений содержит вектор ненулевых ошибок с минимальной

Научный руководитель д.т.н., проф. Тупысев В.А.

возможной матрицей R, обеспечивающей устойчивость вычислений в ковариационном канале фильтра Калмана.

В рамках второго подхода используются уравнения, описывающие ошибки построения вертикали и курса, полученные с учетом точных значений внешней скорости, равных нулю, и координат, известных с некоторыми систематическими ошибками:

$$\dot{\alpha} = \omega_{Xg}\beta - \omega_{Zg}\chi + U\cos\varphi\Delta\varphi - \varepsilon_{Yg}, \quad (3)$$

$$\dot{\beta} = \omega_{Yg}\chi - \omega_{Xg}\alpha - \varepsilon_{Zg}, \quad (4)$$

$$\dot{\chi} = \omega_{Zg}\alpha - \omega_{Yg}\beta - U\sin\varphi\Delta\varphi - \varepsilon_{Xg}, \quad (5)$$

$$\Delta\dot{\varphi} = 0, \quad (6)$$

где ω_{Xg}, ω_{Yg}, ω_{Zg} – проекции угловой скорости связанной с объектом системы координат на оси географической системы; U – угловая скорость вращения Земли; ε_{Xg}, ε_{Yg}, ε_{Zg} – проекции ошибок датчиков угловых скоростей на оси географической системы координат.

Такая модель может быть получена из стандартной модели ошибок БИНС [3, стр. 190] путем приравнивания ошибок скоростей к нулю $\Delta V_{Xg} = 0$, $\Delta V_{Zg} = 0$ или, что то же самое, выводу уравнений ошибок курса и построения вертикали в предположении использования нулевой скорости. Заметим, что при отсутствии ошибок выработки скорости ошибка выработки координаты определяется начальным значением и может быть описана уравнением (6).

При использовании такой модели задача оценивания может быть решена с использованием вектора состояния

$$X = |\alpha, \beta, \chi, \Delta\varphi, \varepsilon_X, \varepsilon_Y, \varepsilon_Z, \delta a_X, \delta a_Y, \delta a_Z|^T. \quad (7)$$

Показания акселерометров можно рассматривать как измерения ошибок построения вертикали [3], уравнения которых имеют вид:

$$\begin{aligned} n_{Xg}(t) &= g\beta + \delta a_{Xg} + \delta a_{Xg}^{\phi}, \\ n_{Yg}(t) &= -g + \delta a_{Yg} + \delta a_{Yg}^{\phi}, \\ n_{Zg}(t) &= -g\chi + \delta a_{Zg} + \delta a_{Zg}^{\phi}, \end{aligned} \quad (8)$$

где δa_{Xg}, δa_{Yg}, δa_{Zg}, δa_{Xg}^{ϕ}, δa_{Yg}^{ϕ}, δa_{Zg}^{ϕ} – проекции медленно меняющихся и белошумных ошибок акселерометров на оси географической системы координат.

В такой постановке для решения задачи оценивания вектора состояния (7) может быть использован непрерывный фильтр Калмана, настроенный на модели (3)–(6), (8). Заметим, что использование непрерывного фильтра Калмана для оценивания имеет скорее теоретический интерес. На практике решение задачи оценивания вектора состояния производится в дискретном времени с выбранным интервалом дискретизации, зависящим в том числе от размерности вектора состояния. Как следствие, это приводит к снижению точности оценивания из-за дискретизации. Отметим, что в рамках первого подхода в отличие от второго имеется еще один источник погрешности оценивания из-за предположения о ненулевых ошибках измерения. С учетом этих факторов можно сделать вывод, что в рамках второго подхода модель поведения вектора состояния и модель измерений значительно проще, что позволяет при одинаковой мощности вычислительных средств уменьшить интервал дискретизации фильтра Калмана и, за счет этого, снизить вычислительные ошибки.

Целью оценочного моделирования является сравнение двух подходов – с использованием вектора состояния (1) и измерений (2) и с использованием вектора состояния (7) и измерений (8) при нулевой скорости объекта на известной широте $\varphi = 60°$ при азимутальной ошибке $\alpha = 10°$ и отклонении вертикали $\beta(0) = \chi(0) = 30'$ с использованием измерительного модуля ICM-20689 [6].

На рисунке 1 представлены результаты моделирования значений СКО в ковариационных каналах фильтров Калмана (верхний график) и разность значений, получаемых в них (нижний график) азимутальных ошибок БИНС. Интервал времени наблюдения равен $T = 3600$ с.

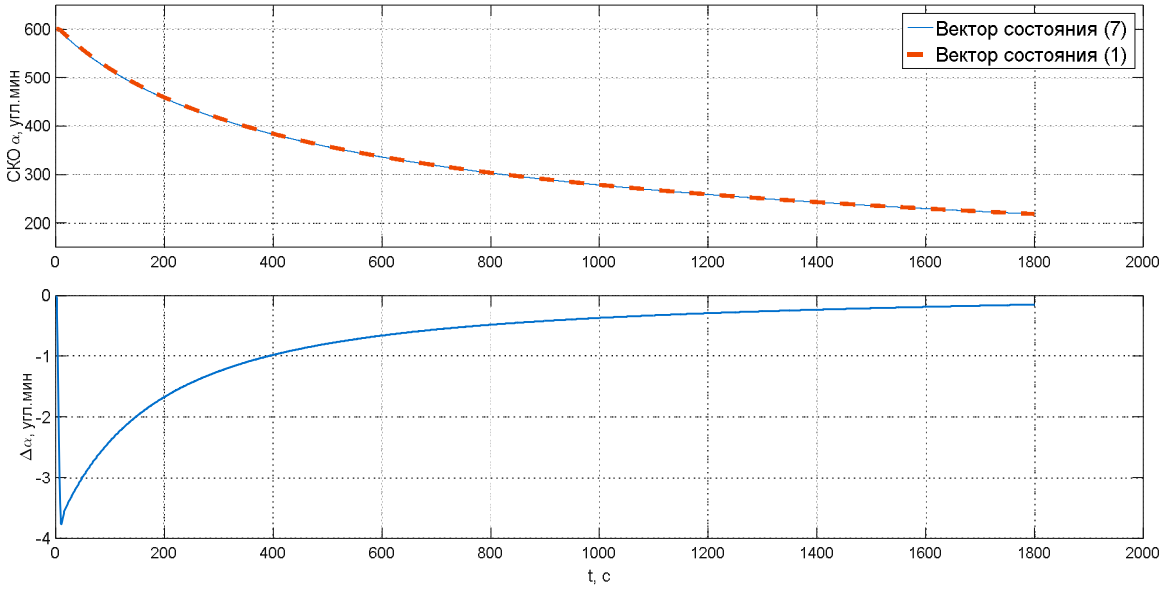


Рис. 1. Значения СКО в ковариационных каналах фильтров (верхний график) и разность параметра α, рассчитанного для двух моделей ошибок БИНС (нижний график)

Заключение. Исходя из представленных графиков, можно сделать вывод о том, что рассмотренные подходы с одним и тем же интервалом дискретизации практически эквивалентны по точности (разность значений составила менее 1%). Однако время, затрачиваемое для вычисления параметров азимутальной ошибки и ошибок построения вертикали, описываемых с помощью уравнений (3)–(6), (8), на 20% меньше, что позволяет снизить вычислительные ошибки за счет уменьшения дискретности фильтра Калмана. Это значение получено на основе анализа времени выполнения программ моделирования работы алгоритмов фильтрации в среде Matlab. Направлением дальнейших исследований является рассмотрение случая с неизменной ориентацией объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анучин О.Н., Емельянцев Г.И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПБ., 1999. 357 с.
2. **Бабич О.А.** Обработка информации в навигационных комплексах. М.: Машиностроение, 1991. 512 с.
3. **Матвеев В. В., Распопов В. Я.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
4. **Sang Kyeong Park, Young Soo Suh**. A Zero Velocity Detection Algorithm Using Inertial Sensors for Pedestrian Navigation Systems. Sensors, 2010, 10(10).
5. **Степанов О. А.** Методы обработки навигационной измерительной информации. СПб.: Университет ИТМО, 2017. 196 с.
6. Техническая документация на модуль ICM-20689 – http://www.invensense.com/wp-content/uploads/2017/08/ICM-20689-v2.2-002.pdf

---

V. A. Poloskov (SPbSUAI, Saint-Petersburg). **Consideration of the features of the object movement while calculating navigation and dynamic parameters using accelerometers and angular velocity sensors.**

Abstract. The article describes an approach to taking into account the features of the object's movement, such as the absence of center of mass movement, changes in angular orientation when calculating navigation and dynamic parameters using information from three accelerometers and angular velocity sensors included in the measurement module.

УДК 531.383-1: 532.1

В.В. ЗАСОРИН, Б.Л. ШАРЫГИН
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТОКОВ ПОТРЕБЛЕНИЯ ГИРОМОТОРОВ НА ТОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВУХСТЕПЕННЫХ ПОПЛАВКОВЫХ ГИРОСКОПОВ

В докладе приведены результаты исследования влияния токов потребления гиромоторов на точностные характеристики двухстепенных поплавковых гироскопов (ДПГ). Исследованиям подвергнуты группы гироскопов, изготовленных в 2012 и 2018 годах. В качестве основного метода исследования использовался корреляционный анализ точностных характеристик гироскопов в зависимости от значений фазных токов. Также определены возможные причины роста токов потребления ДПГ.

Введение. В 2016 году была проведена работа по исследованию причин изменения токов в установившихся режимах гиромоторов (ГМ) приборов ДПГ [1]. Из теории синхронных гистерезисных двигателей [2–4] известно, что ток ГМ зависит от нагрузки на валу, потерь в меди *Рм*, потерь в стали *Рс*, напряжения питания *Un*, степени перевозбуждения синхронного гистерезисного двигателя и соотношения между активной и индуктивной составляющей тока *cos*φ. Однако проведенный анализ токов потребления приборов, изготовленных в 2014–2016 гг., не позволил выявить основные причины увеличения токов в установившимся режиме ГМ. Продолжающийся рост токов ГМ снижает показатели надежности ДПГ и, возможно, является одной из причин увеличения количества сходов гироскопов за последние два года. В сложившихся условиях возникает необходимость исследования влияния токов потребления ГМ на точностные характеристики ДПГ.

Корреляционный анализ точностных характеристик ДПГ. Основным методом исследования влияния токов потребления ГМ на точностные характеристики ДПГ выбран корреляционный анализ [5, 6]. В качестве точностных характеристик гироскопов ДПГ-06 использовались нестабильность скорости ухода (НСУ) в пуске и НСУ от пуска к пуску (НСУПП). При проведении корреляционного анализа точностных характеристик определялись коэффициенты корреляции (КК) со значениями фазных токов ГМ до и после термоциклирования (ТЦ) гироскопа, суммарными значениями фазных токов ГМ до и после ТЦ гироскопа и разностью токов за время ТЦ. Для приборов 2012 года изготовления выявлена умеренная связь (КК=0,416) НСУ только с разностью токов третьей фазы до и после ТЦ. Для НСУПП имеем также положительную умеренную связь с разностью токов в результате ТЦ по всем трем фазам (КК от 0,36 до 0,43). При этом КК между двумя точностными характеристиками всего –0,27.

Для аналогичных приборов, изготовленных в 2018 году, картина корреляционных связей принципиально изменилась: НСУ не коррелирует ни с фазными токами после ТЦ, ни с разностью фазных токов (все КК по модулю меньше 0,2). А вот с НСУПП получили положительную умеренную связь с токами после ТЦ (КК от 0,32 до 0,41) и отрицательную умеренную связь с разностью токов в результате ТЦ по всем трем фазам ГМ (КК от –0,32 до 0,4). Конечно, при интерпретации любых результатов корреляционного анализа необходимо иметь в виду, что коэффициент корреляции является статистическим показателем. Он не содержит предположения, что изучаемые величины находятся в причинно-следственной связи, поэтому любая трактовка корреляционной зависимости должна основываться на информации физико-химического характера.

Отметим известные особенности рассмотренных партий ДПГ-06. ГМ первой партии приборов (2012 г.) изготавливались на роторах из заготовок завода «Красный Октябрь», а вторая партия (2018 г.) комплектовалась на заготовках НПО «Магнетон». Кроме того, произошла смена изготовителя прецизионных камневых опор. Проведен дополнительный корреляционный анализ трех грубых приборов ДПГ-06 (3 класс), изготовленных в 2018 году. Получена весьма высокая отрицательная связь фазных токов после ТЦ по НСУ (КК от –0,94 до –0,99) и весьма высокая положительная связь с разностью токов (КК от 0,87 до 0,92) с НСУПП.

Проанализирована еще одна группа приборов ДПГ-06 изготовленных позднее в 2018 году. По КК токов с НСУ эта группа практически идентична второй группе приборов 2018 г. КК НСУПП близок к нулю, что отличает эту группу от ранее рассмотренных. Поэтому эта группа была разделена на две подгруппы по влиянию ТЦ на изменение токов. Подгруппа с уменьшением фазных токов после ТЦ имеет положительную корреляцию вплоть до умеренной и по НСУ, и по НСУПП. Вторая подгруппа приборов имеет отрицательную связь по обоим точностным параметрам с несколько большими модулями.

Проанализирована группа из 13 азимутальных гироскопов Е32-148-01, изготовленных в 2018 году. Как известно приборы ДПГ-06 и Е32-148-01 имеют унифицированную поплавковую камеру, но отличаются рабочей ориентацией, размерами прецизионных камневых опор и наличием электростатического подвеса у азимутального гироскопа. В качестве основной точностной характеристики для азимутальных гироскопов применена накопленная погрешность скорости ухода за установленный временной интервал (24 или 48 часов). В качестве второй точностной характеристики применяется НСУПП. Оказалось, что по значениям токов после ТЦ корреляционных связей по обоим точностным параметрам не выявлено. А для разностей токов налицо отрицательная умеренная связь с точностью.

Проведен корреляционный анализ для шести приборов Е32-148-02. При этом установлена положительная связь накопленной погрешности за 24 часа с токовыми параметрами с КК от 0,15 до 0,54. Для накопленной погрешности за 48 часов корреляционных связей не выявлено. Из шести приборов были выделены три гироскопа первого класса и для них корреляционная связь накопленной погрешности с токовыми параметрами имеет уровень от заметного до весьма высокого со знаком «минус».

Заключение. Проведенный корреляционный анализ показывает, что увеличение токов потребления ГМ в установившемся режиме приводит к ухудшению точностных характеристик ДПГ. Наиболее выражено это проявляется в партиях ДПГ-06 2018 года изготовления и, по нашему мнению, обусловлено:

- ухудшением качества изоляции обмоточных проводов статоров ГМ;
- изменением соотношения активной и индуктивной составляющих тока статора;
- деградацией характеристик модулей питания ГМ;
- изменением магнитных характеристик готовых роторов.

Ухудшение качества изоляции обмоточных проводов статоров ГМ может приводить к изменению количества или появлению короткозамкнутых (КЗ) витков в обмотке статора как за время ТЦ, так и на заключительных этапах изготовления. КЗ витки приводят к заметному увеличению установившихся токов ГМ, и, как следствие, к дополнительному перегреву статора и ротора ГМ [7]. Повышение температуры приводит к снижению точностных характеристик гироскопов и отрицательно влияет на качество изоляции обмоточных проводов статора. Дальнейшие исследования должны быть направлены на проверку качества изоляции обмоточных проводов статоров ГМ и выяснения причин изменений соотношений активной и индуктивной составляющих тока статора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Протокол по результатам исследования изменения токов в рабочих режимах гиромоторов приборов типа ДПГ, АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2016.
2. **Тарасов В.Н.** Синхронно-гистерезисные двигатели прецизионных гироскопов // Гироскопия и навигация. 2006. № 4(55).
3. **Тарасов В.Н., Нагайцев В.И., Останин Н.Ю., Павлихина Е.В.** Сравнительная оценка прецизионных гироскопических электроприводов на базе синхронных электродвигателей // Гироскопия и навигация. 1996. № 1(12).
4. **Делекторский Б.А., Мастяев Н.З., Орлов И.Н.** Проектирование гироскопических электродвигателей . Машиностроение Москва 1964
5. Tornado 5. Два способа корреляционного анализа в Microsoft Excel. [Электронный ресурс]. URL: http://lumpics.ru/correlation-analysis-in excel (дата обращения: 15.10.2017)
6. **Шарыгин Б.Л.** Результаты применения корреляционного анализа при исследовании проблем в мелкосерийном производстве двухстепенных поплавковых гироскопов // Известия вузов. Приборостроение. Принята к печати

7. Отчет о выполнении расчета теплового режима двухстепенного поплавкового гироскопа Е32-148 КФ2.562.148-01, ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2011 г. (на правах рукописи).

V.V. Zasorin, B.L. Sharygin (State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg). **Investigations of the influence of current consumption of gyromotors on the accuracy characteristics of two-stage float gyroscopes.**

Abstract. The report presents the results of studies to increase the current consumption of two-stage float gyroscopes (DPG). The groups of gyros manufactured in 2012 and 2018 were subjected to research. The main research method was the correlation analysis of the accuracy characteristics of gyroscopes depending on the values of the phase currents at various stages of the gyroscope manufacturing. As a result of the research, the possible causes of the revealed trend of current growth are identified.

УДК 528.56

А.С. АЛЕКСЕЕНКО
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

А.А. КРАСНОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО)

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМЫ КОСВЕННОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ГРАВИМЕТРА

Приведены результаты моделирования погрешностей системы косвенной стабилизации гравиметра. Анализируются результаты испытаний системы косвенной стабилизации на стенде имитации морского волнения.

Введение. Для решения большого количества научных и практических задач необходимо знание абсолютного значения силы тяжести с высокой точностью [1]. С целью измерения таких значений в акватории Мирового океана была предложена концепция совместного использования абсолютного и относительного гравиметров в составе интегрированного геодезического комплекса [2]. Для уменьшения влияния сил инерции на измерительные системы абсолютного и относительного гравиметров необходима их стабилизация в плоскости горизонта. Состав геодезического комплекса может быть упрощен, если реализовать систему косвенной стабилизации гравиметров от единого измерителя углов качки. Учитывая современные тенденции развития систем стабилизации, в качестве такого измерителя может быть использована бескарданная инерциальная навигационная система (БИНС). Целью настоящей работы являлось исследование погрешностей системы косвенной стабилизации гравиметров по данным БИНС. В работе представлены результаты математического моделирования погрешностей системы косвенной стабилизации и результаты стендовых испытаний.

Моделирование погрешностей стабилизации. Описание и структурная схема системы косвенной стабилизации гравиметра приведены в [3]. Работа системы косвенной стабилизации гравиметра по одному каналу описывается следующими дифференциальными уравнениями [4]:

$$\dot{\alpha} = \frac{1}{Jp^2}(M_{TP} \ — \ M_{ДВ}),$$
$$U = (\dot{\theta} - \dot{\alpha})W_1(p) + (\alpha + \Delta\theta)W_2(p),$$
$$M_{ДВ} = k_{ДВ}U,$$

где J – момент инерции кольца карданова подвеса, M_{TP} – момент трения, $M_{ДВ}$ – момент стабилизирующего двигателя, $\Delta\theta$ – ошибка выработки угла качки БИНС, $\dot{\theta}$ – угловая скорость изменения угла качки, α – погрешность стабилизации, $\dot{\alpha}$ – угловая скорость движения кольца карданового подвеса, $W_1(p)$ – передаточная функция корректирующего звена, обеспечивающего демпфирование системы стабилизации и выработку компенсирующего сигнала, $W_2(p)$ – передаточная функция канала управления по рассогласованию, $k_{ДВ}$ – коэффициент, характеризующий двигатель, U – напряжение управления, подаваемое на вход двигателя.

Моделирование погрешностей стабилизации выполнялось в среде Simulink пакета прикладных программ MATLAB. При моделировании задавались погрешности современной высокоточной БИНС производства АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» [5]. Также схема моделирования учитывала временное запаздывание передачи сигналов от БИНС к стабилизатору гравиметра.

Погрешности оценивались для двух типов стабилизаторов, один из которых предназначен для установки чувствительного элемента относительного гравиметра массой 5 кг, а второй – для абсолютного гравиметра массой 60 кг. Соответственно, задавались различные моменты

инерции кардановых колец стабилизаторов. На вход системы подавались значения качки с амплитудой 3° и периодом 10 с, на выходе были получены графики погрешностей стабилизации. Пример графика приведен на рис. 1.

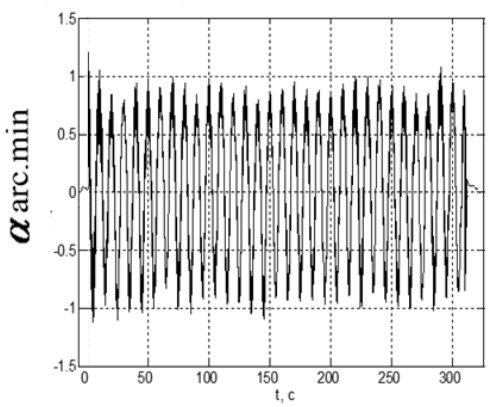


Рис. 1. График погрешности стабилизации по результатам моделирования

В результате моделирования показано, что погрешности стабилизации абсолютного и относительного гравиметров не превышают 1≠, что является удовлетворительным результатом. При точном согласовании осей приборов наиболее важным источником погрешности стабилизации становится временное запаздывание передачи сигналов от БИНС к стабилизатору гравиметра.

Результаты испытаний. Стендовые испытания системы косвенной стабилизации были проведены в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» в феврале 2019 г. Программа испытаний включала в себя проверку динамической погрешности стабилизации на стенде имитации морского волнения «Кречет-2000». Испытаниям подвергался стабилизатор относительного гравиметра, который вместе с БИНС был установлен на единой плите. Оси стабилизатора и БИНС были совмещены с погрешностью менее 10≡. Измерение динамической погрешности стабилизации осуществлялось с использованием цифрового автоколлиматора Trioptics Triangle модели TA500-57-3-103-066. С этой целью на стабилизатор был установлен имитатор чувствительного элемента гравиметра с закрепленным на нем зеркалом. Задавалось несколько режимов работы стенда «Кречет-2000», имитирующих различную степень морского волнения, и для каждого из режимов выполнялась оценка предельной погрешности стабилизации по данным автоколлиматора. На рис. 2 представлены значения предельной погрешности стабилизации для различных режимов качки.

Рис. 2. Погрешность стабилизации при стендовых испытаниях

В результате испытаний получено, что предельная погрешность стабилизации не превышает 40≡, что подтверждает результаты математического моделирования.

Заключение. Приведены результаты моделирования погрешностей и результаты стендовых испытаний системы косвенной стабилизации гравиметра по данным БИНС, показывающие целесообразность применения системы косвенной стабилизации с целью упрощения состава интегрированного геодезического комплекса, предназначенного для измерения абсолютных значений силы тяжести на акватории Мирового океана.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 18-19-00627.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г., Степанов О.А. и д.р.** Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017.
2. **Соколов А.В., Краснов А.А., Алексеенко А.С., Стусь Ю.Ф., Назаров Е.О., Сизиков И.С.** Опыт измерения абсолютного значения силы тяжести на подвижном основании // Гироскопия и навигация. 2017. Т. 25. № 2 (97). С. 77–88.
3. **Соколов А.В., Краснов А.А., Алексеенко А.С.** Система косвенной стабилизации морского гравиметра по данным БИНС // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Острякова. 2018. С. 122-124.
4. **Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А.** Динамический синтез систем гироскопической стабилизации // Ленинград: Судостроитель, 1968.
5. **Емельянцев Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации // СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016.

A.S. Alekseenko (State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg), **A.A. Krasnov** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University). **Study of Gravimeter Indirect Stabilization System Errors**

Abstract. The results of modeling of gravimeter indirect stabilization system errors are presented. The results of the indirect stabilization system testing on heaving simulator are discussed.

УДК 531.383

Н.Г. СКИДАНОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРОГНОЗА ПОЛОЖЕНИЯ НЕУПРАВЛЯЕМОГО ГИРОСКОПА В ЗАДАЧЕ КАЛИБРОВКИ

Работа посвящена анализу дифференциальных уравнений прецессионного движения вектора кинетического момента неуправляемого гироскопа в составе инерциальной навигационной системы. Рассматривается влияние погрешностей учета скорости дрейфа и положения неуправляемого гироскопа на решение задачи прогнозирования его положения. Сформулировано условие для упрощения модели погрешностей хранения инерциального направления неуправляемым гироскопом в задаче калибровки.

Введение. Качество работы инерциальной навигационной системы (ИНС) главным образом определяется достоверностью используемой модели погрешностей чувствительных элементов. Модель погрешностей линейных акселерометров обычно имеет три составляющие: погрешность смещения нуля, погрешность масштабного коэффициента и шумовую составляющую [1]. Модель погрешностей неуправляемого гироскопа (НГ) имеет более сложную структуру. Рассмотрим ИНС, построенную на двух НГ, векторы кинетических моментов (ВКМ) которых совершают прецессионные движения под действием моментов внешних сил. Целью работы является анализ дифференциальных уравнений прецессионного движения ВКМ и условий упрощения модели погрешностей дрейфа НГ при решении задачи калибровки.

Модель прецессионного движения вектора кинетического момента неуправляемого гироскопа. Рассматриваемая ИНС использует для построения аналога инерциальной системы координат (ИСК) $O\xi_*\eta_*\zeta_*$ два НГ, ВКМ одного из которых ориентирован параллельно «оси Мира» («полярный» НГ, далее – НГ-П), а ВКМ второго – параллельно плоскости Земного экватора («экваториальный НГ», далее – НГ-Э) [1]. Построение приборного инерциального трёхгранника $OI_1I_2I_3$ выполняется с использованием алгоритма TRIAD [2]. Направления ВКМ НГ в ИСК задаются соответствующими направляющими косинусами:

$$\begin{aligned}\vec{h}^{\,П} &= \begin{bmatrix} h_\xi^{П} & h_\eta^{П} & h_\zeta^{П} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T, \\ \vec{h}^{\,Э} &= \begin{bmatrix} h_\xi^{Э} & h_\eta^{Э} & h_\zeta^{Э} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T. \end{aligned} \tag{1}$$

Значения $\vec{h}^{\,П}, \vec{h}^{\,Э}$ изменяются во времени вследствие дрейфа НГ-П, НГ-Э. Движение ВКМ НГ в ИСК может быть описано векторным дифференциальным уравнением Пуассона [1]:

$$\frac{d\vec{h}}{dt} = \vec{\omega}_{др} \times \vec{h}\ , \vec{h}(t_0); \tag{2}$$

где $\vec{\omega}_{др}$ – вектор угловой скорости дрейфа НГ, $\vec{h}(t_0)$ – начальное положение ВКМ НГ в ИСК.

Скалярная форма выражения (2) имеет вид [1]:

$$\begin{aligned} \dot{h}_\xi &= \omega_\eta \cdot h_\zeta - \omega_\zeta \cdot h_\eta; \\ \dot{h}_\eta &= \omega_\zeta \cdot h_\xi - \omega \cdot h_\zeta; \\ \dot{h}_\zeta &= \omega_\xi \cdot h_\eta - \omega_\eta \cdot h_\xi; \end{aligned} \tag{3}$$

Научный руководитель д.т.н. Литманович Ю.А.

где $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$ – проекции вектора угловой скорости дрейфа НГ на оси ИСК.

Прогноз положения ВКМ НГ осуществляется в соответствии с принятой моделью дрейфа, детерминированными составляющими которого будем считать дрейф, обусловленный нескомпенсированными корпусными моментами НГ – коэффициент модели ухода (КМУ) m_0, а также дрейф от дисбаланса ротора НГ – КМУ n_1 [3]. Определение начальных положений $\vec{h}(t_0)$ и КМУ осуществляется в режимах выставки и калибровки ИНС.

Используя выражения связи угловой скорости дрейфа НГ и КМУ [4], выражения (3) могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned}
\dot{h}_\xi &= m_0 \cdot (\cos\varphi \cdot \sin\lambda_* - h_\xi \cdot M) + n_1 \cdot (h_\zeta \cdot \sin\varphi - h_\eta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda_*);\\
\dot{h}_\eta &= m_0 \cdot (\sin\varphi - h_\eta \cdot M) + n_1 \cdot (h_\xi \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda_* - h_\zeta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\lambda_*);\\
\dot{h}_\zeta &= m_0 \cdot (\cos\varphi \cdot \cos\lambda_* - h_\zeta \cdot M) + n_1 \cdot (h_\eta \cdot \cos\varphi \cdot \sin\lambda_* - h_\xi \cdot \sin\varphi),
\end{aligned} \tag{4}$$

где φ – широта места, λ* – инерциальная долгота места, $M = h_\xi \cdot \cos\varphi \cdot \sin\lambda_* + h_\eta \sin\varphi + h_\zeta \cdot \cos\varphi \cos\lambda_*$.

Анализ влияния ошибок учёта дрейфа на точность прогноза положения НГ. При значительном отклонении ВКМ от исходной ориентации (1) уравнения результатов интегрирования выражений (4) становятся громоздкими. Во избежание усложнения уравнений дрейфа НГ используется квазиинерциальная система координат $O\xi_*^f \eta_*^f \zeta_*^f$, дискретно согласующаяся с СК $OI_1I_2I_3$ [5]. Таким образом, обеспечиваются равенства $\vec{h}_f{}^{\Pi} = \begin{bmatrix}0 & 1 & 0\end{bmatrix}^T$, $\vec{h}_f{}^{\Э} = \begin{bmatrix}0 & 0 & 1\end{bmatrix}^T$ с точностью до погрешности прогноза положения ВКМ.

Поварьировав проинтегрированные выражения (4), рассмотрим составляющие ошибок хранения инерциального направления, обусловленные ошибками учёта дрейфа НГ:

- для НГ-П:

$$\begin{aligned}
\Delta h_\xi^{\Pi} &= -\left(\frac{\Delta m_0^{\Pi}}{\omega_З} \cdot \cos\lambda_* + \frac{\Delta n_1^{\Pi}}{\omega_З} \cdot \sin\lambda_*\right) \cdot \cos\varphi + \Delta h_\xi^{\Pi}(t_0);\\
\Delta h_\eta^{\Pi} &= \Delta h_\eta^{\Pi}(t_0);\\
\Delta h_\zeta^{\Pi} &= \left(\frac{\Delta m_0^{\Pi}}{\omega_З} \cdot \sin\lambda_* - \frac{\Delta n_1^{\Pi}}{\omega_З} \cdot \cos\lambda_*\right) \cdot \cos\varphi + \Delta h_\zeta^{\Pi}(t_0);
\end{aligned} \tag{5}$$

где $\omega_З$ – угловая скорость вращения Земли.

- для НГ-Э:

$$\begin{aligned}
\Delta h_\xi^{\Э} &= -\frac{\Delta m_0^{\Э}}{\omega_З} \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda_* + \Delta n_1^{\Э} \cdot \sin\varphi \cdot t + \Delta h_\xi^{\Э}(t_0);\\
\Delta h_\eta^{\Э} &= \frac{\Delta n_1^{\Э}}{\omega_З} \cdot \cos\varphi \cdot \cos\lambda_* + \Delta m_0^{\Э} \cdot \sin\varphi \cdot t + \Delta h_\eta^{\Э}(t_0);\\
\Delta h_\zeta^{\Э} &= \Delta h_\zeta^{\Э}(t_0).
\end{aligned} \tag{6}$$

Из выражений (5), (6) можно видеть, что ошибки учёта дрейфа НГ-П приводят к возникновению только гармонических погрешностей прогнозируемого положения ВКМ, в то время как ошибки учёта дрейфа НГ-Э являются источником как гармонических, так и накапливающихся со временем ошибок прогноза положения.

Анализ влияния ошибок учёта положения ВКМ на точность прогноза положения НГ. Приняв $\Delta\vec{h}^{\Pi} = \begin{bmatrix}\Delta h_\xi^{\Pi} & 0 & \Delta h_\zeta^{\Pi}\end{bmatrix}^T$, $\Delta\vec{h}^{\Э} = \begin{bmatrix}\Delta h_\xi^{\Э} & \Delta h_\eta^{\Э} & 0\end{bmatrix}^T$, рассмотрим составляющие ошибок хранения инерциального направления, полученные при записи выражений (4) в приращениях и обусловленные ошибками учёта положения НГ:

- для НГ-П:

$$\begin{aligned}\Delta h_\xi^{П} &= n_1^{П}\cdot\Delta h_\zeta^{П}\cdot\sin\varphi\cdot t+\Delta h_\xi^{П}(t_0);\\ \Delta h_\eta^{П} &= \frac{n_1^{П}}{\omega_З}\cdot(\Delta h_\xi^{П}\cdot\cos\varphi\cdot\sin\lambda_*+\Delta h_\zeta^{П}\cdot\cos\varphi\cdot\cos\lambda_*)+\Delta h_\eta^{П}(t_0);\\ \Delta h_\zeta^{П} &= -n_1^{П}\cdot\Delta h_\xi^{П}\cdot\sin\varphi\cdot t+\Delta h_\zeta^{П}(t_0);\end{aligned} \qquad (7)$$

- для НГ-Э:

$$\begin{aligned}\Delta h_\xi^{Э} &= -\frac{n_1^{Э}}{\omega_З}\cdot\Delta h_\eta^{Э}\cdot\cos\varphi\cdot\sin\lambda_*+\Delta h_\xi^{Э}(t_0);\\ \Delta h_\eta^{Э} &= \frac{n_1^{Э}}{\omega_З}\cdot\Delta h_\xi^{Э}\cdot\cos\varphi\cdot\sin\lambda_*+\Delta h_\eta^{Э}(t_0);\\ \Delta h_\zeta^{Э} &= -\frac{n_1^{Э}}{\omega_З}\cdot\Delta h_\eta^{Э}\cdot\cos\varphi\cdot\cos\lambda_*-n_1^{Э}\cdot\Delta h_\xi^{Э}\cdot\sin\varphi\cdot t+\Delta h_\zeta^{Э}(t_0).\end{aligned} \qquad (8)$$

Погрешности прогноза положения НГ-П, НГ-Э, вызванные ошибками учёта положения ВКМ, имеют гармонический и накапливающийся характер.

Условие упрощения модели дрейфа НГ. Сформулируем условие для упрощения модели дрейфа НГ в задаче калибровки, позволяющее пренебречь влиянием погрешностей (7), (8), сохранив в модели лишь погрешности (5), (6).

Каждый НГ имеет установленный допустимый предел нестабильности дрейфа $\dot{h}_{нест}^{\max}$. Будем считать, что учётом составляющих дрейфа, меньших этого уровня нестабильности, допустимо пренебречь. То есть при $\Delta\dot{h}_{\xi,\eta,\zeta}^{П,Э}\le\dot{h}_{нест}^{\max}$ принимаем $\Delta\dot{h}_{\xi,\eta,\zeta}^{П,Э}\approx 0$.

Этапы калибровки ИНС характеризуются различными уровнями оцениваемых ошибок. Исходя из предельно допустимых значений КМУ $m_0^{П,Э}$, $n_1^{П,Э}$ и знания величин погрешностей положения НГ $\Delta h_{\xi,\eta,\zeta}^{П,Э}$ (из опытной эксплуатации), характерных для разных этапов калибровки, можно заключить:

- начальная калибровка ИНС, при которой оцениваемые погрешности максимальны, требует использования полной модели погрешностей НГ. Однако в случае уточнения погрешностей на каждом шаге решения задачи оценивания производные выражений (7), (8) $\Delta\dot{h}_{\xi,\eta,\zeta}^{П,Э}$ становятся меньше $\dot{h}_{нест}^{\max}$, что позволяет исключить учёт составляющих дрейфа, обусловленных ошибками учёта положения НГ;
- заключительный этап калибровки ИНС характеризуется достаточно малыми величинами погрешностей положения НГ $\Delta h_{\xi,\eta,\zeta}^{П,Э}$ для исключения учёта составляющих дрейфа, обусловленных ошибками учёта положения НГ.

Заключение. В работе проанализированы дифференциальные уравнения прецессионного движения ВКМ НГ в составе ИНС. Рассмотрено влияние ошибок учета скорости дрейфа и положения НГ на решение задачи прогнозирования положения НГ. Сформулировано условие упрощения модели погрешностей хранения инерциального направления НГ в задаче калибровки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анучин О.Н., Емельянцев Г.И..** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. 1999.
2. **Литманович Ю.А..** Об одном подходе к использованию избыточной информации в задачах определения угловой ориентации по наблюдению за двумя векторами // Гироскопия и навигация. 2012. № 3 (78). С. 99–110.

3. **Лукьянов Д.П., Мочалов А.В., Одинцов А.А., Вайсгант И.Б.** Инерциальные навигационные системы морских объектов. Л.: Судостроение, 1989.
4. **Гусинский В.З., Лесючевский В.М., Литманович Ю.А**. Выставка и калибровка инерциальной навигационной системы с многомерной моделью погрешностей инерциальных измерителей // IV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб., 1997.
5. **Литманович Ю.А., Столбов А.А**. Упрощённая модель погрешностей ИНС на неуправляемых гироскопах в задачах выставки и калибровки // Материалы VII международной научно-технической конференции «Гиротехнологии, навигация, управление движением, конструирование авиационно-космической техники». Киев. 2009. С. 139–144.

N.G. Skidanov (State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg). **Analysis of the Free Gyro Position Prediction Errors in Calibration Problem.**

Abstract. The study is devoted to analysis of the precessional motion differential equations of the free gyro angular momentum vector in the inertial navigation system. The influence of the drift angular velocity accounting error at prediction problem of the free gyro position is considered. The condition of the free gyro error model simplification in calibration problem is formulated.

УДК.629.7.058.82

Д.С. КУКУШКИН
(Филиал ФГУП «НПЦАП» – «ПО «Корпус», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.)

ГИРОСКОПИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ С ЖИДКИМ ФЕРРОМАГНИТНЫМ РОТОРОМ

В работе представлен датчик угловой скорости с чувствительным элементом в виде жидкого ферромагнитного ротора.

Введение. Актуальной задачей современной навигации является разработка малогабаритных инерциальных навигационных систем, при создании которых базовым является вопрос разработки чувствительных элементов – в частности, устройств, предназначенных для измерения угловой скорости [1]. При эксплуатации навигационных систем на подвижных объектах они подвергаются воздействию целого ряда климатических и механических факторов, оказывающих существенное влияние на точность и надежность чувствительных элементов, обеспечение которых является важным вопросом [2]. Данная задача, как правило, решается за счет ужесточения технологических требований изготовления и увеличения числа операций при производстве деталей, что существенно повышает стоимость изделия. Как следствие – выпускаемые изделия в условиях высокой конкуренции становятся неликвидными. Решением обозначенной выше проблемы может являться разработка датчиков угловой скорости, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками и невысокой стоимостью.

Конструкция и принцип работы датчика угловой скорости. В работе представлен датчик угловой скорости, изображенный на рис. 1, конструкция которого не содержит в себе вращающихся частей, а в качестве чувствительного элемента используется ферромагнитная жидкость (феррофлюид).

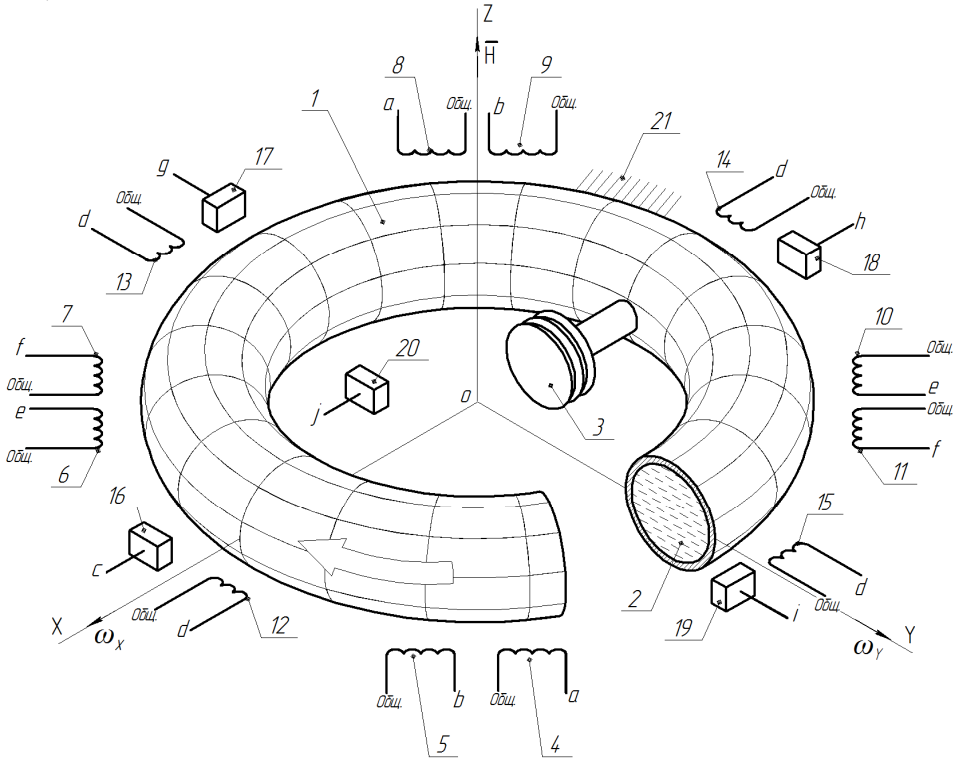


Рис. 1. Кинематическая схема предлагаемого датчика угловой скорости

Датчик угловой скорости, представленный на рис. 1, состоит из корпуса 1 (неподвижно закрепленного на объекте 21), выполненного в виде тора. Внутренняя полость датчика заполнена ферромагнитной жидкостью 2. Для компенсации температурного расширения (сжатия) жидко-

сти в конструкции датчика предусмотрен сильфон 3. Катушки 12–15 осуществляют подмагничивание ферромагнитной жидкости. Регистрация углового движения жидкости относительно корпуса 1 происходит посредством датчиков Холла 16–19. Для температурной коррекции в конструкции предусмотрен датчик температуры 20.

Ферромагнитная жидкость приводится в движение с помощью 4 пар соленоидов электромагнитного насоса 4–11. Каждая из пар представляет собой отдельный электромагнитный насос. При поочередной подаче импульсов управляющего напряжения на каждый из соленоидов электромагнитного насоса 4–11 ферромагнитная жидкость поляризуется в зоне действия соленоида, а при смене полярности импульсов управляющего напряжения перемещается в направлении течения (вокруг оси Z). Частота и последовательность импульсов подбираются таким образом, чтобы обеспечить в контуре, образованном корпусом 1, ламинарное течение ферромагнитной жидкости [3].

На ферромагнитную жидкость действует ряд сил: сила тяжести, центробежная сила, равнодействующая силы давления, сила трения и силы, составляющие гироскопический момент. Сила тяжести и центробежная сила оказывают равномерное воздействие на жидкость, т.е. имеют одинаковую величину в различных точках корпуса, в результате чего давление, действующее на стенки корпуса, распределено равномерно. Жидкость устойчива и не перемещается вокруг направления течения.

Величина силы, составляющей гироскопический момент, зависит от расстояния до оси вращения и ее можно определить из соотношения:

$$M_{\Gamma} = \overline{H}\omega_{вх} = J_{dV}\Omega\omega_{вх} = Fl\,, \qquad (1)$$

где M_{Γ} – гироскопический момент; $\overline{H}$ – кинетический момент; $\omega_{вх}$ – измеряемая угловая скорость, действующая вокруг оси OY; Ω – угловая скорость вращения элементарных объемов dV_1 и dV_2 вокруг оси OZ; F – сила, составляющая гироскопический момент; l – расстояние от элементарного объема dV до оси вращения OZ; J_{dV} – осевой момент инерции элементарного объема dV, который определяется по формуле:

$$J_{dV} = \int_V \rho l^2 dV\,, \qquad (2)$$

где ρ – плотность ферромагнитной жидкости.

Подставляя (2) в (1), получаем соотношение, позволяющее определить величину силы, действующей на элементарный объем dV:

$$F = \Omega\omega_{вх}\int_V \rho l dV\,. \qquad (3)$$

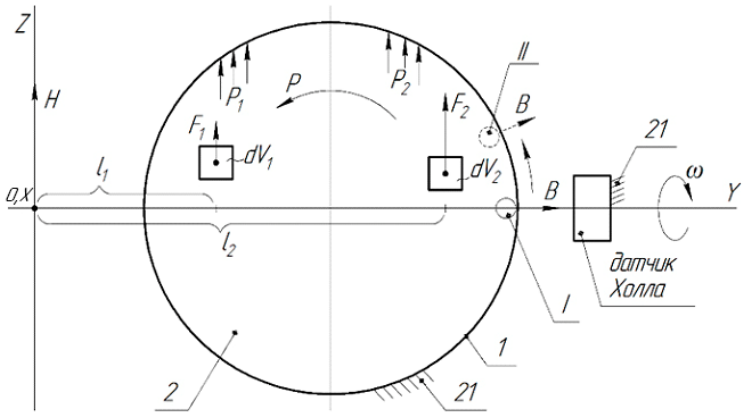


Рис. 2. Сечение корпуса датчика угловой скорости

Для пояснения процесса измерения угловой скорости рассматривается сечение корпуса, представленное на рис. 2. Выделим два одинаковых элементарных объема dV_1 и dV_2 жидкости, причем точки центра масс этих объемов лежат в плоскости OZY, а расстояние $\ell_2 > \ell_1$.

Пусть вокруг оси OY действует угловая скорость $\omega_{вх}$, при этом вокруг оси OX будет действовать гироскопический момент $M_г$, величина которого, согласно (1), пропорциональна значению действующей угловой скорости. Так как выделенные элементарные объемы dV_1 и dV_2 расположены на разных расстояниях от оси вращения, то на них будут действовать разные по величине силы F_1 и F_2. Используя соотношение (3), запишем:

$$F_1 = \Omega\omega_{вх}\int_V \rho l_1 dV; \qquad F_2 = \Omega\omega_{вх}\int_V \rho l_2 dV. \tag{3а}$$

Сила F_2, действующая на элементарный объем dV_2, больше силы F_1, действующей на элементарный объем dV_1, так как $\ell_2 > \ell_1$, в результате чего давление P_2 преобладает над давлением P_1. Разность давлений P приводит к угловому движению жидкости вокруг направления ее течения, при этом угловое перемещение жидкости пропорционально величине действующей угловой скорости $\omega_{вх}$.

Система контроля углового перемещения жидкости содержит катушку подмагничивания 12–15 (рис. 1), благодаря которой происходит поляризация ферромагнитной жидкости. Подмагничивание происходит узконаправленным пучком переменного магнитного потока высокой частоты, тем самым избегается налипание частиц магнетита на стенки корпуса. В результате перемещения жидкости внутри корпуса образуется «шлейф», сохраняющий остаточную намагниченность. При отсутствии угловой скорости область остаточной намагниченности находится вблизи области I (рис. 2). При возникновении внешноего углового движения происходит смещение «шлейфа», например в область II (рис. 2), угловое движение которого пропорционально величине действующей угловой скорости. Величина перемещения контролируется дифференциальным датчиком Холла.

Применение раствора на полигликолевой основе в качестве связующего вещества ферромагнитной жидкости позволит обеспечить широкий диапазон рабочих температур работы прибора: от –60˚С до +120˚С [4].

Заключение. Представлен датчик угловой скорости с жидким ферромагнитным ротором. Датчик имеет широкий диапазон рабочей температуры**,** не чувствителен к воздействию линейных ускорений, за счет отсутствия подвижных механических частей позволяет выдерживать высокие перегрузки и вибрационные воздействия. Вышеуказанные характеристики разрабатываемого датчика угловых являются преимуществом перед другими типами датчиков угловых скоростей, производимых в России.

ЛИТЕРАТУРА

1. **В.Г. Пешехонов.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. №1 (72). С. 3–16.
2. **Лукьянов Д. П., Распопов В. Я., Филатов Ю. В.** Прикладная теория гироскопов. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. 339 с.
3. Глав. ред. **Г.П. Свищев**. Авиация. Большая Российская Энциклопедия. М.: ЦАГИ им. Н. Е. Жуковского, 1994. 736 с.
4. **Байбуртский Ф.С.** Магнитные жидкости: способы получения и области применения. М.: ИБФ им. Н. М. Эмануэля РАН. 2002. 24 с.
5. Заявка №2019116872 от 31.05.2019. Кукушкин Д.С., Кузнецов А.О., Яковишин А.С. «Магнитогидродинамический датчик угловых скоростей с ферромагнитным ротором»

D.S. Kukushkin (Branch of the Federal State Unitary Enterprise «Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and Instrument-making» - «Production Association «Korpus», Saratov). **Gyroscopic Angular Velocity Sensor with Liquid Ferromagnetic Rotor**

Abstract. This article presents the gyroscopic angular velocity sensor with the liquid ferromagnetic rotor.

УДК 621.396.6

Р.С. ПАЛЬКОВ
(Филиал ФГУП «НПЦАП» - ПО «Корпус», г. Саратов)

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА С ПОМОЩЬЮ СИГНАЛА «БЕЛЫЙ ШУМ»

В работе предложен способ определения резонансной частоты чувствительного элемента пьезоэлектрического акселерометра с внутренним калибровочным устройством с помощью модели белого шума.

Введение. По принципу работы пьезоэлектрический акселерометр (ПА) является измерителем виброускорений с механоэлектрическим преобразователем сигнала пьезоэлектрического типа без использования компенсации. Он предназначен для измерения параметров механического низкочастотного ускорения (например, при сейсмоколебаниях объектов) и может использоваться как в составе других приборов, так и самостоятельно [2].

Одним из основных параметров ПА является резонансная частота, определяющая частотный рабочий диапазон. Используемая в настоящее время методика определения резонансной частоты ПА заключается в пошаговом изменении частоты синусоидального сигнала $I_{ВХ}$, поданного с генератора в обмотку внутреннего калибровочного устройства (ВКУ). При этом выполняется поиск точки амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), в которой коэффициент передачи имеет максимальное значение – резонансный пик.

Предлагаемый способ. В настоящей работе предлагается новый способ для определения резонансной частоты ПА с помощью сигнала «белый шум», у которого спектральные составляющие практически равномерны в широком частотном диапазоне.

Для практической реализации предлагаемого способа разработана методика «Резонанс белого шума» (РБШ) для определения резонансной частоты ПА. При подаче на вход ВКУ белого шума на выходе прибора получаем сигнал, являющийся откликом системы на приложенное воздействие. По результатам анализа спектра выходного сигнала определяется значение резонансной частоты ПА.

На рис. 1 приведена АЧХ выходного сигнала прибора, полученная с помощью методики РБШ. Получено значение резонансной частоты, равное 807,5 Гц, причем погрешность ее определения не превысила ±0,1 Гц.

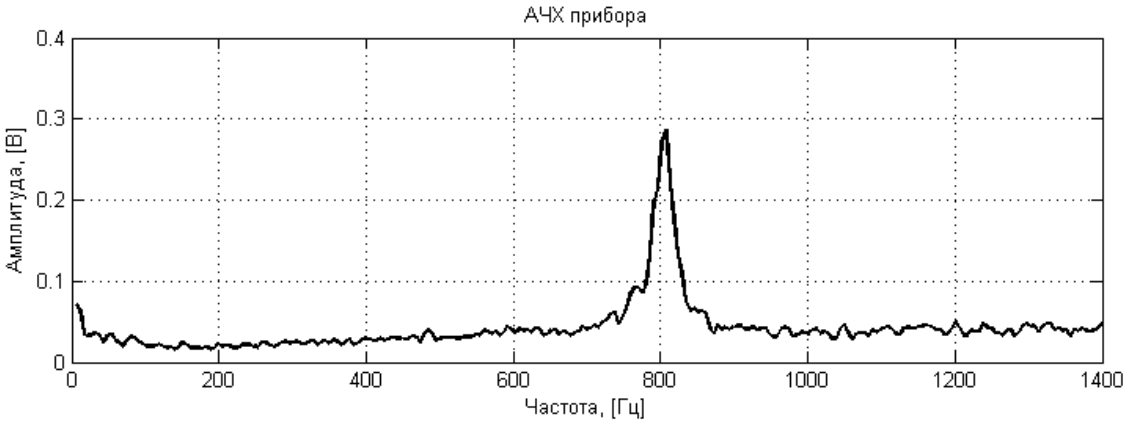


Рис. 1. АЧХ выходного сигнала ПА

Сравнение методик определения резонансной частоты ПА. Проведем сравнение результатов, полученных по новой методике РБШ и по штатной методике последовательного изменения частот. В таблице 1 приведены результаты определения резонансной частоты по методике последовательного изменения частот: по штатной документации (с грубым шагом изменения 100 Гц и точным шагом изменения 10 Гц) и с уточнением (с шагом изменения 1 Гц).

Таблица 1

Определение резонансной частоты

По штатной методике, указанной в документации				Уточнение для данной АЧХ (с шагом 1 Гц)	
Грубо (с шагом 100 Гц)		Точно (с шагом 10 Гц)			
Частота, Гц	Амплитуда, В	Частота, Гц	Амплитуда, В	Частота, Гц	Амплитуда, В
700	0,88	750	1,28	805	9,74
800	**3,36**	760	1,44	806	9,85
900	0,96	770	1,60	**807**	**10,31**
1000	0,48	780	2,00	808	9,91
1100	0,32	790	2,40	809	9,78
1200	0,24	800	3,36	810	9,60
1300	0,16	**810**	**9,60**	811	9,53
1400	0,24	820	8,96	812	9,42
1500	0,16	830	5,92	813	9,30
-	-	840	3,68	814	9,21
-	-	850	2,56	815	9,17

Проведя анализ полученных результатов, можно сделать вывод, что значения резонансной частоты ПА, определенные методом последовательного изменения частоты через 1 Гц, и методом РБШ совпадают и равны 807 Гц. Таким образом, показана возможность использования способа определения резонансной частоты ПА с внутренним калибровочным устройством с применением модели некоррелированного белого шума.

Кроме того, рассматриваемый способ позволяет определить точное значение резонансной частоты за время менее 10 с.

Заключение. Предложен способ определения резонансной частоты чувствительного элемента пьезоэлектрического акселерометра (методика РБШ), позволяющий проводить измерение резонансной частоты с точностью до 0,1 Гц и сократить время проверки более чем в 10 раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Брагин В.В., Безъязычный В.Ф.** Современное управление организацией // Справочник. Инженерный журнал, Приложение № 7(256). 2018. С. 1–12.
2. **Иориш Ю.И.,** Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы (2-е изд.). М.: ГНТИМЛ, 1963. 771 с.

R.S. Palkov (Branch of the Federal State Unitary Enterprise «Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and Instrument-making» - «Production Association «Korpus», Saratov). **Method for determining the resonat frequency of piezoelectric accelerometer by means of the white noise signal**

Abstract. The paper proposed a method for determining the resonance frequency of a sensitive element of a piezoelectric accelerometer with an internal calibration device using an uncorrelated white noise model.

УДК 53.089.6

В.П. БАТИЩЕВ
(Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.)

НИЗКОЧАСТОТНЫЙ СТЕНД ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ИНДУКЦИОННЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ И СЕЙСМОПРИЕМНИКОВ

В работе рассматриваются особенности разработки низкочастотного стенда, позволяющего проводить калибровку пьезоэлектрических и индукционных акселерометров и сейсмоприёмников методом вращения их осей чувствительности относительно вектора ускорения силы тяжести.

Введение. При инженерно-сейсмологических исследованиях для мониторинга технического состояния и изучения механических характеристик сооружений и конструкций широко применяются сейсмоакселерометры с пределами измеряемых ускорений от 10^{-3} м/с^2 до нескольких единиц м/с^2 и характеризующиеся диапазоном измеряемых частот 0,1 ÷ 100 Гц. Для измерения вибраций этого диапазона частот предъявляются особые требования к характеристикам средств измерений, а также к методам их испытаний и калибровки [1]. На практике наибольшее распространение получили электродинамические калибровочные вибростенды, работающие в частотном диапазоне от 5 Гц до 20 кГц с амплитудой до нескольких десятков м/с^2. Конструктивные недостатки электродинамических вибростендов не позволяют использовать их для точной калибровки низкочастотных сейсмоакселерометров. Механические вибростенды обеспечивают нижнюю границу частоты порядка 1 ÷ 3 Гц при перемещении платформы в пределах нескольких сантиметров, что не позволяет задать амплитуду воздействующего ускорения выше нескольких сотых м/с^2. Таким образом, существующие средства испытаний в области низких и сверхнизких частот не способны обеспечить испытательное воздействие в виде ускорений порядка 1 м/с^2, а также высокую стабильность амплитуды и частоты. К сожалению, вопросам теории и практики калибровки и испытаний сейсмоакселерометров в области низких и сверхнизких частот в литературе уделяется недостаточное внимание [2].

Целью работы была разработка стенда для калибровки сейсмоакселерометра, диапазон рабочих частот испытательного воздействия которого сможет обеспечивать нижнюю границу частоты меньше 10 Гц и при этом задавать амплитуду испытательного воздействия в виде ускорений порядка 1 м/с^2.

Разработка и апробация стенда. Кинематическая схема стенда приведена на рис. 1.

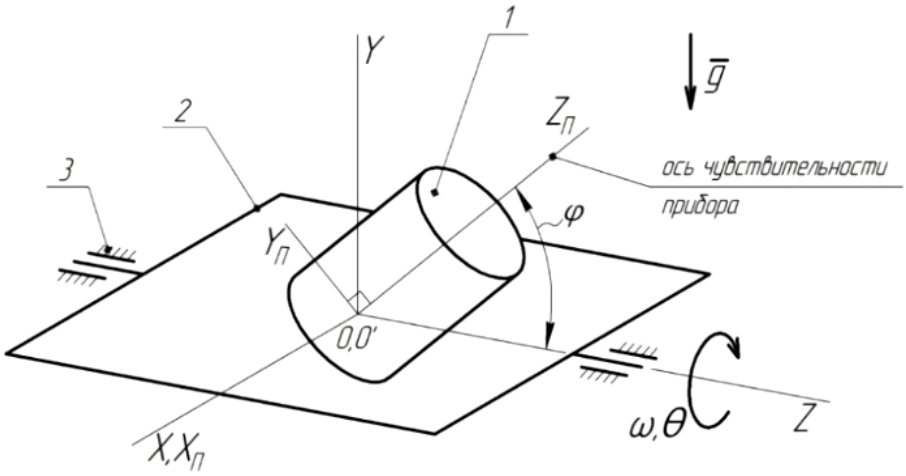


Рис.1. Кинематическая схема устройства калибровки в поле силы тяжести

Испытуемый прибор 1 закрепляется на поворотной платформе 2, которая вращается вокруг горизонтальной оси Z, закрепленной на неподвижной станине 3. При повороте оси чувстви-

Научный руководитель младший научный сотрудник Кузнецов А.О.

тельности испытуемого прибора $Z_П$ проекция вектора ускорения силы тяжести на эту ось изменяется по гармоническому закону. Следует отметить, что такой способ калибровки подходит для типов низкочастотных акселерометров нечувствительных к центробежным силам, например, электродинамических и пьезоэлектрических [3]. Согласно рис. 1, проекция вектора ускорения силы тяжести на ось чувствительности калибруемого прибора имеет вид:

$$Z_П = g \cdot cos(\varphi); \quad (1)$$

где g – ускорение силы тяжести; φ – угол наклона оси чувствительности прибора.

При равномерном вращении испытуемого прибора с постоянной угловой скоростью ω измеряемое ускорение определяется в соответствии со следующим гармоническим законом:

$$a_{вх}(t) = g \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\theta(t)) \quad (2)$$

где $a_{вх}(t)$ – входное ускорение, действующее вдоль оси чувствительности прибора; $\theta(t)$ – угловое положение поворотной платформы.

Таким образом, при вращении оси чувствительности испытуемого прибора в поле силы тяжести, амплитуда входного ускорения постоянна, описывается выражением (2) и не зависит от частоты. Используя выражение (2), составим математическую модель процесса калибровки, представленную на рис. 2.

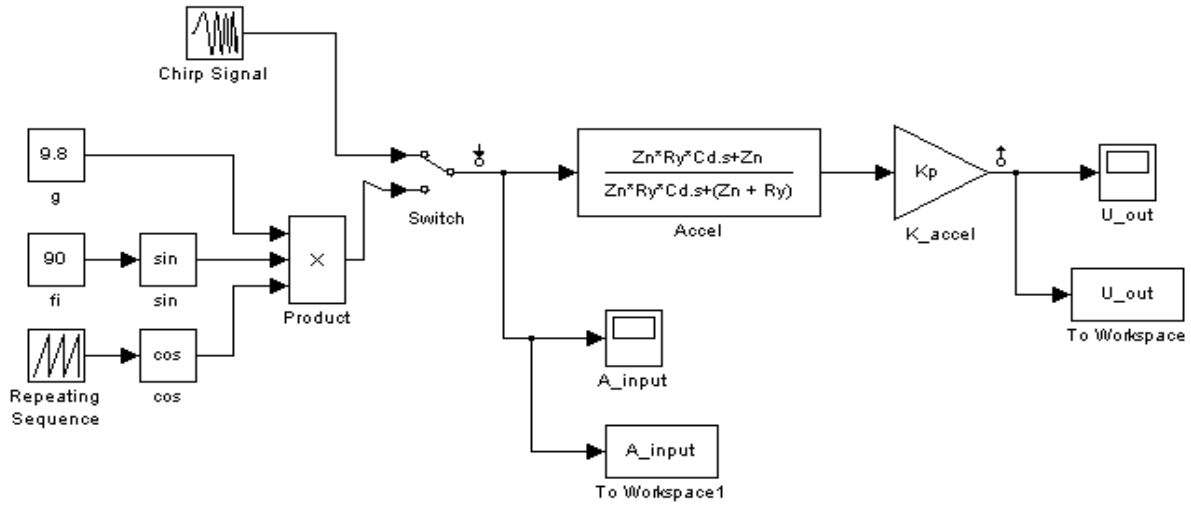


Рис. 2. Структурная схема математической модели, построенная в Matlab

Полученная структурная схема [4] математической модели процесса калибровки состоит из блоков, формирующих входное воздействие, которое поступает на вход передаточной функции акселерометра «*Accel*», выходной сигнал масштабируется в блоке «*K_accel*» в соответствии с коэффициентом преобразования калибруемого датчика. Для эксперимента был использован акселерометр KD45, имеющий коэффициент преобразования *Kp* = 10 мВ/g, собственную емкость пьезоэлемента Cd=1,2 нФ, сопротивление нагрузки $Zn = 5{,}5 \cdot 10^6$ Ом, собственное сопротивление датчика $Ry = 6 \cdot 10^{11}$ Ом.

Методика калибровки путем поворота в гравитационном поле Земли заключается в следующем: блоки, формирующие входное воздействие, в соответствии с формулой (2) преобразуют действующее ускорение силы тяжести в гармоническое низкочастотное ускорение, воздействующее на чувствительный элемент акселерометра (на вход передаточной функции «*Accel*»). Зависимость напряжения на выходе масштабирующего блока «*K_accel*» от частоты вращения платформы представлена на рис. 3, где теоретическая кривая – это амплитудно-частотная характеристика акселерометра в области низких частот, полученная при помощи математической модели, приведенной на рис. 2.

Для проведения экспериментальной апробации был разработан и изготовлен действующий макет калибровочного стенда, с помощью которого получена амплитудно-частотная характеристика акселерометра KD45 в области низких частот, приведенная на рис. 3.

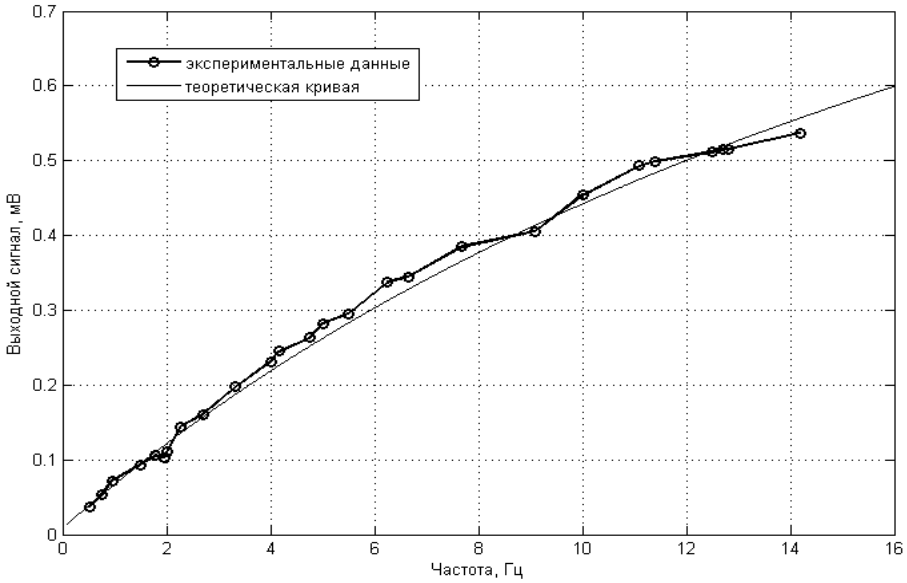


Рис. 3. Экспериментальная и расчетная АЧХ испытуемого прибора

Вывод. Экспериментальная АЧХ практически совпадает с теоретической кривой, полученной при помощи математического моделирования. Таким образом, результаты работы подтверждают эффективность метода калибровки сейсмоакселерометра в области низких частот путем поворота его оси чувствительности в поле силы тяжести.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 8.669-2009. Виброметры с пьезоэлектрическими, индуктивными и вихретоковыми преобразователями. Методика поверки.
2. **Абрамов О.К.** Устройство для калибровки акселерометров в поле земного тяготения // Вестник РГРТУ. № 4 (выпуск 26). Рязань, 2008.
3. Патент на изобретение №: 2519833 Дата публикации: Пятница, Июнь 20, 2014 Начало действия патента: Вторник, Июнь 26, 2012
4. **Бесекерский В.А.** Теория систем автоматического управления: учеб. пособие, СПб.: Профессия, 2007.

V.P. Batishchev (SSTU named after Gagarin Yu.A., Saratov). **Precision low-frequency stand for calibration of piezoelectric and electrodynamic accelerometers and seismic receivers**

Abstract. The features of accelerometer calibration techniques by rotating in the Earth's gravitational field are discussed in the paper. The calibration technique is considered and the design features of a low-frequency test bench for calibration purposes are described.

УДК 681.51

Д.А. САВКИН
(Университет ИТМО, ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

Р.С. ЕФРЕМОВ, Н.Г. СКИДАНОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

АПРОБАЦИЯ ПРИМЕНЕНИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КУРСА С ПОМОЩЬЮ МОДУЛЯЦИОННОГО ВРАЩЕНИЯ

Работа посвящена оценке возможности применения отечественного микромеханического гироскопа в составе малогабаритного гирокурсоуказателя. Приведен алгоритм определения курса с использованием метода модуляционного вращения гироскопа и дана оценка точностных возможностей примененного ММГ в задаче курсоуказания. Результаты моделирования подтверждены натурными экспериментами.

Введение. В настоящее время широкое распространение получили системы определения курса, построенные на базе лазерных, волоконно-оптических или твердотельных волновых гироскопов [1, 2]. Благодаря высокой точности применяемых гироскопов такие системы способны обеспечить определение курса с погрешностью не более 0,1° [3]. Одним из недостатков таких систем являются массогабаритные характеристики, делающие невозможным их применение в портативных или малогабаритных навигационных системах, а также высокая стоимость, препятствующая их реализации на массовом рынке [4].

В то же время, совершенствование микромеханических гироскопов (ММГ) способствует расширению области их применения в различных навигационных задачах, в том числе в задаче определения курса. Обзор исследований в этой области показал, что применение ММГ позволяет создать систему курсоуказания, имеющую погрешность менее 2° [3–6].

Настоящая работа посвящена исследованию возможности применения отечественного ММГ в малогабаритном гирокурсоуказателе с модуляционным вращением оси чувствительности гироскопа. В рамках работы исследовано влияние характеристик ММГ на точность определения курса методом математического моделирования и натурного эксперимента.

Метод модуляционного вращения ММГ для определения курса. Рассматриваемый метод базируется на измерении проекции угловой скорости вращения Земли $\Omega_З$ на ось чувствительности ММГ. При ориентации оси чувствительности ММГ в плоскости горизонта и отсутствии движения основания на ось чувствительности гироскопа будет действовать только проекция скорости вращения Земли в соответствии со следующей формулой [7]:

$$\omega_H = \Omega_З \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(K); \quad (1)$$

где $\Omega_З$ – угловая скорость вращения Земли, φ – широта, K – азимут оси чувствительности ММГ.

В случае совпадения оси чувствительности гироскопа с направлением на истинный север, т.е. когда K=0, проекция угловой скорости вращения Земли будет максимальной. В том случае, когда ось чувствительности ММГ и проекция угловой скорости вращения Земли на горизонтальную плоскость не совпадают, измеряемая величина будет зависеть от азимута K, т.е. от курса. Нахождение курса согласно (1) в условиях статики не представляется возможным ввиду сложности выделения полезного сигнала $\omega_Н$ на фоне существенного дрейфа нулевого сигнала ММГ и его шумов. Поставленная задача может быть решена путем модуляций $\omega_Н$, что обеспечивается принудительными разворотами оси чувствительности ММГ относительно проекции $\Omega_З$ по известному закону.

Научный руководитель к.т.н, старший научный сотрудник Моторин А.В.

Наиболее распространенными методами определения курса с применением указанного подхода являются метод статических разворотов гироскопа на ±180° и метод непрерывного модуляционного вращения гироскопа в плоскости горизонта, позволяющие скомпенсировать погрешности, вызванные смещением нуля, неточностью знания масштабного коэффициента, температурными зависимостями дрейфа ММГ [5]. В настоящей работе применяется метод постоянного однонаправленного модуляционного вращения, описанный в статье [6], согласно которому выходной сигнал ММГ $\tilde{\omega}_y$ с горизонтальной ориентацией оси чувствительности в каждый момент времени t описывается следующей моделью:

$$\tilde{\omega}_y(t) = \Omega_З \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(K_0 + \omega \cdot t) + \varepsilon_{y0} + \varepsilon_y(t); \quad (2)$$

где K_0 – курс в начальный момент вращения основания, ω – угловая скорость модуляционного вращения, ε_{y0} – смещение нулевого сигнала ММГ, $\varepsilon_y(t)$ – «белошумная» составляющая в выходном сигнале ММГ.

Представив набор отсчётов измеренной угловой скорости гироскопа (2) в дискретные моменты времени t_n в матричной форме и раскрывая $\cos(K_0 + \omega \cdot t)$, можно записать:

$$\begin{bmatrix} \tilde{\omega}_y(t_0) \\ \dots \\ \tilde{\omega}_y(t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t_0) & -\sin(\omega t_0) & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \cos(\omega t_n) & -\sin(\omega t_n) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ B \\ \varepsilon_{yo} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_y(t_0) \\ \dots \\ \varepsilon_y(t_n) \end{bmatrix}; \quad (3)$$

где $A = \Omega_З \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(K_0)$, $B = \Omega_З \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(K_0)$.

Применяя метод наименьших квадратов к массиву (3), можно получить оценки $\hat{A}$, $\hat{B}$ и $\hat{\varepsilon}_{yo}$ и рассчитать оценку $\hat{K}_0$ по формуле:

$$\hat{K}_0 = arctg(\frac{\hat{B}}{\hat{A}}). \quad (4)$$

Математическое моделирование. Было проведено моделирование выходного сигнала ММГ при задании различного уровня шумов и смещения нуля, а также различной скорости вращения основания и времени наблюдения выходного сигнала. Результаты моделирования приведены в таблице 1. Они показывают, что наибольшее влияние на точность определения курса оказывают время наблюдения и уровень шумов в выходном сигнале ММГ.

Таблица 1

Среднеквадратическое отклонение погрешности определения курса

Плотность мощности шума,°/с/√Гц / Время измерения, мин	0,001	0,0025	0,005	0,01	0,033	
					Модель	Эксперимент
1	5,53	11,98	29,43	61,89	20,38	24,93
5	2,27	6,41	10,15	23,52	7,23	8,82
10	1,49	4,49	8,33	15,66	5,10	8,30
30	0,89	2,68	5,02	10,29	2,80	5,75
60	0,66	1,72	3,52	7,13	2,00	2,09

Экспериментальные данные были получены в лабораторных условиях с применением отечественного ММГ, установленного на прецизионном поворотном столе.

Результаты натурного эксперимента, обработанные тем же алгоритмом, что и данные для моделирования, также приведены в таблице 1. Результаты близки к результатам моделирования, что говорит о достоверности выбранной модели выходного сигнала ММГ и численных значений параметров. Однако более низкая точность, по сравнению с результатами аналогичных работ [3–6] (в указанных работах погрешность определения курса приблизительно равна 1° за 3 мин наблюдения), говорит о том, что необходим более глубокий анализ и учет различных погрешностей как самого ММГ, так и метода расчета значения курса.

Заключение. Рассмотрен метод определения курса с применением модуляционного вращения отечественного ММГ. Приведен анализ влияния характеристик ММГ и параметров работы предполагаемой системы курсоуказания на точность определения курса. Сопоставлены результаты моделирования и экспериментов, подтвердившие корректность параметров математической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. №1 (72). С. 3–16.
2. **Жанруа А., Буве А., Ремиллье Ж.** Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении // Гироскопия и навигация. 2013. №4 (83). С. 24–34.
3. **Y. Zhang** et al. A Novel MEMS Gyro North Finder Design Based on the Rotation Modulation Technique // Sensors. 2017. 17 (973).
4. **Y. Liu** et al. A New North-seeking Method Based on MEMS Gyroscope // Sensors & Transducers. 2014. Vol 178. pp. 14–19.
5. **I.P Prikhodko, A.A. Trusov, A.M. Shkel.** North-Finding With 0.004 Radian Precision Using A Silicon Mems Quadruple Mass Gyroscope With Q-Factor Of 1 Million // Proceedings of the IEEE MEMS, Paris, France, 29 January – 2 February 2012.
6. **W. Jiahui** et al. A North Seeking Method Of MEMS Uniaxial Rotatory Inertial Navigation System // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием. Санкт-Петербург, ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 31–33.
7. **Мейер Д., Розелле Д.** Инерциальная навигационная система на основе миниатюрного волнового твердотельного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2012. №3 (78). С. 45–54.

D.A. Savkin (ITMO University, Concern CSRI Elektropribor JSC, Saint-Petersburg), **R.S. Efremov, N.G. Skidanov** (Concern CSRI Elektropribor JSC, Saint-Petersburg). **Approbation of domestic MEMS Gyro For North Finding with Rotation Modulation Method**

Abstract. This article is dedicated to consideration of North finding method with rotation modulation based on MEMS gyro. The course angle calculation algorithm is given in the article. Influence of parameters of algorithm and MEMS gyro characteristics on the North finding accuracy are analyzed. Modelling results are confirmed by experiment.

УДК 534.27

Я. ДУРУКАН, М.А. РЫБИНА, М.М. ШЕВЕЛЬКО
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина))

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОБЪЕМНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ ДЛЯ ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Представлены закономерности, описывающие особенности распространения объемных акустических волн во вращающихся твёрдых средах. Выполнен анализ состояния работ по созданию чувствительных элементов на основе описанных закономерностей. Рассмотрены вопросы дальнейшего развития направлений, касающихся разработки чувствительных элементов на объемных акустических волнах для датчиков угловой скорости.

Введение. Разработка чувствительных элементов (ЧЭ) на объемных акустических волнах для датчиков угловой скорости (ДУС) проводится на кафедре «Электроакустики и ультразвуковой техники» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» на протяжении последних десяти лет [1–9]. По имеющимся у авторов сведениям, данной тематикой занимаются только в СПбГЭТУ«ЛЭТИ». Повышенное внимание, которое уделяется данному вопросу, обусловлено тем, что ЧЭ таких датчиков будут обладать устойчивостью к ударам и перегрузкам. Последнее объясняется отсутствием в конструкции ЧЭ инерционной массы и упругого подвеса. Кроме того, проектируемые ДУС будут иметь широкий динамический диапазон измеряемой величины, ограниченный, с одной стороны, шумами акустических волн, а с другой – механической прочностью конструкций. Отмеченные достоинства делают применение объемных акустических волн перспективными для высокодинамичных объектов.

Предлагаемый доклад посвящен анализу состояния и перспектив развития работ по созданию ЧЭ на объемных акустических волнах для ДУС.

Анализ особенностей распространения объемных акустических волн в условиях вращения и состояние разработки ЧЭ. Попытки решения задачи распространения волн в условиях произвольного соотношения направления распространения объемных акустических волн и вращения среды не позволяют получить результаты, пригодные для дальнейшего анализа. В связи с этим авторами был предложен способ, предполагающий разделение задачи на две: первая рассматривает волны, распространяющиеся вдоль оси вращения, а вторая – перпендикулярно оси [1].

При решении поставленной задачи был сформулирован ряд закономерностей.

1) Вращение не оказывает влияние на характеристики продольной волны. Её скорость остается равной скорости продольной волны при отсутствии вращения, и направление поляризации не меняется.
2) Сдвиговая волна, которая может быть представлена как суперпозиция двух волн круговой поляризации, будет распространяться с постоянной скоростью, совпадающей со скоростью сдвиговой волны в среде при отсутствии вращения.
3) По мере распространения сдвиговой волны сохраняется линейный характер поляризации. Однако вектор поляризации будет претерпевать поворот на угол β, который пропорционален скорости вращения среды Ω и времени распространения волны τ:

$$\beta = \tau\Omega, \qquad (1)$$

где: $\tau = l/c_t$ (l – длина звукопровода; c_t – фазовая скорость сдвиговой волны).

Важно отметить, что соотношение (1) выполняется для любых частот ультразвуковых колебаний f. Обнаруженное явление поворота вектора поляризации имеет место для волн, распространяющихся в изотропных твёрдых телах (в любом направлении), а также в кристаллах кубической симметрии вдоль их акустических осей.

На основе выявленных особенностей были предложены способы выделения информативного сигнала [2–3], а также изготовлен ряд макетов ЧЭ ДУС. Экспериментальные исследования макетов подтвердили ранее выдвинутые теоретические положения.

Отдельно предложена конструкция ЧЭ ДУС, в которой происходит непосредственное возбуждение волн круговой поляризации в противоположных направлениях [4–5]. Изготовлен макет с рабочей частотой 2 МГц, испытания которого также подтвердили справедливость выдвинутых теоретических положений.

При распространении объемных акустических волн перпендикулярно оси вращения были выявлены следующие закономерности [6–7]:

1) Вращение не оказывает влияния на распространение сдвиговой волны, поляризация которой совпадает с осью вращения.
2) В направлении, перпендикулярном оси вращения, возможно распространение двух типов волн эллиптической поляризации. Смещения частиц в этих волнах лежат в плоскости, ортогональной оси вращения.
3) Соотношение осей эллипсов поляризации прямо пропорционально Ω и обратно пропорционально f.

Авторами предложен способ получения информативного сигнала на основе выделения ортогональной компоненты вектора поляризации, величина которого пропорциональна Ω [8–9]. Результаты испытаний макета ЧЭ продемонстрировали правильность предсказанных эффектов.

Перспективы разработки ЧЭ на объемных акустических волнах. Перспективой развития разработки является переход от макетов, демонстрирующих эффекты, к конкурентоспособным макетам действующих ДУС, имеющих минимальные размеры. Уменьшение габаритов ЧЭ с сохранением чувствительности требует перехода на более высокие частоты ультразвуковых колебаний (десятки и сотни мегагерц), что, соответственно, влечет за собой использование в качестве звукопроводов монокристаллических сред, обладающих меньшим, чем изотропные тела, затуханием.

Как показал проведённый анализ, в качестве необходимых сред можно использовать кристаллы кубической симметрии, такие как арсенид галлия, антимонид индия, селенид цинка и сульфид цинка.

Среди кристаллов более низкой симметрии существуют особенные направления, в которых распространяющаяся сдвиговая волна также приобретает поворот вектора поляризации. Например, такие направления существуют в кристаллах тригональной симметрии (кристаллографическая ось *Z* монокристаллического кварца и ниобата лития).

Заключение. В настоящей работе описаны особенности распространения объемных акустических волн во вращающихся твёрдых средах. Проведен анализ состояния работ по созданию ЧЭ, в основе функционирования которых лежат выявленные закономерности. Предложены пути дальнейшего развития данного направления. Основной задачей предстоящих исследований является разработка и изготовление макетов ДУС с ЧЭ, имеющих габариты не более 10 мм.

Работа проводилась при поддержке гранта Президента Российской Федерации НШ 4165.2018.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Грибкова Е.С., Перегудов А.Н., Шевелько М.М.** Особенности распространения объемных акустических волн во вращающихся твердых средах // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. №1. С. 53–58.
2. **Грибкова Е.С., Перегудов А.Н., Шевелько М.М.** О возможности создания датчиков угловой скорости на базе акустических волн // Труды ЦНИИ им.акад. А. Н. Крылова, 2010. №52. С. 193–202.
3. Пат. 2460078 Российская федерация, МПК G01P3/44. Способ измерения угловой скорости [Текст] / Грибкова Е.С., Перегудов А.Н., Поженская А.А, Шевелько М.М.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина). № 2011115171/28; заявл. 18.04.2011; опубл. 28.07.2012, Бюл. №24. 8 с.
4. **Лутовинов А.И., Перегудов А.Н., Шевелько М.М.** Преобразователь ультразвуковых волн круговой поляризации. Теория и эксперимент // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. №7. С. 78–84.

5. Пат. 2520949 Российская федерация, МПК G01C19/58. Способ измерения угловой скорости и чувствительный элемент на его основе / Лутовинов А. И., Лукьянов Д. П., Перегудов А. Н., Поженская А.А. Шевелько М.М.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И.Ульянова (Ленина). № 2012153018/28; заявл. 07.12.2012; опубл. 27.06.2014, Бюл. №18. 8 с.
6. **Дурукан Я., Лутовинов А.И., Перегудов А.Н., Шевелько М.М.** К вопросу о характеристиках волн, распространяющихся во вращающейся среде // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. №8. С. 57–61.
7. **Дурукан Я., Лутовинов А.И., Перегудов А.Н., Шевелько М.М.** О возможности построения датчиков вращательного движения на объемных акустических волнах // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. №10. С. 69–73.
8. **Дурукан Я., Лутовинов А.И., Шевелько М.М.** Сравнительная оценка выходного сигнала для различных вариантов построения датчика угловой скорости на объемных акустических волнах // Материалы XIX конференции молодых ученых с международным участием, 2017. С. 44–46.
9. **Durukan Y., Lutovinov A.I., Peregudov A.N., Popkova E.S., Shevelko M.M.** The Characteristics of Acoustic Wave Propagation in Rotating Solid-State Media. Abstract book of 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2018. P. 461-464.

Y. Durukan, M.A. Rybina, M.M. Shevelko (State Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg). **State and perspectives of the sensitive elements on bulk acoustic waves development for angular velocity sensors**

Abstract. The principles describing the features of the bulk acoustic waves in rotating solid media propagation are presented. The analysis of the current state of work on the creation of sensitive elements on the described patterns basis is provided. The issues of further development of areas related to the sensitive elements on bulk acoustic waves for angular velocity sensors development are considered.

УДК 53.09

Е.А. ЗАХАРОВА, А.Н. ШЕВЧЕНКО
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КАЧЕСТВА РЕЗОНАНСА В КВАНТОВОМ ДАТЧИКЕ ВРАЩЕНИЯ ОТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЩЕЛОЧНОГО МЕТАЛЛА ПО ГАЗОВОЙ ЯЧЕЙКЕ

Приводятся результаты экспериментального и теоретического исследований влияния распределения цезия по стенкам газовой ячейки квантового датчика вращения на ширину и амплитуду параметрического резонанса в цезии.

Введение. В настоящее время наблюдается большой интерес к использованию приборов квантовой электроники для решения задач навигации и геодезии [1–5]. Среди основных преимуществ гироскопических устройств, основанных на наблюдении атомного спина, стоит отметить их нечувствительность к ускорениям и вибрациям, малое энергопотребление, а также потенциально малые габариты, обусловленные возможностью миниатюризации устройств посредством технологии МЭМС с сохранением навигационного класса точности. Технология изготовления таких приборов в России и в мире находится на этапе отработки.

Доклад посвящен исследованию эффекта оседания паров щелочного металла – цезия – на стенки газовой ячейки квантового датчика вращения (КДВ) и влияния этого оседания на ширину и амплитуду параметрического резонанса. Предлагается способ оперативного контроля состояния каналов оптической накачки и детектирования КДВ.

Факторы, ограничивающие чувствительность квантового датчика вращения. Физический принцип определения скорости вращения с использованием КДВ на эффекте ядерного магнитного резонанса основан на том, что вектор намагниченности ядер изотопов ксенона совершает прецессионное движение в инерциальном пространстве с постоянной скоростью, определяемой напряженностью магнитного поля, созданного вдоль оси чувствительности КДВ, и гиромагнитным отношением. Во вращающейся системе координат наблюдаемая частота прецессии содержит в себе частоту вращения основания [6, 7].

Объектом исследования выступила кубическая газовая ячейка, изготовленная из боросиликатного стекла, наполненная двумя изотопами благородного газа – ксенона, парами цезия и буферным газом – азотом [8, 9]. В связи с наличием эффекта поглощения стенками ячейки паров цезия, этот щелочной металл добавляется в ячейку в виде капли массой около 5 мг, которая обычно находится в специальном технологическом отростке. В ходе эксплуатации гироскопа давление насыщенных паров цезия регулируется посредством изменения температуры. При остывании прибора (после его выключения) происходит осаждение паров щелочного металла на наиболее холодные стенки, что приводит к перераспределению цезия по ячейке.

В работе исследовалось влияние указанного нежелательного перераспределения цезия по стенкам газовой ячейки на фактор качества резонанса [10–12], который определяет минимальную погрешность измерения частоты резонанса. Фактор качества резонанса – это характеристика колебательной системы, которая в отличие от добротности зависит не только от ширины и амплитуды сигнала резонанса, но и от величины спектральной плотности шума. Ширина резонанса в КДВ является обратной величиной скорости релаксации рабочего вещества и определяется такими факторами, как релаксация цезия на стенках ячейки, поглощение атомов стенками, потеря атомов в резервуаре, спин-обменное и световое уширение линии резонанса. Таким образом, при перераспределении цезия фактор качества резонанса может меняться вследствие как изменения скорости релаксации рабочего вещества, так и изменения прозрачности стенок ячейки. Снижение прозрачности стенок ячейки, вызванное оседанием на них металлического цезия, вызывает падение амплитуды сигнала параметрического резонанса и изменение отношения сигнал/шум.

Научный руководитель к.т.н. начальник лаборатории Безмен Г.В.

Исследование скорости релаксации щелочного металла. На основе накопленных экспериментальных данных о ширине цезиевого резонанса было проведено исследование влияния осаждения паров щелочного металла на скорость релаксации цезия, которая может быть экспериментально определена как полуширина линии резонанса. В соответствии с экспериментальными результатами, полученными за несколько месяцев наблюдений, скорость релаксации цезия увеличилась незначительно, несмотря на видимое ухудшение прозрачности стенок ячейки из-за осевших паров цезия. Экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами математического моделирования зависимости ширины линии резонанса цезия от температуры, учитывающего релаксацию при столкновениях «цезий–цезий».

Исследование изменения прозрачности стенок газовой ячейки. Для предотвращения выхода из строя гироскопа вследствие неконтролируемого перераспределения цезия по стенкам газовой ячейки необходимо решить задачу оперативного контроля прозрачности стенок ячейки. В решении этой задачи могла бы помочь конструктивная доработка оптической схемы КДВ так, чтобы мощность света накачки лазеров измерялась не только после прохода света через ячейку, но и до нее. В каналы накачки и детектирования необходимо установить дополнительный светоделительный куб, который будет контролировать интенсивность светового потока до ячейки. Однако такой куб будет отщеплять порядка 10% мощности лазерного излучения, что снизит эффективность накачки и детектирования. На сегодняшний день мощность лазеров из экспериментальной партии [13] не является достаточной и не позволяет реализовать предложенную схему, поэтому предлагается методика, позволяющая контролировать состояние оптических каналов, используя только интенсивность излучения после ячейки. Для этого частоту лазера необходимо отстроить от линии поглощения щелочного металла, затем при различных интенсивностях излучения лазера накачки и детектирования измерить интенсивность сигнала на соответствующих фотоприемниках. Эта методика не позволяет различить, чем именно вызвано изменение мощности – ухудшением прозрачности ячейки или деградацией лазера, однако может быть применена для контроля работоспособности прибора.

Заключение. По результатам экспериментальных и теоретических исследований сделан вывод о том, что оседание паров цезия на стенки газовой ячейки не приводит к значительному уширению цезиевого резонанса и изменение этого параметра не может являться достоверным признаком нежелательного перераспределения цезия по газовой ячейке. Установлено, что изменение прозрачности оптических каналов из-за осаждения цезия вызывает падение амплитуды сигнала параметрического резонанса, что приводит к ухудшению отношения сигнал/шум и к снижению качества резонанса. Предложенная в работе методика контроля интенсивности нерезонансного света, прошедшего через ячейку, позволяет оперативно контролировать состояние каналов оптической накачки и детектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Эволюция гироскопов // Материалы XX конференции молодых ученых с международным участием "Навигация и управление движением", 2018. С.16–20.
2. **Пешехонов В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация, 2011. № 1 (72). С.3–16.
3. **Умарходжаев Р. М., Павлов Ю.В., Васильев А.Н.** История разработки гироскопа на основе ядерного магнитного резонанса в России в 1960–2000-е годы // Гироскопия и навигация, 2018. Том 26, №1 (100).
4. **Т. Дж. Уокер, М. С. Ларсен.** ЯМР-гироскопы со спин-обменной накачкой // Гироскопия и навигация, 2018. №1 (100). С. 28–54.
5. **Литманович Ю.А., Вершовский А.К., Пешехонов В.Г**. Гироскоп на основе явления ядерного магнитного резонанса: прошлое, настоящее, будущее // Материалы пленарного заседания 7-й Российской мультиконференции по проблемам управления, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», СПб, 2014. С.35–42.
6. **Мейер Д., Ларсен М.** Гироскоп на ядерном магнитном резонансе для инерциальной навигации // Гироскопия и навигация, 2014. №1 (84). С.3–13.
7. **Попов Е.Н., Баранцев К.А., Ушаков Н.А., Литвинов А.Н., Лиокумович Л.Б., Шевченко А.Н., Скляров Ф.В., Медведев А.В**. Характер сигнала оптической схемы квантового датчика вращения на основе ЯМР // Гироскопия и навигация, 2018. Том 26, №1 (100).
8. **Шевченко А.Н., Кузьмин А.Г., Титов Ю.А**. Масс-спектрометрическое измерение состава газовых смесей в ячейках квантового датчика вращения // Научное приборостроение, 2015. Том 25, № 1.

9. **Кислицина Е.А., Шевченко А.Н.** Методика формирования требований к градиенту магнитного поля при определении метрологических характеристик ячеек ядерного магнитного гироскопа // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб, 2018.
10. **Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В.** Физические основы квантовой магнитометрии, 1972. 448 с.
11. **Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалёв А.С., Пешехонов В.Г.** Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация, 2018. Том 26, № 1. С.55–80.
12. **Вершовский А.К., Пазгалев А.С.** Оптимизация фактора качества магнитного Мх-резонанса в условиях оптической накачки // Журнал технической физики, 2008. Т. 78. №. 5.
13. **Малеев Н.А., Блохин С.А., Бобров М.В., Кузьменков А.Г., Кулагина М.М., Устинов В.М.** Источник лазерного излучения для компактного гироскопа на эффекте ЯМР// Гироскопия и навигация, 2018. Том 26, №1.

E.A. Zakharova, A.N. Shevchenko (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg). **Experimental study of the magnetic resonance quality factor dependence on the alkali metal distribution in an atomic gyro vapor cell**

Abstract. Results of the experimental and theoretical studies of cesium distribution along the atomic gyro vapor cell walls influence on the parametric resonance in cesium width and amplitude are presented.

УДК 537.624.8

В.В. ЧАЛКОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

А.Н. ШЕВЧЕНКО
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСТАТОЧНОЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ МАГНИТНОГО ЭКРАНА КВАНТОВОГО ДАТЧИКА ВРАЩЕНИЯ ПО СИГНАЛАМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО РЕЗОНАНСА ЦЕЗИЯ

Приводятся результаты, подтверждающие возможность измерения остаточного магнитного поля в магнитном экране квантового датчика вращения, с использованием сигналов параметрического резонанса цезия. Описан соответствующий алгоритм.

Введение. Известно, что для стабильной работы квантового датчика вращения (КДВ) необходимо, чтобы значение индукции магнитного поля внутри его чувствительного элемента (ЧЭ) не зависело от внешнего магнитного поля [1]. Для снижения влияния внешних магнитных полей применяется система пассивного экранирования и активная система компенсации магнитных полей, построенная на основе магнитных катушек, создающих компенсирующее магнитное поле. Одной из важных проблем, возникающих при создании эффективного экранирования, является наличие остаточной намагниченности магнитного экрана, приводящей к появлению неоднородного магнитного поля внутри ЧЭ. Такая неоднородность отрицательно влияет на степень поляризации рабочего вещества, а при превышении её значения 50 нТл может приводить к неработоспособности КДВ. В связи с тем, что в процессе сборки прибора может произойти намагничивание магнитного экрана КДВ, существует необходимость измерения остаточной намагниченности.

Требуемая точность измерения остаточной намагниченности экранов КДВ находится на уровне единиц нанотесла. Для проведения измерений необходим измерительный прибор с миниатюрным щупом, поскольку требуется проводить измерение намагниченности как конструкции КДВ целиком, так и ее отдельных элементов. Перечисленные факторы не позволяют применить созданные на сегодняшний день магнитометры для измерения остаточной намагниченности. Настоящая работа посвящена решению задачи разработки метода косвенного измерения остаточной намагниченности экрана по сигналам, вырабатываемым КДВ, в частности, по сигналу параметрического резонанса паров щелочного металла цезия, входящих в состав газовой смеси ячейки ЧЭ.

Измерение остаточной намагниченности магнитного экрана. Объектом исследования является КДВ, разрабатываемый для применения в задачах навигации. Принцип действия такого датчика заключается в определении скорости вращения основания по данным о значениях гиромагнитного отношения, величина которого показывает отношение магнитного момента элементарной частицы к её моменту импульса, индукции магнитного поля и наблюдаемой Ларморовской частоты прецессии применяемого вещества [2]:

$$\Omega = B \cdot \gamma - \omega, \tag{1}$$

где Ω – скорость вращения основания; B – значение индукции магнитного поля; γ – гиромагнитное отношение; ω – наблюдаемая Ларморовская частота прецессии.

Для исследования остаточной намагниченности экрана датчик использовался в режиме цезиевого магнитометра [3–6] с изменённой схемой расстройки. В классической схеме такого магнитометра расстройка частоты сигнала происходит путём отстройки частоты переменного магнитного поля от резонансной. В предлагаемом методе расстройка производится путём

Научный руководитель к.т.н. начальник лаборатории Безмен Г.В.

изменения значения индукции постоянного магнитного поля. В результате исследования воздействия на атомы цезия магнитного поля катушки и экрана, а также изменения направления постоянного магнитного поля, создаваемого катушкой, путём подачи на катушку токов разного направления, появляется возможность определения остаточного магнитного поля в экране на основе следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} B_{рез} = K_{кат} \cdot I_{+z} + B_{ост}, \\ B_{рез} = K_{кат} \cdot I_{-z} - B_{ост}, \end{cases} \tag{2}$$

где $B_{рез}$ – теоретическое значение напряженности постоянного магнитного поля при резонансе цезия; $К_{кат}$, $B_{ост}$ – искомые коэффициент катушки и значение остаточного магнитного поля экрана; $I_{\pm z}$ – значения токов подаваемых на катушку, при которых наблюдается резонанс цезия (центры резонанса).

Неизвестные значения токов $I_{\pm z}$ могут быть рассчитаны с помощью аппроксимации резонансного сигнала цезия $U_{изм}$, поступающего с измерительного канала фотоприёмника КДВ (рис.1).

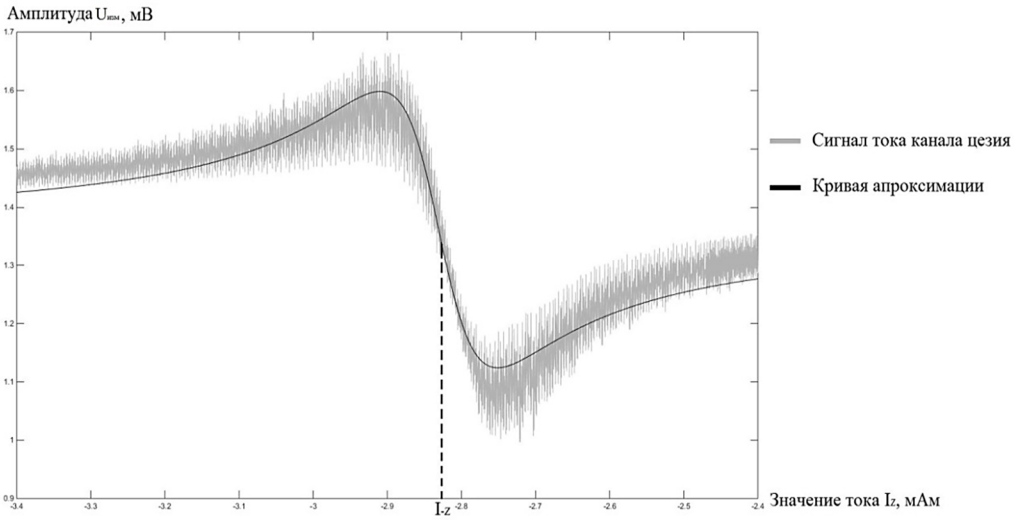


Рис. 1. График сигнала тоика фотоприёмника и его аппроксимация

Такая аппроксимация экспериментальных данных производилась с использованием дисперсионной кривой:

$$y_i = \frac{a \cdot (I_{z,i} - I_{\pm z})}{(I_{z,i} - I_{\pm z})^2 + \lambda^2} + y_0, \quad i = \overline{1.n}, \tag{3}$$

где $I_{\pm z}$ – искомые значения тока, соответствующие центру резонансной линии цезия; y – аппроксимация резонансного сигнала цезия; a, I_z, λ, y_0 – соответственно неизвестное значение амплитуды резонансного сигнала цезия, значение тока, подаваемого на катушку, неизвестная полуширина линии резонансного сигнала цезия, неизвестная постоянная составляющая резонансного сигнала цезия.

Её параметры выбирались с помощью метода обобщённого приведённого градиента [7] из условия минимизации критерия

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{n} (U_{изм,i} - y_i)^2, \tag{4}$$

где $U_{изм}$ – значение сигнала с фотоприёмника, полученное в ходе эксперимента.

Выполненная аппроксимация позволила рассчитать значения $I_{\pm z}$, используя которые, с учётом выражения (2), были рассчитаны значения $K_{кат}$ (5) и $B_{ост}$ (6):

$$K_{кат} = \frac{2B_{рез}}{I_{+z} + I_{-z}}, \tag{5}$$

$$B_{ост.} = \frac{1}{2} \cdot (K_{кат} \cdot I_{-z} - K_{кат} \cdot I_{+z}). \tag{6}$$

Данные, полученные в результате проведения серии операций размагничивания и последующих расчётов остаточной намагниченности, были сведены в таблицу.

Таблица

Данные по размагничиванию магнитного экрана КДВ

№	I_{+z}, мА	I_{-z}, мА	$K_{кат}$, нТл/мА	$B_{ост}$, нТл
1	2,783	-2,794	3,587	-19,479
2	2,806	-2,789	3,576	29,917
3	2,769	-2,846	3,563	-136,451
4	2,800	-2,795	3,577	8,768

Анализируя таблицу, можно сделать вывод о том, что в ходе серии экспериментов было получено значение остаточного магнитного поля, равное 8,8 нТл, которое не превышает максимально допустимого значения остаточной намагниченности, равного 50 нТл.

Заключение. Приведены результаты, подтверждающие возможность измерения напряженности остаточного магнитного поля в магнитном экране квантового датчика вращения с использованием сигналов параметрического резонанса цезия и описан соответствующий алгоритм.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кислицина Е.А., Шевченко А.Н.** Методика формирования требований к градиенту магнитного поля при определении метрологических характеристик ячеек ядерного магнитного гироскопа // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. СПб, 2018.
2. **Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалёв А.С., Пешехонов В.Г.** Гироскоп на ядерно-магнитном резонансе: предельные характеристики. //Гироскопия и навигация. Том 26, №1 (100), 2018. С. 55-80.
3. **Александров Е.Б., Вершовский А.К.** Современные радиооптические методы квантовой магнитометрии // Успехи физических наук. Том 26, №6 (100), 2019. С. 605–637.
4. **Ding, M.** Development and prospect of quantum sensing technology // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием / Науч. Редактор: д.т.н. проф. О.А. Степанов / Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. 443 с.
5. **Риле Ф.** Стандарты частоты. Принципы и приложения. Физматлит, 2009. 512 с.
6. **Лёше А.** Ядерная индукция. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 683 с.
7. **Барышев А.В.** Поиск оптимальных альтернативных решений с помощью Excel в задачах целочисленного программирования // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». Том 7, №4 , 2015. С 1–10.

V.V. Chalkov (State Research Center Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, St. Petersburg), **A.N. Shevchenko** (Concern CSRI Elektropribor, JSC). **Research of the atomic gyroscope magnetic field residual magnetization by parametric resonance signals comparison.**

Abstract. Results that confirm the possibility of measuring an atomic gyroscope magnetic shield residual magnetization using cesium parametric resonance signals are presented.

УДК 621.375.826:681.2.084

А.А. АВИЕВ
(ООО «НПК «Электрооптика», Москва)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

В работе исследуется оптико-электронная система, измеряющая параметры колебаний виброподставки в кольцевом лазерном гироскопе. Система позволяет компенсировать составляющую выходного сигнала гироскопа, обусловленную этими колебаниями. В рамках исследования построена математическая модель движения элементов системы с учётом особенностей её конструкции и влияния внешних механических факторов.

Введение. Широкое распространение среди кольцевых лазерных гироскопов получили приборы с механической виброподставкой [1–3]. Точностные характеристики таких гироскопов существенно зависят от качества компенсации составляющей сигнала, обусловленной относительными колебаниями кольцевого лазера (КЛ) (далее – составляющей виброподставки) [4]. Известные системы и методы компенсации составляющей виброподставки [5–8] имеют ряд недостатков [9], поэтому для её исключения предложено использовать оптико-электронную измерительную систему (ОЭИС), позволяющую определять параметры колебаний виброподставки в реальном времени [9]. Настоящая работа посвящена исследованию поведения подвижных элементов ОЭИС.

ОЭИС. В процессе функционирования реальной измерительной системы параметры её конструкции могут изменяться вследствие работы вибропривода гироскопа. Помимо этого, воздействие внешних механических факторов приводит к дополнительному изменению взаимного расположения элементов ОЭИС. В работе построена математическая модель движения элементов системы, позволяющая определять величины отклонения параметров конструкции от номинальных при различных типах и уровнях внешних возмущений.

Принцип действия и элементы ОЭИС. ОЭИС состоит из транспаранта, оптико-электронного модуля и электронного блока обработки сигналов. Принцип действия системы основан на регистрации лазерного излучения, отражённого от участков транспаранта с измерительными микрометками. Миниатюрный транспарант жёстко закрепляется на моноблоке КЛ, который за счёт вибропривода совершает угловые колебания относительно основания кольцевого лазерного гироскопа. Оптико-электронный модуль, закреплённый на основании гироскопа, формирует лазерное излучение, которое проецируется на транспарант в виде нескольких световых пятен. При движении КЛ это излучение модулируется измерительными микрометками, отражается от транспаранта и регистрируется фотоприёмником оптико-электронного модуля. Дальнейшая обработка и преобразование сигналов осуществляется в электронном блоке.

Выходными сигналами оптико-электронного модуля являются два синусно-косинусных квадратурных сигнала, несущих информацию о величине и направлении перемещения транспаранта. Значение фазы квадратурных сигналов позволяет определять параметры колебаний КЛ.

Математическая модель движения элементов ОЭИС. При построении модели рассматривалось только движение объектива и моноблока КЛ с закреплённым транспарантом, поскольку все остальные элементы ОЭИС юстируются и закрепляются жёстко.

Объектив и моноблок КЛ представляют собой твёрдые тела, имеющие шесть степеней свободы. Движение этих тел складывается из движения их центра масс и вращения вокруг него. Актюатор вместе с объективом и моноблок с виброприводом являются колебательными системами.

Математическая модель построена с использованием уравнений Лагранжа II рода [10,11]:

Научный руководитель д.т.н., проф. Енин В.Н.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i}\right)-\frac{\partial T}{\partial q_i}=Q_i, \tag{1}$$

где T – кинетическая энергия; q_i – обобщённая координата с номером i; Q_i – соответствующая этой координате обобщённая сила; t – время.

В свою очередь, кинетическая энергия складывается из энергии поступательного движения центра масс тела и энергии вращения вокруг него:

$$T=\frac{1}{2}m\vec{V}_c^2+\frac{1}{2}\left(\vec{\omega}_c, I_c\vec{\omega}_c\right), \tag{2}$$

где: m – масса тела; $\vec{V}_c$ – абсолютная скорость поступательного движения центра масс тела; $\vec{\omega}_c$ – абсолютная угловая скорость вращения тела вокруг центра масс; I_c – матрица тензора инерции тела при вращении относительно центра масс.

Модель учитывает: силы упругости, действующие со стороны элементов крепления; силы демпфирования; силы и моменты, связанные с управляющими сигналами; силу тяжести; ускорение, сообщаемое корпусу гироскопа; угловую скорость вращения гироскопа, а также его угловое ускорение. Исследование проводилось путём вычисления координат центра масс твёрдого тела и углов его ориентации. По полученным данным определялись величины отклонения параметров конструкции от номинальных при различных условиях функционирования.

Результаты анализа движения элементов ОЭИС. С использованием математической модели установлен характер изменения параметров конструкции ОЭИС при работе вибропривода гироскопа и получены значения этих параметров при различных величинах внешнего ускорения, угловой скорости и углового ускорения. С учётом результатов, полученных в работе [12], проведена оценка погрешности ОЭИС для условий эксплуатации, приближенных к реальным.

Заключение. В работе построена математическая модель движения элементов оптико-электронной системы, предназначенной для измерения параметров колебаний виброподставки в кольцевом лазерном гироскопе. Проведено математическое моделирование движения элементов системы в процессе её функционирования с учётом внешних возмущений. Получены значения параметров конструкции измерительной системы при различных величинах внешнего ускорения, угловой скорости и углового ускорения. В дальнейшем математическая модель измерительной системы позволит проанализировать работу кольцевого лазерного гироскопа совместно с этой системой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Aronovitz F.** Fundamentals of the ring laser gyro. *Optical Gyros and their Application. RTO-AG-339*. 1999. P. 31–45.
2. **Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В., Голяев Ю. Д. и др.** 50 лет лазерному гироскопу // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: материалы конф. СПб.:АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С. 7–21.
3. **Пешехонов В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация, 2011. № 1. С. 3–17.
4. **Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В.** Основы теории гироскопов. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. 339 с.
5. **Ljung Bo H.G.** Dither pick-off transducer for ring laser gyroscope. Пат. 4406965 США, МПК H 01 L 41/08, G 01 B 9/02; заявитель и патентообладатель The Singer Company. № 262732; заявл. 12.05.81; опубл. 27.09.83.
6. **Зюзев Г.Н.** О компенсации частотной подставки лазерного датчика абсолютной угловой скорости // Труды МВТУ. Теория электрических цепей и элементы систем управления и регулирования, 1982. № 385. С. 10–16.
7. **Friedland B.** Пат. 4888705 США, МПК G 01 C 19/64. System for measuring the position of vibrating object; заявитель и патентообладатель Kearfott Guidance and Navigation Corp. № 112636 ; заявл. 26.10.87 ; опубл. 19.12.89.
8. **Chen A., Li J., Chu Z.** Dither signal removal of ring laser gyro POS based on combined digital filter. *Proc. of the 8th IEEE International Symposium on Instrumentation and Control Technology (ISICT)*, 2012. P. 178–182.
9. **Авиев А.А.** Оптико-электронная система для измерения параметров колебаний виброподставки в кольцевом лазерном гироскопе // Известия ТулГУ. Технические науки, 2016. № 6. С. 14–25.

10. **Тарг С.М.** Краткий курс теоретической механики: Учеб. для втузов. – 10-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. 416 с.
11. **Кветкин Г.А.** Инструментальные погрешности измерительного блока на базе триады лазерных гироскопов при динамических возмущениях: дис. канд. техн. наук: 05.11.03: защищена 18.05.2011. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 206 с.
12. **Енин В.Н., Авиев А.А.** Инструментальные погрешности оптико-электронной системы для измерения параметров виброподставки в лазерном гироскопе // XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: материалы конф. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 292–295.

A.A. Aviev («NPK «Electrooptika» Corp., Moscow). **The mathematical model of elements motion in the optoelectronic measuring system for a laser gyro**

Abstract. We study an optoelectronic system that measures vibration parameters of dither system in a ring laser gyro. The system serves for compensation of the gyro output signal component caused by oscillations. In the context of this study a mathematical model of system elements motion with taking into account its design peculiarities and external mechanical factors influence was composed.

УДК 535.92

А.Б. МУХТУБАЕВ, С.М. АКСАРИН
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОЧЕЧНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В КОНТУРЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА НА ЕГО СИГНАЛ

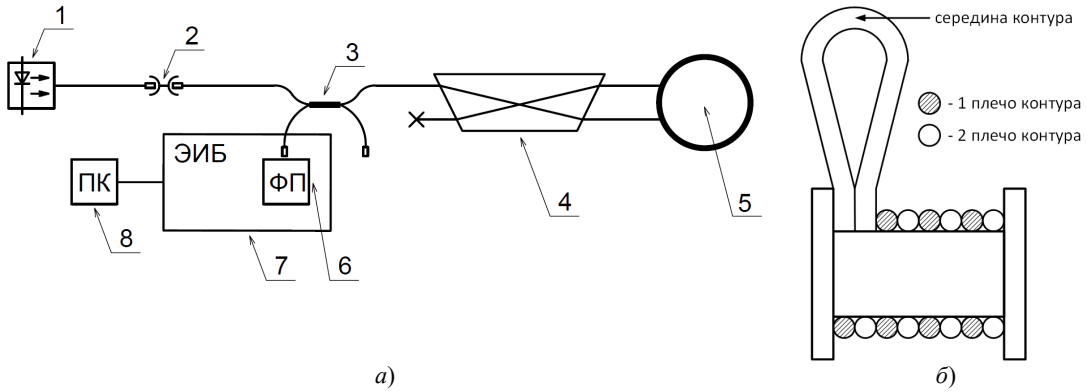
Проведено исследование влияния точечных поляризационных преобразований в контуре волоконно-оптического гироскопа на его сигнал. Обнаружено, что поляризационные преобразования в обоих плечах контура величиной 35 дБ приводят к смещению величины фазового сдвига на $0{,}2\times10^{-3}$ радиан.

Введение. Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) получил широкое распространение и используются в различных областях промышленности. Основными преимуществами ВОГ являются: отсутствие подвижных деталей, устойчивость к ускорениям и вибрациям, высокая чувствительность в широком диапазоне скоростей вращения, высокая надежность, большой срок службы, малые габариты и вес. Принцип работы построен на основе интерферометра Саньяка, в котором замкнутый оптический контур регистрирует разность фаз между двумя встречно-распространяющимися волнами. Чаще всего для изготовления контура используют двулучепреломляющее (ДЛП) оптическое волокно. Такие волокна обладают свойством сохранять линейно-поляризованное излучение по всей своей длине [1, 2].

Волоконно-оптический контур представляет собой многослойную катушку, в которой присутствуют места с перехлестами оптических волокон, микро- и макроизгибы волокна, неоднородности в структуре волокна и вариации силы натяжения волокна [2–4]. Все эти дефекты приводят к поляризационным преобразованиям оптического излучения. В зависимости от величины преобразований в сигнале ВОГ возникают ошибки [2].

Целью настоящей работы была оценка влияния точечных поляризационных преобразований в волоконном контуре ВОГ на его сигнал.

Влияние поляризационных преобразований на сигнал ВОГ. Для оценки влияния точечных поляризационных преобразований был собран экспериментальный стенд, особенностью которого является модифицированный волоконно-оптический контур, который не чувствителен к эффекту Саньяка (рис. 1, *а*). В таком контуре оба плеча наматывались одновременно виток к витку. При таком способе намотки площадь контура стремится к нулю, так же как и разность фаз между встречно распространяющимися волнами, обусловленная вращением контура (рис. 1, *б*).



а) *б*)

Рис. 1. *а*) Схема экспериментальной установки по исследованию влияния точечных поляризационных преобразований в волоконном контуре волоконно-оптического гироскопа на его сигнал: 1 – широкополосный источник излучения; 2 – оптическая розетка; 3 – волоконно-оптический Х-разветвитель с сохранением поляризации; 4 – многофункциональная интегрально-оптическая схема; 5 – модифицированный волоконный контур; 6 – фотоприемник; 7 – электронно-измерительный блок; 8 – персональный компьютер; *б*) модифицированный волоконный контур

Длина ДЛП волокна в модифицированном контуре составила 500 м, диаметр катушки составил 0,27 м. ДЛП волокно было намотано одним слоем виток к витку, таким образом, исключив влияние микро- и макроизгибов в модифицированном контуре на сигнал ВОГ. Использовалось ДЛП волокно со вторичной напрягающей оболочкой [5].

Методика исследования заключалась в следующем: воздействие происходило одновременно в обоих плечах модифицированного контура, величина воздействия составила 0,9 Н, что соответствует величине преобразования порядка 35 дБ [6]. В одном плече воздействие было статичное, во втором плече точка воздействия смещалась в диапазоне от –15 мм до 15 мм относительно точки воздействия в первом плече с шагом 2 мм. Длительность каждого измерения составляла 20 мин.

В результате исследования были получены значения фазового сдвига, обусловленные точечными поляризационными преобразованиями в волоконном контуре ВОГ, в зависимости от смещения точки воздействия (рис. 2). Величина фазового сдвига определялась как среднее значение при разном времени усреднения: 10 мин, 15 мин и 18 мин.

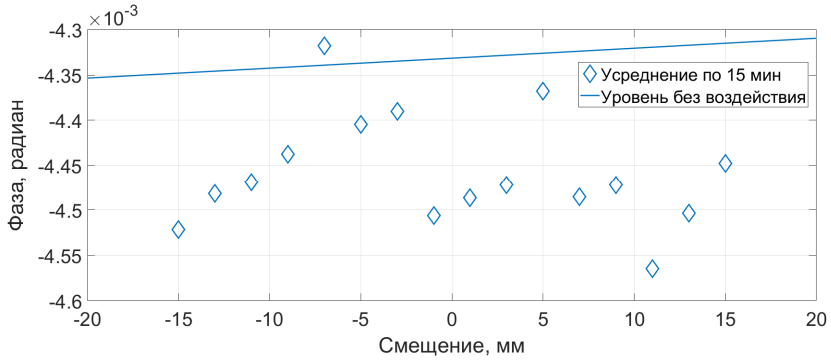


Рис. 2. Влияние точечных поляризационных преобразований в волоконном контуре волоконно-оптического гироскопа на его сигнал

Заключение. Из полученных в ходе экспериментов результатов можно сделать вывод о том, что точечные поляризационные преобразования в волоконном контуре ВОГ, вызванные механическим воздействиям, приводят к дополнительному фазовому сдвигу в сигнале ВОГ, в среднем равному $-0{,}2\times10^{-3}$ радиан относительно уровня без воздействия (прямая линия, рис. 2). Кроме того, наблюдается периодичность значений величины фазового сдвига, причина возникновения которой будет исследована в дальнейших работах.

В будущем планируется продолжить изучение влияния точечных поляризационных преобразований различной величины в контуре ВОГ на его сигнал.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Аксарин С.М.** Исследование поляризационных методов и технологий согласования волоконно-оптических и интегрально-оптических волноводов // Дис. канд. физ.-мат. наук. СПб., 2014. 116 с.
2. Lefevre H.C. Fiber-Optic Gyroscopes. Boston: Artech House, 1993. 313 p.
3. **Мешковский И.К., Киселев С.С., Куликов А.В., Новиков Р.Л.** Дефекты намотки оптического волокна при изготовлении чувствительного элемента волоконно-оптического интерферометра // Изв. вузов. Приборостроение, 2010. Т. 53. No 2. С. 47–51.
4. **Kaminow I.P.** Polarization-maintaining fibers // Applied Scientific Research. 1984. V. 41. No 3–4. P. 257–270.
5. **Bureev S.V., Duleskij K.V., Eronjan M.A.** Method of making single-mode fiber optical waveguides which retain radiation polarization. Patent RF, 2009.
6. **Mukhtubayev A.B., Aksarin S.M., Strigalev V.E.** Polarization extinction ratio of the polarization crosstalk caused by point pressure force in the polarization-maintaining fiber // Optical Fiber Technology, 2017. Vol. 38. P. 119–122.

A.B. Mukhtubayev, S.M. Aksarin (ITMO University, St. Petersburg). **Study of the effect of a point polarization crosstalk in the coil of a fiber optic gyroscope influence on its signal**

Abstract. The influence of the point polarization crosstalk in the coil of the fiber optic gyroscope on its signal was studied. It was found that polarization crosstalk 35 dB in both arms of the coil leads to the change in the phase shift value of -0.2×10^{-3} radians.

▪ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ, СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ ▪

УДК 681.51

С.В. ПАВЛОВА, Р.Г. ЛЮКШОНКОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕКТРОДОВ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА И ЗАКОНОВ ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ НА НИХ

Рассматриваются вопросы оптимизации электродной структуры микромеханических гироскопов (в частности, конфигурации электродов канала вторичных колебаний, обеспечивающих подавление квадратурной и синфазной помех) и законов формирования напряжений на электродах, обеспечивающих инвариантность управления к внешним ускорениям и компенсацию температурных изменений квадратурной и синфазной помех.

Введение. Область применения микромеханических гироскопов (ММГ) постоянно расширяется, однако их использование для решения задач навигации до сих пор ограничивается точностью этих датчиков.

Долгое время основным классификационным параметром, характеризующим точность ММГ, являлось смещение нуля в пуске (Gyro Bias in-run stability – BI) [1]. Однако этот параметр не учитывал влияния воздействий окружающей среды на работу датчиков.

Благодаря многолетним усилиям таких известных фирм, как Analog Devices, Honeywell и Northrop Grumann LITEF эксплуатационные характеристики ММГ значительно улучшились. В последние годы ключевым параметром для оценки точности ММГ становится повторяемость смещения нуля при работе в условиях, заданных техническими требованиями (Gyro Bias Repeatability – BR) [2–4]. Переход от смещения нуля в пуске на уровне 1-3˚/ч к его повторяемости на уровне 5˚/ч потребовал примерно 10-летних усилий [5]. Замедление прогресса в ММГ отмечено в работе [6], где утверждается, что и в 2018 г. фирма NG LITEF пока является единственной фирмой, выпускающей инерциальные измерительные модули (ИИМ) тактического класса точности на микромеханических датчиках.

Первые образцы отечественных ММГ RR-типа со смещением нуля в пуске меньше 10˚/ч были получены в 2011 г. [7]. Эти ММГ включают в себя чувствительный элемент (ЧЭ) с одной подвижной массой (ПМ) на резонансном подвесе для возбуждения первичных колебаний и специализированную интегральную схему (ASIC), используемую в том числе для формирования в канале вторичных колебаний компенсационного режима и температурной компенсации.

Проблемной для отечественных ММГ остается задача достижения повторяемости смещения нуля во всём температурном диапазоне на приемлемом (10-100˚/ч) уровне.

В работе акцент сделан на анализе зарубежных и отечественных исследований, посвященных уменьшению влияния температуры на смещение нуля ММГ за счёт оптимизации электродной структуры (а именно введения новых электродов для подавления квадратурной и синфазной помех, зависящих от температуры), а также совершенствования способов формирования корректирующих воздействий на ПМ.

Анализ зарубежных публикаций. При анализе работы канала вторичных колебаний и оценке смещения нуля ММГ в публикации ф. CEA-LETI учитывают наличие квадратурной и синфазной помех (с амплитудами B_i и B_q соответственно), первая из которых сдвинута на 90° по отношению к полезной составляющей, пропорциональной измеряемой угловой скорости $\Omega(t)$, а вторая с ней синфазна.

Для выделения сигнала, пропорционального $\Omega(t)$, в канале вторичных колебаний используется синхронный детектор или демодулятор, осуществляющий операцию перемножения сигнала емкостного датчика перемещений ПМ на опорный сигнал. Из-за погрешностей формирования опорного сигнала его фаза может быть сдвинута на величину ϕ_{err}.

Как показано в [1], в этом случае выходной сигнал демодулятора Sд может быть представлен в виде:

$$S_д \equiv (B_i + \Omega(t))\cos(\Pi_{егг}) + B_q \sin(\Pi_{егг}) \approx B_i + B_q\Pi_{егг} + \Omega(t). \quad (1)$$

Сумма ($B_i + B_q\Pi_{егг}$) может рассматриваться как смещение нуля ММГ. Средства для его снижения могут включать в себя использование дополнительных электродов (т.н. квадратурных и синфазных), подстройку резонансной частоты и фазы опорного сигнала, компенсационного сигнала от встроенного в ММГ датчика температуры.

Представление о методах улучшения характеристик ММГ, которые являются в значительной части «know how» (как отмечается в [8]), можно получить путем скрупулезного анализа публикаций, содержащих технические решения ведущих зарубежных фирм. Например, в течение 10 лет во всех публикациях о ММГ ф. NG LITEF приводит одну и ту же блок-схему ММГ LL-типа с квадратурными электродами. В одной из этих публикаций отмечено, что для температурной компенсации выходного сигнала используется полином третьего порядка.

Патентные описания указанных выше фирм более информативны по сравнению со статьями. В них описаны конструкции многомассовых ЧЭ с квадратурными электродами и схемами формирования управляющих напряжений на них, а в патентах ф. Analog Devices приведены конструкции ЧЭ LL- и RR-типа типов с квадратурными и синфазными электродами, объяснен алгоритм автоматической подстройки резонансной частоты и опорного напряжения для модуляторов и демодуляторов канала вторичных колебаний [9].

Информация о температурных зависимостях добротности и резонансной частоты подвеса, использовании их для термокомпенсации ММГ приводится в работах коллектива под руководством проф. Shkel A. (США) [10].

Разработка методов уменьшения повторяемости смещения нуля отечественного ММГ. К настоящему времени ЦНИИ «Электроприбор» обладает патентами РФ, защищающими конструкцию ЧЭ с квадратурными электродами [11], методами подстройки резонансной частоты и формирования опорного напряжения демодулятора [12], формирования встроенного датчика температуры (ВДТ) на основе схемы АРУ в канале первичных колебаний [13].

Предлагается осуществлять температурную компенсацию в ММГ с применяемым в настоящее время ASIC, корректируя не только выходной сигнал ММГ, но и подавляя помехи путем формирования напряжений на квадратурных и синфазных электродах с использованием ВДТ. Предлагаемый способ измерения и компенсации величин B_i, B_q, $\Pi_{егг}$ в рабочем диапазоне температур заключается в следующем: с помощью введённых синфазных и квадратурных электродов необходимо создавать компенсирующие моменты, величина которых при различных значениях температуры априорно оценена и введена в память ASIC. Поскольку зависимости квадратурной и синфазной составляющих от температуры носят монотонный характер, их компенсация позволит снизить вносимую ими погрешность на два порядка, тем самым снизив нестабильность смещения нуля до 50-100°/ч при сохранении нестабильности нуля в пуске. Выбор геометрических размеров, а также расположения квадратурных и синфазных электродов осуществляется с учётом величин создаваемых компенсирующих моментов. Для расчёта оптимальной площади электродов используется критерий, предложенный в патенте [14].

Заключение. Проведён анализ зарубежных методов уменьшения нестабильности нуля микромеханических гироскопов, предложена электродная структура канала вторичных колебаний микромеханического гироскопа, обеспечивающая подавление квадратурной и синфазной помех, а также законы формирования напряжений на указанных электродах, обеспечивающие компенсацию температурных изменений квадратурной и синфазной помех. Данное решение позволит снизить нестабильность смещения нуля микромеханического гироскопа до 50-100°/ч при сохранении существующей технологии изготовления ЧЭ и используемой интегральной микросхемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Aranaud Walther et al.** Bias Contribution in a MEMS Tuning Fork Gyroscope / Christophe Le Blanc / Journal Of Electromechanical Systems, vol. 22, №2, 2013.
2. Gyroscopes and IMUs for Defense Aerospace & Industrial. Yole Developpement, France, September 2012.
3. **K.Froyum et al.** Honeywell Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) Inertial Measurement Unit (IMU)pp.831-836.
4. **W. Geiger et al.** MEMS IMU for AHRS Applications 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, pp. 225-231.
5. uIMU-I Micro Inertial Measurement Unit, Datenblatt_uIMU-I(1).pdf
6. **U.Herberth, J. Rende, H. Lutz.** Development of Inertial Sensors for AHRS considering DO-254, Inertial Sensors and Systems 2018,
7. **В. Г. Пешехонов** и др. Результаты испытаний установочной партии микромеханических гироскопов RR-типа, *Гироскопия и навигация*. *Том 1, 2011, с. 37-48.*
8. **Евстифеев М.И. Д. П. Елисеев.** Оптимизация конструкции подвижного электрода микромеханического гироскопа RR-типа // Гироскопия и навигация. Том 25, № 2 (97), 2017.
9. **J.A. Geen,** Mode-matching apparatus and method for micromachined inertial sensors / Patent US8616055.
10. **Trusov A.A., Schofield A.R., Shkel A.M.** Study of substrate energy dissipation mechanism in in-phase and anti-phase micromachined vibratory gyroscopes // IEEE Sensors, 2008. С. 168-171.
11. **Некрасов Я.А.**, Электродная структура для микромеханического гироскопа и микромеханический гироскоп с этой структурой (варианты), патент РФ № 2344374, заявл. 17.07.2007, опубл. 20.01.2009
12. **Некрасов Я.А., Несенюк Л.П.** Способ подстройки резонансной частоты подвеса подвижной массы микромеханического гироскопа по оси вторичных колебаний и микромеханический гироскоп, патент РФ № 2308682, заявл. 23.05.2006, опубл. 20.10.2007
13. **Некрасов Я.А., Моисеев Н.В., Люкшонков Р.Г.** Устройство стабилизации температуры микромеханического гироскопа, пол. модель РФ № 150023, заявл. 19.09.2014, опубл. 27.01.2015
14. **Некрасов Я.А., Багаева С.В.** Микромеханический гироскоп RR-типа, патент РФ № 2375678 / АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», заявл. 06.10.2008, опубл. 12.10.2009

S.V. Pavlova, R.G. Lyukshonkov (State Research Center of the Russian Federation Cocern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg). **Optimization of micromechanical gyro electrodes configuration and their voltage generation laws**

Abstract. The paper addresses the issues of optimization of the electrode structure in micromechanical gyros (in particular, electrodes configuration in the secondary oscillations channel, which ensure suppression of out-of-phase and common-mode interference), and the laws of voltage generation on the electrodes to provide control invariance to external accelerations and compensation of temperature-induced variations in the out-of-phase and common-mode interference.

УДК 531.383

А.В. СТАРЦЕВА, А.С. КОВАЛЕВ, Р.С. ЕФРЕМОВ
(ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Рассматривается влияние параметров клеевых соединений, применяемых при изготовлении микромеханических гироскопов, на механические параметры чувствительного элемента гироскопа. С помощью статистического и корреляционного анализов исследуется изменение основных механических параметров чувствительного элемента после его монтажа с использованием клеевого соединения и выявлена связь добротности первичных колебаний с уровнем квадратурного сигнала. Исследована гипотеза о возможном механизме связи этих параметров, на основании которой уточнена математическая модель гироскопа.

Введение. При запуске производства новых приборов одной из важных задач является анализ влияния технологических процессов их изготовления на конечные характеристики изделия. На этапе проектирования учесть все возможные технологические аспекты, влияющие на характеристики конечного изделия, достаточно сложно, однако в случае выявления их влияния по результатам изготовления требуется разработка мер по их анализу и, при необходимости, устранению причин или последствий. Существует несколько методологий выявления таких параметров и обоснования принятия решений об изменении конструкции или технологии изготовления приборов при производстве, например, методология FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) [1], статистические методы и т.д.

В настоящей работе рассматривается вопрос выявления причин изменения характеристик микромеханического гироскопа (ММГ), разрабатываемого АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» [2], при его изготовлении (рис. 1).

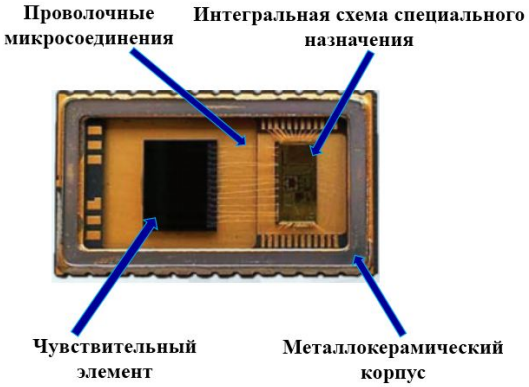


Рис. 1. Конструкция микромеханического датчика

Основным элементом ММГ, определяющим его характеристики, является микромеханический чувствительный элемент (ЧЭ) датчика [3]. В процессе изготовления ЧЭ монтируется в корпус и подвергается различного рода воздействиям – вибрация, температура, механические напряжения, создаваемые материалом монтажа, и т. д. [4–6]. В идеальном случае параметры ЧЭ должны оставаться неизменными, однако на практике это случается не всегда, что приводит к разбросам характеристик гироскопа. Для рассматриваемой конструкции ЧЭ основными механическими параметрами являются: частоты первичных и вторичных колебаний ротора, добротности первичных и вторичных колебаний ротора, уровень квадратурного сигнала, возникающего из-за технологических неточностей при изготовлении и обуславливающего смещение нуля датчика. Эти параметры ЧЭ могут быть оценены до этапа изготовления гироскопа (на уровне пластины) и после изготовления в составе датчика, что делает возможным постановку направ-

Научный руководитель д.т.н. Евстифеев М.И.

ленного эксперимента по оценке влияния параметров изготовления на характеристики ЧЭ и, в дальнейшем, на характеристики прибора.

Цель настоящей работы заключается в исследовании влияния параметров клеевого соединения ЧЭ с корпусом, которые определяются параметрами процесса монтажа, на приведенные выше механические характеристики ЧЭ.

Результаты изготовления экспериментальных партий. Для проведения эксперимента было изготовлено 14 партий ММГ с различными вариантами монтажа ЧЭ на клей. Варьируемыми параметрами клеевых соединений являлись конфигурация рисунка клея, время нанесения одной точки клея, сила прижима чипа, время прижима чипа. После изготовления контролировались значения механических параметров ЧЭ и определялись их изменения.

Статистический анализ характеристик. Статистический анализ полученных результатов заключался в оценке изменения абсолютных и средних значений величин механических параметров ЧЭ и их среднеквадратических отклонений в каждой партии до и после изготовления. По результатам анализа было определено несколько общих явлений. Так, для всех образцов, независимо от режимов монтажа, уменьшилась добротность первичных колебаний, снизилась частота вторичных колебаний и увеличился уровень квадратурного сигнала. В результате анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что зависимости изменения механических параметров ЧЭ от параметров монтажа нет, так как изменение параметров от партии к партии оставалось на одном уровне. Однако сам факт изменения механических характеристик ЧЭ в процессе сборки требует объяснения. Анализ возможных причин такого изменения позволил предположить, что:

1) выявленное изменение добротности первичных колебаний может быть обусловлено разделением пластины с ЧЭ на отдельные чипы;

2) выявленное изменение добротности первичных колебаний может быть обусловлено свойствами применяемого клея;

3) выявленное изменение частоты вторичных колебаний вызвано особенностями схемы их измерения до монтажа чипов и в составе прибора;

4) выявленное изменение квадратурного сигнала требует дополнительного анализа и изучения.

Стандартная модель динамики ЧЭ [7], описывающая зависимость квадратурного сигнала от разности частот первичных и вторичных колебаний и добротности вторичных колебаний, не позволила обосновать изменение квадратурного сигнала, полученное в результате эксперимента. Так, до монтажа приведенный уровень квадратурного сигнала в среднем составлял 0,47 условных единиц, теоретический прогноз составлял увеличение квадратурного сигнала после сборки до уровня 0,64 условных единиц, а на практике увеличение произошло до уровня 1,3. Таким образом, имеются другие причины, вызывающие изменение квадратурного сигнала. Исходный квадратурный сигнал может быть обусловлен следующими факторами:

- механическими – перекос ротора, динамический дисбаланс;
- электрическими – несбалансированные паразитные электрические связи, приводящие к появлению потенциалов на электродах датчиков вторичных колебаний при подаче управляющего напряжения на датчик момента первичных колебаний.

Дополнительно был проведен корреляционный анализ взаимного влияния изменения оцениваемых величин друг на друга, который показал, что в экспериментальных партиях одновременно наблюдается два явления – уменьшение добротности первичных колебаний и увеличение величины квадратурного сигнала. Предметом дальнейших исследований было установление наличия связи между этими параметрами и ее теоретического обоснования.

Анализ связи между добротностью первичных колебаний и квадратурным сигналом. Для объяснения возможной связи добротности первичных колебаний и квадратурного сигнала исследовалась гипотеза, основанная на следующих предположениях:

1) монтаж компонента вызывает дополнительные напряжения в конструкции ЧЭ, которые приводят к дополнительному перекосу ротора относительно корпуса прибора;

2) при перекосе ротора возможно появление проекции вектора момента двигателя, возбуждающего первичные колебания, на ось вторичных колебаний и ось чувствительности;

3) при уменьшении добротности первичных колебаний после монтажа чипов для поддержания заданной амплитуды колебаний системой управления в составе прибора вырабатывается больший момент двигателя;

4) при увеличении момента двигателя для возбуждения первичных колебаний заданной амплитуды из-за дополнительного перекоса ротора, возникающего при монтаже, увеличивается и проекция момента двигателя на ось вторичных колебаний, приводящая, в свою очередь, к дополнительному увеличению квадратурного сигнала.

Для проверки сформулированной гипотезы была разработана математическая модель, учитывающая влияние проекции момента двигателя. По результатам проведенного моделирования установлено, что такой механизм воздействия действительно вносит вклад в величину квадратурного сигнала, однако дополнительное исследование показало, что вклад этой составляющей незначителен по сравнению с механическими моментами из-за перекоса ротора и не обосновывает величину экспериментально полученного изменения квадратурного сигнала. В рассматриваемом случае одновременное снижение добротности первичных колебаний при существенном увеличении квадратурного сигнала после монтажа чипов можно считать совпадением, вызванным влиянием третьих факторов, требующих дополнительного изучения.

Заключение. В работе приводятся результаты исследования влияния параметров монтажа чипов ЧЭ ММГ на изменение их механических характеристик, а также исследования связи между величиной добротности первичных колебаний и уровнем квадратурного сигнала. Выявлено, что величина изменения характеристик ЧЭ не зависит от параметров монтажа чипов. По итогам статистического анализа отмечено одновременное изменение добротности первичных колебаний и уровня квадратурного сигнала. Предложена гипотеза о наличии зависимости между этими параметрами и разработана математическая модель для ее проверки. Результаты моделирования подтвердили предложенную гипотезу, однако полученная зависимость хотя и имеет место, но не является превалирующим фактором, обуславливающим изменение квадратурного сигнала после монтажа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Годлевский В. Е.; Дмитриев А. Я., Юнак Г. Л.** Применение метода анализа видов, причин и последствий потенциальных несоответствий (FMEA) на различных этапах жизненного цикла автомобильной продукции / Под ред. В.Я. Кокотова. Самара: Перспектива, 2002. 160 с.
2. **В. Г Пешехонов, Л. П. Несенюк, Д. Г. Грязин, М. И. Евстифеев, Я. А. Некрасов** Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ" Электроприбор" // Мехатроника, автоматизация, управление, 2008. С. 29–31.
3. **В.Г. Пешехонов, Л.П. Несенюк, С.Г. Кучерков, М.И. Евстифеев, Я.А. Некрасов, С. Ренар, П. Пфлюгер, К. Пизелла, Ж. Колле.** Результаты разработки микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2005. №3. С. 44–51.
4. **Cho J., Walwadkar S. S.,Farrell P. W., Felton L. E.** Effect of Die-Attach Adhesives on the Stress Evolution in MEMS Packaging / International Microelectronics and Packaging Society; 5288, 2003. p. 847–852.
5. **Satyajit S. Walwadkar ; Junghyun Cho** Evaluation of Die Stress in MEMS Packaging: Experimental and Theoretical Approaches, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies V.: 29 , Issue: 4 , 2006. P. 735–742)
6. **Zhanqiang Hou, Dingbang Xiao, Xuezhong Wu, Jianbin Su, Zhihua Chen, Xu Zhang** Effect of die attachment on key dynamical parameters of micromachined gyroscopes, Microsystem Technologies, Volume 18, Issue 4, 2012. P. 507–513.
7. **А.С. Ковалев, Е.В. Логовская.** Методы снижения влияния разбросов конструктивных параметров микромеханического гироскопа на его характеристики // X конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». Санкт-Петербург, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. С.362–369.

A.V. Startceva, A.S. Kovalev, R.S. Efremov (Concern CSRI "Electropribor" JSC, Saint-Petersburg). **Research of the parameters adhesive materials effect on the characteristics micromechanical gyroscope**.

Abstract. The article is devoted to studying the effect of the parameters of adhesive joints used in the manufacture of micromechanical gyroscopes on the internal parameters of the sensitive element. Using statistical analysis, the change in the basic parameters of the sensitive element after its installation using adhesive bonding is shown. Correlation analysis revealed a connection between the quality factor of the primary oscillations and the level of the quadrature signal. Presentation of a hypothesis of mechanical and mathematical models confirming this hypothesis.

УДК 531.768

Н.В. МОЖГОВА, А.В. ЛУКИН
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Институт прикладной математики и механики)

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА В УСЛОВИЯХ ПОСТУПАТЕЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ И АКУСТИЧЕСКИХ ПОМЕХ

Рассмотрены вопросы моделирования динамики микромеханического акселерометра. Выполнены аналитические и численные расчеты упругой и емкостной характеристик датчика. Составлена математическая модель, учитывающая нелинейность характеристик акселерометра и внешнюю нагрузку в виде поступательной вибрации. Проведен анализ амплитудно-частотных характеристик, сделаны выводы о применимости рассматриваемой математической модели в различных случаях.

Введение. Микромеханические акселерометры (далее – ММА) характеризуются малыми размерами и массой, а также низкой стоимостью, благодаря чему применяются в самых разных областях, таких как аэрокосмическое приборостроение, авиация, автомобилестроение и др. [1, 2]. В некоторых применениях условия работы ММА могут быть жесткими и включать в себя поступательные вибрации, акустические шумы или удары [3]. При воздействии поступательных вибраций на частотах, близких к резонансной частоте подвеса, на выходе датчиков может появляться сигнал при отсутствии входного воздействия. В [4] показано, что даже камертонные гироскопы, которые невосприимчивы к вибрационным ошибкам, вызванным динамическим откликом механической структуры, могут быть чувствительными к вибрации в определенных ситуациях (с акселерометрами ситуация аналогична).

Некоторые известные методы и технические решения по повышению стойкости ММГ к механическим воздействиям приведены в [3] и [5]. Ключевой задачей здесь является обеспечение постоянства коэффициента преобразования ускорения в выходной сигнал прибора, что связано с уменьшением или компенсацией нелинейных факторов механической (упругая характеристика подвеса) и электрической (нелинейная силовая характеристика электрического поля) природы. Предлагаемый доклад посвящен построению аналитической модели, описывающей движение инерционной массы ММА, и качественному (параметрическому) анализу нелинейной динамики ММА в условиях поступательных вибраций.

Исследование нелинейной динамики микромеханического акселерометра. В качестве исследуемого объекта был выбран емкостной ММА, состоящий из чувствительного элемента – инерционной массы, системы электродов и четырех подвесов, описанных ниже. Геометрические параметры заданы и показаны на рис. 1.

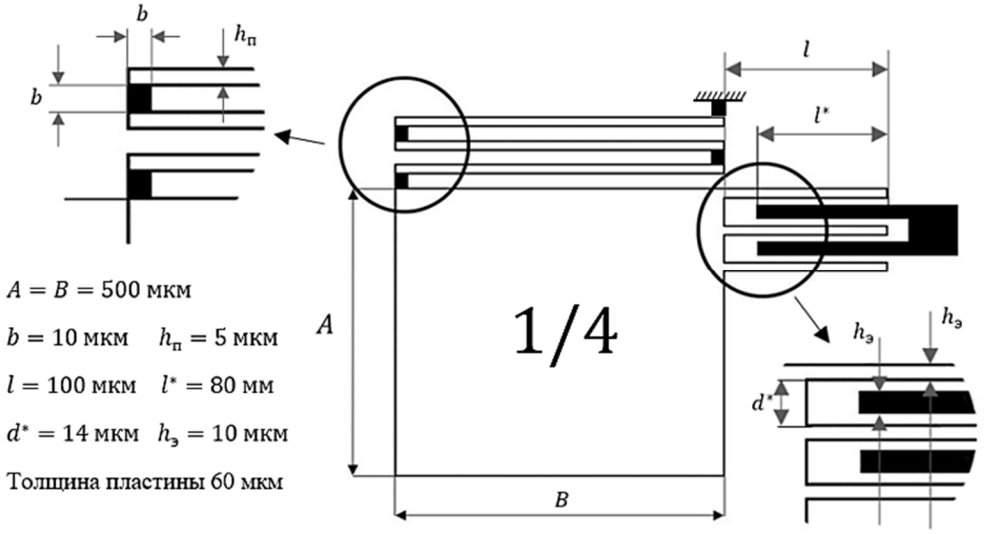


Рис. 1 Геометрические параметры 1/4 части чувствительного элемента ММА

Статические расчеты. Была проведена аналитическая оценка жесткости подвеса ММА по оси чувствительности, а также проведены статические расчеты в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS с целью вычисления собственных частот и жесткости подвеса ММА. С помощью решения задачи электростатики для области межэлектродного зазора выполнен расчет емкостной характеристики датчика перемещений и соответствующей пондеромоторной силы, действующей на подвижную массу. Проведённые статические расчеты позволили оценить параметры ММА для последующего построения его математической модели.

Математическая модель ММА. Была составлена математическая модель, описывающая нелинейную динамику ММА. Уравнение нелинейной динамической модели выглядит следующим образом [6]:

$$\ddot{x} + \varepsilon\mu\dot{x} + x + \varepsilon\beta x^3 = \varepsilon\lambda\left[\frac{1}{(1-x)^2} - \frac{1}{(1+x)^2}\right] + \langle\varepsilon\rangle F sin\Omega t, \qquad (1)$$

где $x = \frac{u}{d}$ (u – смещение инерционной массы, d – зазор между электродами) – относительное смещение инерционной массы; $\mu = \frac{c}{\sqrt{mk}}$ (c – коэффициент демпфирования среды, m – масса ММА, k – жесткость упругого подвеса) – коэффициент диссипации; β – коэффициент нелинейности подвеса, $\lambda = \frac{1}{2}\frac{\epsilon_r\epsilon_0 SV^2}{kd^3}$ (ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды в пространстве между обкладками, $\epsilon_0 = 8{,}854\cdot10^{-12}\,Ф\cdot м^{-1}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума, S – площадь обкладки, V – разность потенциалов) – безразмерный параметр, определяющий соотношение между пондеромоторной и упругой силами, действующими на систему; F и Ω – амплитуда и частота вибраций; ε – малый безразмерный параметр.

В докладе проведён качественный анализ предложенной динамической модели, рассмотрена конкретная компоновка ММА и к ней применена построенная математическая модель. Получены выводы об эксплуатационных характеристиках, а именно, применяя метод прямого разложения, были найдены резонансные частоты – главный резонанс – $\Omega^* = 1$ и вторичные – $\Omega^* = 0$, $\Omega^* = \frac{1}{3}$, $\Omega^* = 3$. Введен параметр частотной расстройки и применен метод многих масштабов. С его помощью построены АЧХ и ФЧХ акселерометра (рис. 2), анализ которых позволил также сделать выводы о допускаемых амплитудах вибрации (при амплитудах, превышающих полученные значения, пластины конденсатора «схлопнутся», эффект «pull-in» [7]).

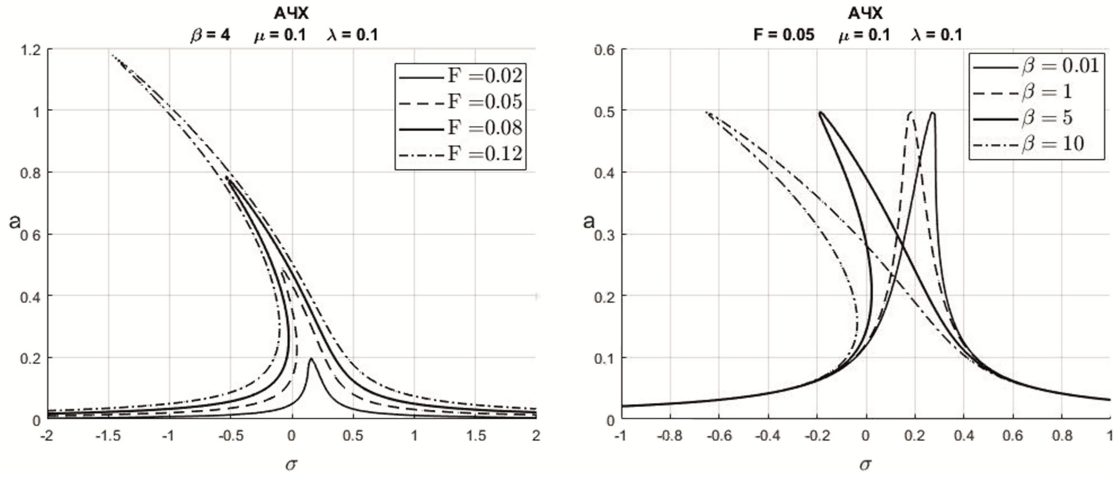


Рис. 2 Зависимость АЧХ от различных факторов (слева – зависимость от амплитуды вибраций, справа – от коэффициента нелинейности подвеса)

Заключение. В работе проведен анализ математической модели микромеханического акселерометра при работе в условиях поступательных вибраций. В качестве дальнейших иссле-

дований планируется рассмотрение нелинейных задач электроупругости для различных подвижных чувствительных элементов микроэлектромеханических систем с целью выявления и качественного исследования некоторых конструктивных свойств, например, допускаемых значений физических параметров систем, структуры положений равновесия и др. Также планируется верификация численных методов решения связанных нелинейных задач электроупругости на основе полученных аналитических зависимостей.

Работа проводилась при поддержке АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

ЛИТЕРАТУРА

1. **Распопов В. Я.** Микромеханические приборы. Учебное пособие. /Тул. Гос. университет. 2002.
2. **Мокров Е. А.** Интегральные датчики. Состояние разработок и производства. Направления развития, объемы рынка // Датчики и системы. 2000. Т. 20. №. 00. С. 2–8.
3. **Некрасов Я. А.** и др. Влияние поступательных вибраций, ударов и акустических помех на характеристики микромеханического гироскопа //Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. №. 2. С. 56–67.
4. **Yoon S. W., Lee S., Najafi K.** Vibration-induced errors in MEMS tuning fork gyroscopes //Sensors and Actuators A: Physical. 2012. Т. 180. С. 32–44.
5. **Евстифеев М. И., Елисеев Д. П., Челпанов И. Б.** Методы повышения стойкости микромеханических гироскопов к механическим воздействиям //Гироскопия и навигация. 2014. №. 4. С. 56–68.
6. **Лукин А.В.** Нелинейная динамика и устойчивость упругих элементов нано- и микросистемной техники в связанных полях. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. СПбПУ, 2018 [Электронный ресурс].
   Режим доступа: http://www.ipme.ru/ipme/edu/diss/Lukin/diss_Lukin.pdf, свободный. Яз. рус.
7. **Younis M. I.** MEMS linear and nonlinear statics and dynamics. – Springer Science & Business Media, 2011. Т. 20.

N.V. Mozhgova, A.V. Lukin (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, department of Mechanics and Control Processes). **Nonlinear dynamics of microelectromechanical accelerometer in conditions of translational vibrations and acoustic noise**

Abstract. This paper reviews the issues of modeling the dynamics of a microelectromechanical accelerometer. Analytical and numerical calculations of sensor elastic and capacitive characteristics were performed. A mathematical model was compiled taking into account the nonlinear characteristics of the accelerometer and the external load in the form of translational vibration. An analysis of the amplitude- and phase-frequency response was performed, conclusions on the applicability of the mathematical model in various cases were drawn.

УДК 534.134

А.В. ЛУКИН
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Институт прикладной математики и механики)

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА БАЛОЧНЫХ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ПРИ ЛАЗЕРНОМ ТЕРМООПТИЧЕСКОМ ВОЗБУЖДЕНИИ КОЛЕБАНИЙ

Представлена математическая модель микроэлектромеханического резонатора, основанного на лазерном термооптическом принципе генерации изгибных колебаний балочного подвижного элемента и электростатическом принципе съема выходного сигнала. Получено решение нестационарного уравнения теплопроводности в объеме резонатора при периодическом локализованном лазерном воздействии и вычислены температурные силовые факторы, приводящие к изгибным колебаниям. Исследована нелинейная динамика резонатора с учетом связанности продольных и поперечных движений.

Введение. Принцип лазерного термооптического воздействия на деформируемую среду находит все более широкое применение в задачах неразрушающего контроля оборудования и конструкций [1–4], определения физико-механических свойств материалов [5, 6], изучения геометрических и физических параметров объектов и структур на нано- и микромасштабном уровне [7, 8], в биомедицине [9], а также в индустрии нано- и микросистем [10–16]. Так, в работах [11, 12] представлены модели микромеханических актуаторов, использующих оптический метод сообщения упругому элементу температурных деформаций. В [13] исследуются вопросы влияния лазерного излучения на деформации поверхности микромеханических зеркал. Одним из важных направлений разработок и исследований в указанной области является лазерная термооптическая генерация колебаний подвижных элементов микроэлектромеханических систем различного назначения (датчики, системы обработки сигналов). В [10] представлены результаты разработки волоконно-оптических сенсоров, работающих в авторезонансном режиме при оптическом возбуждении. В [14] теоретически обоснован и экспериментально проверен метод лазерной термооптической частотной подстройки микромеханического резонатора и управления его нелинейной амплитудно-частотной характеристикой. В [16] сообщается об успешных экспериментах по термооптическому возбуждению многомодового параметрического резонанса в графеновых мембранах; отмечено, что математическое моделирование указанного процесса требует учета нелинейных упругих и диссипативных свойств системы.

Проблемы аналитического исследования связанных термоупругих колебаний рассматриваются в большом количестве монографий и статей (см., например, [17–20]). В ряде работ изучаются тепловые и механические процессы в балочных элементах конструкций при нестационарных температурных воздействиях [21–26]. Настоящий доклад посвящен построению и исследованию математических моделей динамики микромеханического балочного резонатора при периодическом локализованном термооптическом воздействии.

Построение и исследование математической модели. Рассматриваемая модель резонатора основана на лазерном термооптическом принципе генерации изгибных колебаний балочного подвижного элемента и электростатическом принципе съема выходного сигнала. Схема резонатора показана на рис. 1.

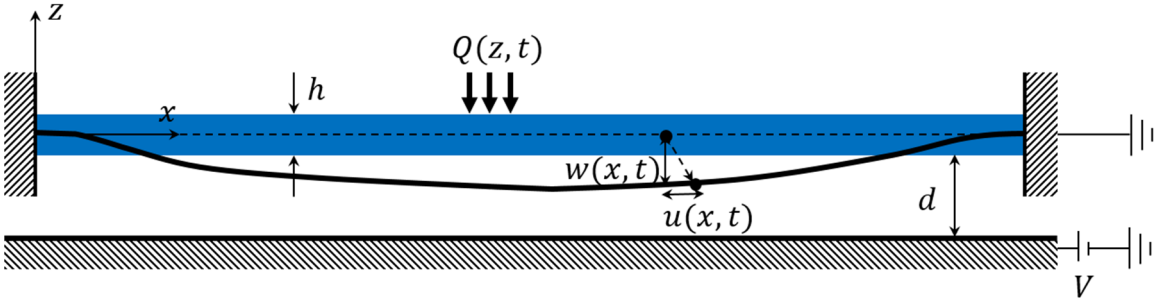


Рис.1. Схема микромеханического резонатора

При невысоких мощностях падающего света действие лазерного импульса на поверхность балки сводится к появлению теплового фронта, распространяющегося по её объему. Неравномерность и нестационарность поля температуры как по толщине, так и по длине балки в общем случае приводит к появлению изгибающего момента и осевого усилия. Примем, что объемное тепловыделение $Q(x,z,t)$ при периодическом локализованном действии лазера имеет вид

$$Q(x,z,t) = Q_0 H(t) H(l-|x|) e^{\frac{z-\frac{h}{2}}{\delta}} (1+Q_1 \sin \Omega t), \qquad (1)$$

где $Q_{0,1}, \Omega$ – параметры, характеризующие мощность и частоту теплового воздействия; δ – характерная глубина проникновения света в материал; l – длина облучаемого участка балки; H – функция Хевисайда.

Основные уравнения рассматриваемой физически нелинейной связанной задачи термоэлектроупругости, описывающие нелинейные колебания балки, имеют вид

$$u'' + w'w'' = \frac{1-\nu^2}{Eh}\rho h\ddot{u} + \frac{(1+\nu)\alpha}{h}\int_{-h/2}^{h/2}\frac{\partial T}{\partial x}dz,$$

$$\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}w^{IV} + \rho h\ddot{w} + \frac{E\alpha}{1-\nu}w''\int_{-h/2}^{h/2}(T-T_0)dz = \frac{\rho h^3}{12}\ddot{w}'' - \frac{E\alpha}{1-\nu}\int_{\frac{h}{2}}^{h/2} z\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}dz + \frac{Eh}{1-\nu^2}\left(u' + \frac{1}{2}w'^2\right)w'' + \frac{\epsilon_r\epsilon_0 V^2}{2(d-w)^2} \qquad (2)$$

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + Q(x,z,t) = \left[\rho c_p + \frac{E\alpha^2(1+\nu)T_0}{(1-\nu)(1-2\nu)}\right]\frac{\partial T}{\partial t} + \beta\left(\dot{u}' - z\dot{w}''\right),$$

где u, w – продольное и поперечное перемещения сечения; T, T_0 – актуальная и отсчетная температура; d – величина межэлектродного зазора; V – напряжение на электродах; E – модуль Юнга; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала; α_T – коэффициент линейного температурного расширения; $\epsilon_r\epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость среды в зазоре между электродами; k – коэффициент теплопроводности материала балки; c_p – удельная теплоемкость; $\beta = \frac{E\alpha_T}{1-2\nu}$ – коэффициент, связывающий приращение температуры со скоростью изменения объема деформируемого тела $e = -z\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}$.

Стационарное периодически изменяющееся температурное поле найдено путем решения уравнения теплопроводности для прямоугольной области в пренебрежении малым дилатационным членом, ответственным за термоупругое поглощение звука $(\beta = 0)$. Вычислены периодические во времени температурный момент и осевая сила, действующие на балку.

Нелинейная динамика резонатора при гармоническом тепловом воздействии исследована с помощью асимптотических методов нелинейной механики (метод многих масштабов, теория линейных операторов) с учетом связанности продольных и поперечных движений. Построены амплитудно-частотные характеристики системы в областях главного и вторичных резонансов.

Заключение. Исследование построенной математической модели резонатора позволило непосредственным образом связать динамические характеристики системы с её геометрическими и физико-механическими свойствами, а также параметрами лазерного термооптического воздействия. В качестве направления дальнейших исследований нужно отметить вопрос о степени влияния термоупругой диссипации на резонансные свойства подвижного элемента, а также в целом задачу определения оптимальных параметров воздействия с точки зрения требуемых эксплуатационных характеристик прибора.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 17-01-00414 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Муратиков К.Л.** Теория и методы лазерной диагностики материалов, основанные на генерации акустических и тепловых волн - диссертация д.ф.-м.н. *Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН.* 2008
2. **Быченок В.А.** Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений в тонкостенных элементах изделий ракетно-космической техники. *Известия ВУЗов. Приборостроение.* 2011. Т. 54. №7.
3. **Карпенко О.Н., Олешко В.С., Попов А.В., Самойленко В.М.** Об оценке напряженно-деформированного состояния лопаток газотурбинного двигателя лазерным оптико-акустическим методом. *Научный вестник МГТУ ГА*. 2014. № 206.
4. **Ochiai M.** Laser-induced surface acoustic wave technique for precise depth measurement of stress corrosion cracking. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2011. № 278.
5. **Pan Y., Rossignol C., Audoin B.** Acoustic waves generated by a laser line pulse in cylinders; Application to the elastic constants measurement. *J. Acoust. Soc. Am.* 2004. № 115.
6. **Chow G.** et. al. Laser-induced surface acoustic waves: An alternative method to nanoindentation for the mechanical characterization of porous nanostructured thin film electrode media. *Mechanics of Materials.* 2015. № 91.
7. **Champion A., Bellouard Y.** Direct volume variation measurements in fused silica specimens exposed to femtosecond laser. *Optical Materials Express*. 2012. Vol. 2. № 6.
8. **Otsuka P.** Time-domain imaging of gigahertz surface waves on an acoustic metamaterial. *New J. Phys.* 2018. № 20.
9. **Li C.** et.al. Laser induced surface acoustic wave combined with phase sensitive optical coherence tomography for superficial tissue characterization. *Biomed. Opt. Expr.* 2014. Vol. 5. № 5.
10. **Zook J.D.** et. al. Optically excited self-resonant microbeams. *Sensors and Actuators A.* 1996. № 52.
11. **Phinney L.M.** et. al. Damage of MEMS thermal actuators heated by laser irradiation. *Proc. Of SPIE.* 2005. Vol. 5716.
12. **Serrano J.R.**, Phinney L.M. Displacement and Thermal Performance of Laser-Heated Asymmetric MEMS Actuators. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2008. Vol 17. № 1.
13. **Mai A.** et. al. In situ bow change of Al-alloy MEMS micromirrors during 248-nm laser irradiation. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS.* 2016. Vol. 15.
14. **Yang T., Bellouard Y.** Laser-Induced Transition between Nonlinear and Linear Resonant Behaviors of a Micromechanical Oscillator. *Physical Review Applied.* 2017. №. 7.
15. **Kuhn S.** et. al. Optically driven ultra-stable nanomechanical rotor. *Nature Communications.* 2017. № 8.
16. **Dolleman R.J.** Opto-thermally excited multimode parametric resonance in graphene membranes. *Nature Scientific Reports.* 2018. № 8.
17. **Даниловская В.И.** Температурные напряжения в упругом полупространстве, возникающие вследствие внезапного нагревания границы. *ПММ.* 1950. Т. 14. № 3.
18. **Новацкий В.** Динамические задачи термоупругости. *М.: Мир.* 1970.
19. **Крылов В.В., Пономарев Е.П., Штенцель Т.В.** Особенности термооптического возбуждения звука в металлах. *Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 3.* 1986. Т. 27. № 6.
20. **Tang D.W., Araki N.** Wavy, wavelike, diffusive thermal responses of finite rigid slabs to high-speed heating of laser-pulses. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 1999. № 42.
21. **Philp W.R., Booth D.J., Perry N.D.** Single Pulse Laser Excitation of Structural Vibration Using Power Densities Below the Surface Ablation Threshold. *Journal of Sound and Vibration.* 1995. Vol. 185.
22. **Sun Y.** et. al. Laser-induced vibrations of micro-beams under different boundary conditions. *International Journal of Solids and Structures*. 2008. № 45.
23. **Kidawa-Kukla J.** Thermally induced vibration of a cantilever beam with periodically varying intensity of a heat source. *J. Appl. Math. Comp. Mech.* 2013. Vol. 12. № 4.
24. **Sun Y.** et. al. Thermoelastic response of a simply supported beam irradiated by a movable laser pulse. *Canadian Journal of Physics.* 2017.
25. **Yang X.** et. al. An Exact Analytical Solution for Thermoelastic Response of Clamped Beams Subjected to a Movable Laser Pulse. *Symmetry*. 2018. № 139.
26. **Sun Y.** et. al. Thermodynamic Response of Beams on Winkler Foundation Irradiated by Moving Laser Pulses. *Symmetry*. 2018. № 328.

A.V. Lukin (Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, department of Mechanics and Control Processes; Institute of Problems of Mechanical Engineering, Russian Academy of Sciences)
Nonlinear dynamics of opto-thermally excited microbeam resonators

Abstract. This paper presents a mathematical model of an opto-thermally excited microelectromechanical beam-like resonator. A solution is obtained for the nonstationary heat conduction equation in the beam volume under periodic localized laser irradiation, and the temperature force factors leading to bending oscillations are calculated. The nonlinear dynamics of the resonator is investigated taking into account the interaction of longitudinal and transverse motions.

УДК 531.768

К.А. СТРОГАНОВ, Е.М. БАКУЛИН, В.Д. ЛУКЬЯНОВ
(ОАО «Авангард», Санкт-Петербург)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА НА ОСНОВЕ АКУСТОЭЛЕКТРОННОЙ МЕТКИ МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА

Предложена конструкция чувствительного элемента электромеханического акселерометра с использованием акустоэлектронной метки диапазона 2,45 ГГц. Представлены результаты экспериментального исследования образца пассивного акселерометра в режиме беспроводного съема информации.

Введение. Интеграция технологий микроэлектромеханических систем (МЭМС) и акустоэлектроники (приборы на поверхностных акустических волнах – ПАВ) является перспективным направлением сенсорики, позволяющим расширить функциональные возможности датчиков физических величин [1]. Применение таких датчиков актуально для систем управления транспортом, мониторинга зданий и сооружений в труднодоступных местах, мониторинга и защиты специальных объектов, в охранных комплексах, где нет возможности использовать внешнее питание.

В работах [2–4] была рассмотрена конструкция чувствительного элемента (ЧЭ) микроакселерометра, представляющего собой ПАВ резонатор с рабочей частотой 434 МГц, выполненный на окисленной кремниевой подложке с тонкой пьезоэлектрической пленкой окиси цинка или ниобата лития. ПАВ-топология при этом расположена в зоне механической деформации. Съем сигнала в таком устройстве осуществляется по радиоканалу специальным считывающим устройством путем измерения резонансной частоты, которая, в свою очередь, зависит от приложенной физической величины. В работе [5] рассматриваются результаты разработки и оптимизации схемы построения микроакселерометра на ПАВ на основе кварца ST-среза. Показано, что эффективность съема информации и качество измеряемого сигнала напрямую зависят от равномерности распределения деформации в области гибкого подвеса. В работах [2–4, 6–7] проведены численные расчеты ЧЭ электромеханического акселерометра по технологии микромеханики и акустоэлектроники на ниобате лития методом конечных элементов. Результаты указанных расчетов позволили определить оптимальное соотношение толщины пьезоэлектрической пленки h к длине волны ПАВ λ для определенных значений коэффициента электромеханической связи (КЭМС) и скорости ПАВ. Полученное соотношение $h/\lambda=0{,}25$ находится в пределах разрешающей способности современного фотолитографического оборудования и может быть использовано при разработке ЧЭ электромеханического акселерометров на ПАВ на частоты 434 МГц и 2,45 ГГц. Экспериментально подтверждено [8], что достоверный уровень зафиксированного смещения центральной частоты составил 0,08-0,4 МГц при внешнем воздействии для макетов в диапазоне частот 425–428 МГц, что в свою очередь позволяет судить о принципиальной возможности построения высокоточных МЭМС-ПАВ датчиков ускорения.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию ЧЭ электромеханического акселерометра на основе ПАВ метки 2,45 ГГц для применения в системах управления и контроля за состоянием различных объектов, где требуется беспроводной съем информации без использования активных элементов питания.

Конструкция ЧЭ электромеханического акселерометра с ПАВ-меткой микроволнового диапазона. Т.к. по сравнению с ПАВ изделиями на 434 МГц изделия на 2,45 ГГц обладают преимуществом в меньших размерах, было изготовлено 3 рабочих образца с ПАВ-меткой на частоту 2,45 ГГц. Конструкция ЧЭ представляет из себя механическую консоль из бериллиевой бронзы треугольной формы, обеспечивающей равномерный изгиб, с установленной на нее ПАВ меткой. Консоль крепится на основание металлокерамического корпуса КТ-94-2 (ТУ КЮЯЛ.432264.075) с помощью клея-герметика ВГО-1 (рисунок 1.).

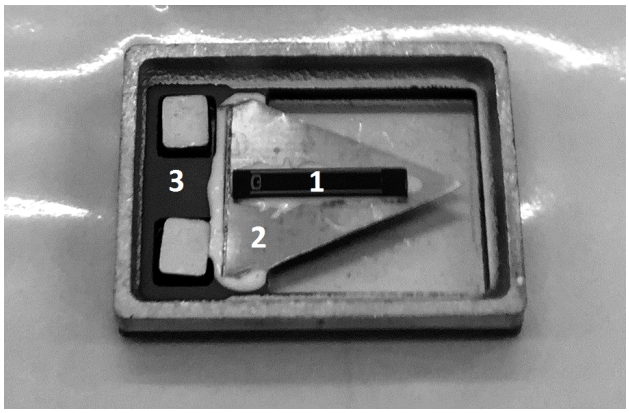


Рис. 1. Образец ЧЭ электромеханического акселерометра на основе ПАВ метки:
1 – ПАВ-метка, 2 – механическая консоль, 3 - корпус

Результаты экспериментального исследования электромеханического акселерометра с ПАВ-меткой микроволнового диапазона. Для измерения по радиоканалу ЧЭ, они были установлены на щелевую антенну 2,45 ГГц. Съем показаний производился при облучении зондирующим импульсом с помощью антенны считывателя системы радиочастотной идентификации производства ОАО «Авангард». При измерениях использовался считыватель и программное обеспечение (ПО) системы РЧИД-ПАВ-Термо, предназначенной для контроля температуры токоведущих шин в комплектных распределительных устройствах до 35 кВ.

Результаты измерений (таблица 1) показывают, что при механической деформации консоли с ПАВ меткой происходит видимое изменение частоты сигнала. Величина приложенной деформации (усилия) не контролировалась. Значения в таблице 1 представлены в градусах Цельсия, т.к. ПО системы РЧИД-ПАВ-Термо выдает значения измеряемой температуры датчика системы, а вместо датчика системы облучался ЧЭ электромеханического акселерометра, установленный на антенну.

Таблица 1

Результаты измерений ЧЭ (в градусах Цельсия)

№ образца	Механическая деформация консоли ЧЭ		
	Без деформации	Растяжение (давление на консоль вниз)	Сжатие (давление на консоль вверх)
1	32,2	23,6	47,3
2	30,0	19,4	31,3
3	31,1	22,5	35,5

Из таблицы 1 видно, что при смене направления вектора приложенного усилия на противоположное происходит смещение частоты в обратную сторону. Уровень отмеченного смещения в ПО в зависимости от приложенного усилия – от нескольких единиц до 15 градусов Цельсия, что позволяет судить о принципиальной возможности построения сенсора, изготовленного по совмещенной технологии микромеханики и акустоэлектроники.

Ключевой особенностью рассматриваемого акселерометра является отсутствие необходимости в постоянном питании, т.к. съем информации производится по радиоканалу с помощью зондирующего импульса. Поэтому такие акселерометры с ПАВ-меткой на основе интегрированной МЭМС-ПАВ технологии могут применяться, например, в датчиках для автомобильной промышленности, в авиации, в беспилотных летательных аппаратах, в навигации, в системах измерения деформации в труднодоступных местах, для мониторинга и защиты специальных объектов, в охранных комплексах. Также такие датчики могут применяться для интерактивного контроля за состоянием человека (кардиология, диагностика проблем опорно-двигательного аппарата). На текущий момент по результатам выполнения работы и откликам/заявкам от потенциальных заказчиков наиболее востребованным является датчик, который должен работать в экстремальных условиях (повышенная температура и воздействие спец. факторов, таких как радиация и ионизирующее излучение).

Заключение. В работе приведено описание конструкции электромеханического акселерометра на основе ПАВ метки с частотой 2,45 ГГц. Проведены экспериментальные исследования ЧЭ электромеханического акселерометра с использованием акустоэлектронной метки диапазона 2,45 ГГц и подтверждена его работоспособность.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алферов, Ж.И.** Перспективы электроники в России. Гетероструктурная электроника и акустоэлектроника // Электроника НТБ, Выпуск 6, 2004, с. 90-93.
2. **Строганов, К.А.** Сенсор на основе МЭМС+ПАВ технологии // Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Сенсорика 2013», с. 34 – 35.
3. **Бакулин Е.М., Строганов К.А.** Моделирование сенсора на основе интегрированной технологии микромеханики и акустоэлектроники на структуре ниобат лития-кремний // Academy 5 (20), 2017, с. 34-41.
4. **Строганов К.А., Калинин В.А., Пащенко В.П.** Преобразователь линейного ускорения консольного типа для эксплуатации в специальных условиях // Вопросы радиоэлектроники, 2012. Т. 1. № 1. С. 131-141.
5. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы: учебное пособие. // М.: Машиностроение, 2007, с. 400.
6. **Морган Д.** Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах: Пер. с англ.— М.: Радио и связь, 1990. – 416 с.
7. **Строганов К.А., Пащенко В.П., Калинин В.А., Бакулин Е.М., Нурмухамедов В.А.** «Моделирование акселерометра по технологии микромеханики и акустоэлектроники на структуре ниобат лития - кремний» // Материалы XVIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», 2016 г.
8. **Строганов К.А., Пащенко В.П., Бакулин Е.М., Калинин В.А.** «Результаты разработки макетов МЭМС-ПАВ сенсоров с использованием пленки ZnO для ответственных применений» // Сборник докладов XX международной молодежной научной конференции «Волновая электроника и ее применения в информационных и телекоммуникационных системах» (WE-2017), 2017 г.

K.A. Stroganov, E.M. Bakulin, V.D. Lukyanov (JSC Avangrard, Saint-Petersburg, Russia). **Experimental study of the sensitive element of an electromechanical accelerometer based on a surface acoustic wave tag of a microwave range**

Abstract. A design of a sensitive element of an electromechanical accelerometer using a surface acoustic wave tag of 2.45 GHz is proposed. The results of an experimental study of a passive accelerometer sample in the mode of wireless information retrieval are presented.

УДК 656.2

А.В. БОЛЬШАКОВА
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В.И. Ульянова (Ленина))

АНАЛИЗ ПОКАЗАНИЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ВАГОНЕ

Работа посвящена исследованию показаний микромеханических акселерометров, входящих в состав системы диагностики рельсового пути. Предложена гипотеза о влиянии ударного воздействия на одно колесо на показания датчиков, установленных на остальных колесах. Приводится экспериментальное подтверждение наличия влияния дефекта поверхности катания рельса на показания всех датчиков в рассматриваемой системе.

Введение. Одним из путей повышения безопасности железнодорожных перевозок является своевременное определение дефектов поверхности катания рельсов и их устранение [1]. В данном направлении коллективом кафедры лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС) Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» была проведена большая исследовательская работа [2], [3]. В настоящее время на практике применяется совместная разработка коллектива кафедры ЛИНС и ООО «ИНЕРТЕХ»: малогабаритная инерциальная навигационная система диагностики рельсового пути (МИСД РП) InerTrack [4]. Полное описание состава системы содержится в работах Подгорной Л.Н. [2] и Шалымова Р. В. [3].

С целью улучшения эксплуатационных характеристик описанной системы ведутся исследования, направленные на повышение точности и стабильности её работы. Предлагаемая статья посвящена исследованию влияния дефекта поверхности катания рельса на показания всех датчиков в рассматриваемой системе.

Состав системы. В работе рассматриваются показания датчиков из состава МИСД РП. На буксы колесных пар тележки вагона установлены четыре инерциальных измерительных модуля (ИИМ), которые позволяют диагностировать дефекты поверхностей рельсовых нитей (рисунок 1). По каждому рельсу проходят два ИИМ, расстояние между которыми определяется конструкцией ходовой тележки, на которой они установлены, и равно 2,4 м. ИИМ включает в себя:

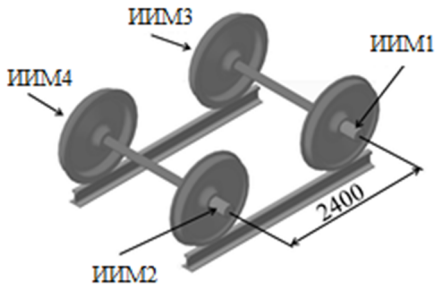


Рис. 1. Модель тележки вагона
с установленными на буксах ДММ

- один трехосный акселерометр ADXL 325 с диапазоном измеряемых ускорений ±5g;
- два двухосных акселерометра ADXL 278 с диапазоном измеряемых ускорений ±35g;
- три одноосных гироскопа ADXRS 614 с диапазоном измеряемых угловых скоростей ±75°/с;
- температурный датчик [3].

Пройденное вагоном расстояние определяется по показаниям установленного на одном из колес одометра.

Определение дефекта. При прохождении дефекта, возникают линейные ускорения колеса вагона вдоль вертикальной оси, регистрируемые микромеханическими акселерометрами. Сигнал акселерометра, установленного, на буксе первого, по ходу движения колеса, сдвигается на величину, равную базе тележки вагона, то есть сигналы с двух акселерометров приводятся к одной путевой координате. Повторяемость сигналов акселерометров, установленных на следом идущих колесах, имеющих характерный для неровности вид, является критерием для определения неровности. Если значение взаимной корреляционной функции сигналов превышает за-

Научный руководитель к.т.н., доцент Шалымов Р.В.

данную пороговую величину, определяется ширина интервала превышения пороговой величины, которая соответствует длине неровности. Также на показания датчика оказывает влияние состояние колеса, таким образом можно определить дефекты поверхности катания колеса. Условием наличия дефекта на колесе является повторяемость сигналов ДММ, установленного на колесе с дефектом через одинаковые интервалы, равные длине окружности колеса[5].

Анализ сигналов. Железнодорожный вагон и рельс являются колебательной системой [6, 7] и, соответственно, энергия от одной части этой системы в какой-то степени переходит другим частям системы (например, через ось колесной пары или через рельс). Перекачка энергии может вносить погрешность, как в определение размеров неровности, так и в определение факта наличия неровности. Корреляция сигналов будет меньше, если в сигналах присутствует составляющая, не связанная с проходимой неровностью, следовательно, небольшие дефекты могут быть пропущены. Ограничимся рассмотрением тележки вагона, которая также является колебательной системой. Можно предположить, что энергия приобретаемая, одним из колес тележки вследствие прохождения им дефекта на рельсе передается как на другое колесо этой колесной пары, так и, возможно, на два других колеса тележки. При прохождении колесом дефекта, оно приобретает линейное ускорение, действующее вдоль вертикальной оси, регистрируемое установленным на буксе акселерометром. Предполагается, что одномоментное влияние распределенной энергии на три других колеса, можно увидеть по показаниям соответствующих акселерометров. Для подтверждения гипотезы рассмотрим участки пути, где дефект присутствует только на одном рельсе (рисунок 2) можно увидеть, что колесо, на котором установлен ИИМ2, испытывает вертикальные линейные ускорения, вследствие прохождения неровности. В этот момент времени датчиками, установленными на трех других колесах рассматриваемой тележки, также регистрируются меньшие по амплитуде возмущения. Далее при прохождении расстояния, равного базе тележки, картина повторяется, только теперь следом идущее колесо (ИИМ1) испытывает линейные ускорения, вследствие прохождения дефекта, а на трех других колесах, также регистрируются меньшие по амплитуде возмущения. Для определения составляющих колебаний, передающихся по механической связи другим колесам, разложим сигналы каждого из ИИМ в спектр (рисунки 3 и 4).

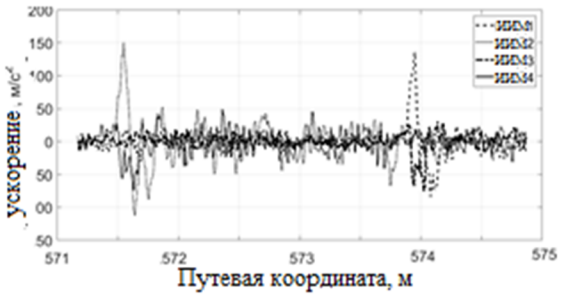


Рис. 2. Графики показаний акселерометров, установленных на буксах, на отрезке пути с дефектом на одном рельсе

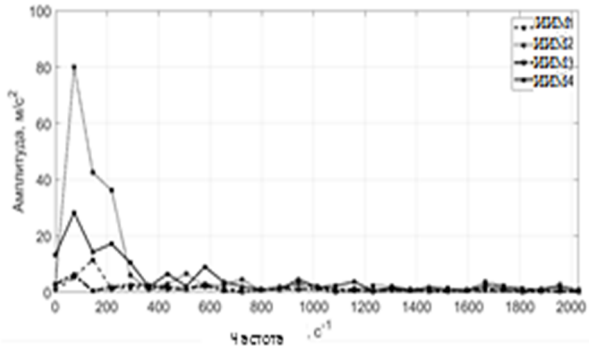


Рис. 3. Амплитудный спектр сигналов с акселерометров при прохождении неровности колесомИИМ2

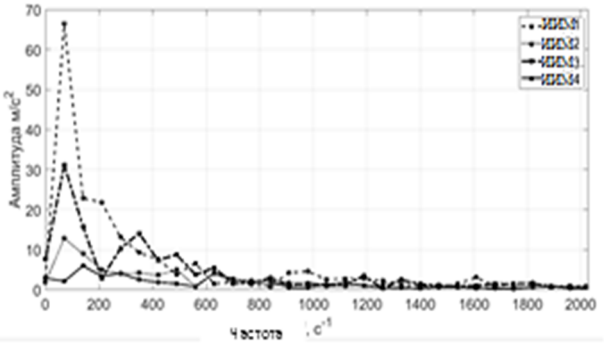


Рис. 4. Амплитудный спектр сигналов с акселерометров при прохождении неровности колесом ИИМ1

Проанализировав спектры можно сделать вывод о наличии низкочастотных составляющих сигналов четырех датчиков, установленных на буксах, в момент прохождения дефекта одним из колес. При этом амплитуда сигналов, прошедших через систему вагон-рельс значительно уменьшается. Наибольшее уменьшение амплитуды наблюдается при прохождении энергии к диагональному колесу (от 1 к 4, от 2 к 3).

Заключение. В работе рассмотрены показания микромеханических акселерометров, установленных на буксах колесных пар железнодорожной тележки, используемых для определения дефектов поверхности катания рельсов. Предложена и экспериментально подтверждена гипотеза о влиянии дефекта рельса на показания всех акселерометров, установленных на колесной тележке. Таким образом, при прохождении дефекта одним колесом, полученная им энергия передается другим частям ходовой тележки. Показанный эффект требует дальнейших исследований, позволяющих полноценно оценить влияние ударного воздействия на одном колесе, на показания датчиков на остальных колесах.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-4165.2018.8.

ЛИТЕРАТУРА

1. ЖДМ, 2005, № 10: Путеизмерительные системы на железных дорогах Северной Америки – Железные дороги мира [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.zdmira.com/arhiv/2005/zdm-2005-no-10, свободный.
2. **Подгорная Л.Н.** Разработка и исследование интегрированной инерциальной системы диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах, 05.11.16 – информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение), Автореферат.
3. **Шалымов Р.В.** Разработка и исследование инерциальной системы мониторинга рельсового пути, 05.11.03 – приборы навигации, (Автореферат).
4. Малогабаритная инерциальная система диагностики рельсового пути InerTrack – Общество с ограниченной ответственностью «ИНЕРТЕХ» [Электронный ресурс]. http://inertech.org/production/7-malogabaritnaya-bortovaya-avtonomnaya-sistema-diagnostiki-relsovogo-puti-mbasd-rp-na-baze-iim.html, Режим доступа: свободный.
5. **Сунгуров Д.В., Шалымов Р.В.** Инерциальный метод диагностики рельсового пути с учетом состояния поверхностей катания колес вагона Сб. докл. XVI НТК молодых ученых «Навигация и управление движением»// С.-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 49–55.
6. **Коган А. Я.** Некоторые особенности воздействия на путь подвижной нагрузки. / Вестник ВНИИЖТ. 2005. №3.
7. **Тимошенко С. П.** Сопротивление материалов. М. 1965. Т. 2. 479 с.

A.V. Bolshakova (St.-Petersburg State Electrotechnical University “LETI”). **Analisis micromechanical accelerometers readings established on a railway cariage**

Abstract. The work is devoted to improving the accuracy of determining the surface defects of rolling rails. The assumption is made about the impact effect on one wheel on the readings of sensors installed on the other wheels.

▪ ЭЛЕКТРОНИКА, МИКРОЭЛЕКТРОНИКА И СИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ ▪

УДК 621.3.049.779

И.С. СМИРНОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

Я.В. БЕЛЯЕВ, Н.Н. НЕВИРКОВЕЦ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ"
им. В.И. Ульянова (Ленина))

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОЙ СХЕМЫ АКСЕЛЕРОМЕТРА

В работе предложен алгоритм проектирования операционного усилителя по схеме вложенного каскода с выходным каскадом класса А-В, позволяющий разработать усилитель под заданные параметры. Операционный усилитель, спроектированный с помощью предложенного алгоритма, успешно применен в проекте интегральной схемы микромеханического акселерометра.

Введение. Микромеханические датчики получили широкое распространение в многих устройствах, например, в биомедицинской технике для измерения артериального давления, уровня жидкости, ускорения, смещения. Наиболее распространены емкостные микромеханические датчики, принцип работы которых заключается в преобразовании измеряемой величины в изменение емкости конденсаторов [1]. Функцию преобразования изменения емкости в электрический сигнал, обычно напряжение, в микромеханических датчиках выполняет специализированная интегральная схема. Существует множество структур интегральных схем преобразователей, основанных на различных принципах работы. Одним из основных элементов всех структур является операционный усилитель, который может обладать различными свойствами. К примеру, существуют подходы к внедрению усилителей с переменным усилением и постоянной полосой пропускания, основанные на токовых конвейерах [2], на обратной отрицательной токовой связи [3, 4], на усилителях с обратной резистивной связью и постоянной нагрузкой [5] и на усилителях Черри–Хупера [6]. Работа посвящена разработке алгоритма проектирования операционного усилителя по схеме вложенного каскода с выходным каскадом класса А-В.

Алгоритм проектирования операционного усилителя. Одним из основных компонентов аналоговой части интегральной схемы акселерометра является операционный усилитель (ОУ), который может применяться как отдельный функциональный элемент или быть составной частью более сложной интегральной схемы. Зачастую ОУ используют в схемах с обратной отрицательной связью, которая благодаря высокому коэффициенту усиления, определяет коэффициент передачи всей схемы. ОУ с характеристиками, близкими к идеальным, может быть основой для построения множества различных функциональных электрических узлов.

Типовая интегральная схема микромеханического акселерометра содержит такие аналоговые блоки, как преобразователь «емкость–напряжение», повторитель, интегратор, фильтр низких частот и другие. Эти блоки можно спроектировать на основе универсального ОУ. В работе рассмотрена разработка фильтра низких частот на основе двухкаскадного вложенного каскода с выходным каскадом класса А-В, представленная на рис. 1.

Предлагаемая схема ОУ имеет свои преимущества и недостатки. Среди достоинств следует выделить наличие высокого коэффициента усиления, малого выходного сопротивления и большого диапазона выходного напряжения. Основным недостатком предложенного ОУ является наличие дополнительных цепей, формирующих постоянные напряжения смещения, которые удерживают ОУ в рабочей точке при изменении температуры или напряжения питания.

Разработанный алгоритм представляет собой пошаговую инструкцию проектирования отдельных элементов, начиная с дифференциальной пары и заканчивая цепями напряжений смещения. Некоторые этапы проектирования основаны на использовании идеализированных моделей и формул, полученных в результате выполнения малосигнального анализа.

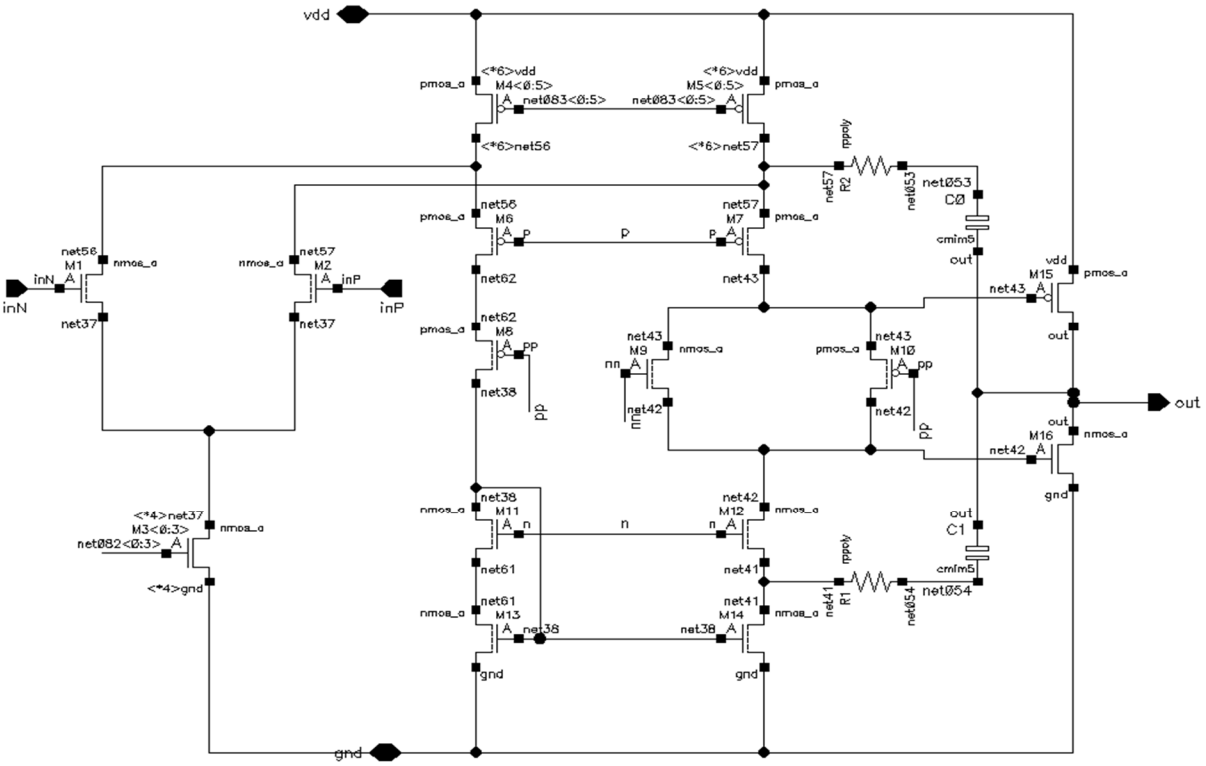


Рис. 1. Электрическая схема двухкаскадного вложенного каскода с выходным каскадом класса A-B

Заключение. С помощью предложенного детерминированного алгоритма разработан операционный усилитель, на основе которого был построен блок фильтра нижних частот, успешно примененный в проекте интегральной схемы микромеханического акселерометра. С использованием методики проектирования решены частные задачи, такие как построение операционного усилителя по заданным параметрам усиления в 100 дБ, частоты единичного усиления равной 1 МГц, емкостной нагрузкой 20 пФ и скорости нарастания в 450 кВ/с. Разработанный ОУ обладает коэффициентом усиления 98 дБ, частотой единичного усиления 800 кГц и скоростью нарастания 430 кВ/с, а также достаточным запасом устойчивости. Предложенный алгоритм проектирования операционного усилителя по схеме вложенного каскода с выходным каскадом класса A-B позволил значительно облегчить задачу проектирования операционного усилителя и сократить время разработки интегральной схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Arshad A., Kadir. K.A., Khan S., Alam AHM Z., & Tasnim R.,** A Pressure Sensor Based Inductive Transducer Designed for Biomedical Applications, IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications, 2015.
2. **C. Bai, J. Wu, X. Deng, и C. Chen,** “A 35-dBm OIP3 CMOS Constant Bandwidth PGA with Extended Input Range and Improved Common- mode Rejection.” IEEE Trans. Circuits and Systems-II (TCAS-II): Express Briefs, vol. 64, no. 8, pp. 922 - 926, Aug. 2017.
3. **F. Esparza-Alfaro, S. Pennisi, G. Palumbo**, и A. J. Lopez-Martin, “Low-Power Class-AB CMOS Voltage Feedback Current Operational Amplifier with Tunable Gain and Bandwidth.” IEEE Transactions on Circuits and Systems II, vol. 61, no. 8, pp. 574-578, Aug. 2014.
4. **S. D’Amico, M. De Blasi, M. De Matteis, и A. Baschirotto,** “A 255 MHz Programmable Gain Amplifier and Low-Pass Filter for Ultra Low Power Impulse-Radio UWB Receivers.” IEEE Transaction of Circuits and Systems-I, vol. 59, no. 2, pp. 337-345, Feb. 2012.

5. **T. Sánchez-Rodríquez, J.A. Galán, M. Pedro, A.J. López-Martín, R.G. Carvajal, и J. Ramírez-Angulo,** ”Low-power CMOS variable gain amplifier based on a novel tunable transconductor.” IET Circuits, Devices & Systems, vol. 9, no.2, pp.105-110, 2015.
6. **C. Garcia-Alberdi, J. Aguado-Ruiz, A. J. Lopez-Martin, and J. Ramirez-Angulo**, “Micropower Class-AB VGA with Gain-Independent Bandwidth.” IEEE TCAS-II, vol. 60, no. 7, pp. 397-401, July. 2013.

I.S. Smirnov (State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC), **J.V. Belaev, N.N. Nevirkovets** (State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg). **Determinate design algorithm of operational amplifier for the accelerometer integrated circuit**

Abstract. The paper presents algorithm for designing an operation amplifier according to the folded cascade scheme with class A-B output, allowing to design an amplifier with specified parameters. An operational amplifier designed by this algorithm has been successfully applied in the integrated circuit of a micromechanical accelerometer.

УДК 621.3.049.77

А.А. МИХТЕЕВА
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор, Санкт-Петербург)

АЛГОРИТМЫ ЦИФРОВОЙ КОРРЕКЦИИ И САМОТЕСТИРОВАНИЯ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ

Рассмотрены существующие алгоритмы цифровой коррекции и самотестирования аналого-цифрового преобразователя (АЦП) последовательного приближения, их основные преимущества и недостатки.

Введение. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) последовательного приближения содержит компаратор, цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП), устройство выборки и хранения, а также цифровую часть управления. Последний блок реализует алгоритм двоичного поиска, управляя ЦАП путем изменения подаваемого кода. В широко используемом двоично-взвешенном емкостном ЦАП каждому i-му биту цифрового кода сопоставляется «ветвь» с конденсаторами, содержащая 2^i единичных конденсаторов и формирующая соответствующее значение напряжения. В итоге ЦАП преобразует код в аналоговую величину, сопоставляемую компаратором с входным напряжением. Результаты сопоставления учитываются цифровой частью АЦП при генерации следующего кода.

Для улучшения характеристик аналого-цифровых преобразователей в цифровой части АЦП вводятся дополнительные режимы коррекции данных и режимы самотестирования, модифицируется алгоритм управления ЦАП. Данные изменения ведут к уменьшению ошибок, связанных с технологическим разбросом, временем установления сигнала и смещением компаратора.

Работа посвящена анализу существующих алгоритмов цифровой коррекции и самотестирования АЦП последовательного приближения, выявлению их преимуществ и недостатков.

Коррекция с использованием избыточных алгоритмов управления ЦАП. В отличие от общепринятого алгоритма двоичного поиска предлагаемые в работах [1–9] решения состоят либо в добавлении дополнительных тактов преобразования, либо в модификации последовательности переключения «ветвей» ЦАП. Наиболее эффективным среди них является предлагаемый в работах [8, 9] избыточный алгоритм “Inverted Merged Capacitor Switching Algorithm”, заключающийся в изменении последовательности переключений «ветвей» ЦАП между источниками опорного напряжения. В отличие от стандартного алгоритма после выборки сигнала предлагаемый алгоритм начинается с переключения всех «ветвей» на напряжение V_{CM}, равное половине входного диапазона, вместо переключения одной ветви, соответствующей старшему разряду к опорному напряжению Vrefp, равному верхней границе входного диапазона. Преимуществом данного алгоритма является уменьшение потребляемой мощности и сокращение ошибок установки сигнала в ЦАП, поскольку вместо граничных значений диапазона ЦАП конденсаторы переключаются между напряжением V_{CM} и Vrefp или Vrefn. Недостатком является необходимость введения в структуру ЦАП дополнительных аналоговых ключей, осуществляющих переключения между источниками опорного напряжения. Кроме того, избыточность в алгоритме управления ЦАП не всегда может гарантировать уменьшение нелинейности АЦП. Для секционных, сегментированных ЦАП в составе АЦП наличие паразитных параметров, емкость которых различна при различных входных цифровых кодах, сильно снижает эффективность алгоритма. Для устранения этого недостатка возможно использование алгоритмов самокоррекции [10–11], позволяющих уменьшить любые нелинейности в АЦП за счет использования большого объема энергонезависимой памяти и дополнительного режима работы АЦП.

Самокоррекция и самотестирование. При самокоррекции, предполагающей дополнительный режим работы и заранее определенный аналоговый сигнал на входе АЦП, определяются значения, сохраняемые в энергонезависимой памяти, которые при обычном режиме работы

Научный руководитель д.т.н., проф. Колесов Н.В.

АЦП будут использоваться для коррекции данных. При использовании внешней памяти быстродействие АЦП может быть снижено на несколько порядков. Для реализации данного алгоритма с внутренней памятью потребуется значительная площадь на кристалле. Преимуществом данного вида коррекции является возможность снизить нелинейность преобразования АЦП.

Кроме этого, иногда вводится дополнительный режим самотестирования АЦП для автоматизации определения характеристик АЦП. На вход АЦП подается постоянный уровень напряжения или заранее определенный сигнал, например, синусоида. На каждом шаге проводится N измерений, после чего выполняется их усреднение. Преимуществом наличия данного режима является сокращение временных затрат на тестирование, однако потребует значительной площади для дополнительного цифрового блока, управляющего АЦП и источником напряжений, подаваемых на вход АЦП.

Самокоррекция с введением дополнительных тактов преобразования и корректировки выходного значения на основании избыточных значений кода не требует дополнительного режима работы и большого объема энергонезависимой памяти. Однако ограничена характеристиками компаратора, для коррекции смещения и увеличения точности которого требуется включение дополнительных аналоговых схем [12–13].

Заключение. Проведен анализ существующих алгоритмов цифровой коррекции и самотестирования аналого-цифрового преобразователя последовательного приближения. Рассмотрены основные преимущества и недостатки алгоритмов коррекции и самотестирования. Наиболее эффективным является избыточный алгоритм управления ЦАП, который был реализован в разработанном 18-разрядном АЦП для микромеханического акселерометра, изготовленным по технологии 350 нм на австрийской фабрике AMS. Для реализации самотестирования АЦП введен дополнительный цифровой блок – ядро процессора RISC-V и дополнительный цифро-аналоговый преобразователь.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zhang Y.,** Yiqiang Zhao, Peng Dai. «Study of Split Capacitor DAC Mismatch and Calibration in SAR ADC», Journal of Circuits System and Computers, 26, 2015, pp. 1-19.
2. **McNeill J.A.,** «All-Digital Background Calibration of Successive Approximation ADC using Split ADC Architecturec, IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, vol. 58, no. 10, 2011, pp. 2355- 2365.
3. **Rikan B.S.,** «Digital Error Correction for a 10-bit Straightforward SAR ADC», IEEE Transactions on Smart Processing and Computing, 4, 2015, pp. 51-58.
4. **Ogawa T.,** «SAR ADC Algorithm with Redundancy», 2008 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Macao, 2008, pp. 268-271.
5. **Chang A. H.,** Lee H. S., Boning D., «A 12b 50MS/s 2.1mW SAR ADC with redundancy and digital background calibration», 2013 Proceedings of the ESSCIRC (ESSCIRC), Bucharest, 2013, pp. 109-112.
6. **Zhao Y и др.,** «Digital Self-Calibration Technique Based on 14-Bit SAR ADC», Transactions of Tianjin University, 19, 2013, pp. 454-458.
7. **Arian A. и др**. «A 10-bit 50-MS/s redundant SAR ADC with split capacitive-array DAC», Analog Integr Circ Sig Process, 71, 2012, pp. 583–589.
8. **Chang A. H. и др.**. "A 12b 50MS/s 2.1mW SAR ADC with Redundancy and Digital Background Calibration." 2013 Proceedings of the ESSCIRC (ESSCIRC), 2013, pp. 109-112.
9. **Chang A.H.**, «Low-power high-performance SAR ADC with redundancy and digital background calibration: Thesis Ph. D.-Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, 2013.
10. **Ling D.** «A Digital Background Calibration Technique for Successive Approximation Register Analog-to-Digital Converter», Journal of Computer and Communications, 2013,1, стр. 30-36.
11. **Jin L. и др.** «A Digital Self-Calibration Algorithm for ADCs Based on Histogram Test Using Low-Linearity Input Signals», 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Kobe, 2005, pp. 1378-1381.
12. **Choi Y. и др,** "A 100MS/s 10-bit Split-SAR ADC with Capacitor Mismatch Compensation Using Built-In Calibration," 2016 IEEE 25th North Atlantic Test Workshop (NATW), Providence, RI, 2016, pp. 1-5.
13. **Chen Y. и др**., "Split capacitor DAC mismatch calibration in successive approximation ADC," 2009 IEEE Custom Integrated Circuits Conference, San Jose, CA, 2009, pp. 279-282.

A.A. Mikhteeva (Concern CSRI Elektropribor, ITMO University, Saint Petersburg, Russia). **Algorithm of Successive Approximation Analog-to-Digital Converter Correction and Self-Test**

Abstract. Existing methods of SAR ADC digital correction and self-test are analyzed. Main advantages and disadvantages of them are considered. SAR ADC 18 bit with inverted merged capacitor switching algorithm with self-test mode based on RISC-V was presented.

УДК 621.3.049.77.001.2

Л.Е. АНДРЕЕВ, С.Э. МИРОНОВ
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В. И. Ульянова (Ленина))

ИЕРАРХИЧЕСКОЕ СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАКРОБЛОКОВ СВЕРХБОЛЬШИХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИ ИНВАРИАНТНОЙ КОНЦЕПЦИИ

Разработаны методы и средства автоматизации полного цикла проектирования топологии крупных иерархических фрагментов сверхбольших интегральных схем.

Введение. Постоянное совершенствование технологии изготовления интегральных схем требует развития средств технологически инвариантного проектирования, позволяющих оперативно настраивать топологии на требуемые проектные нормы предприятий-изготовителей. Следует отметить, что накапливаемая с помощью таких систем автоматизированного проектирования (САПР) сверхбольших интегральных схем (СБИС) технологически инвариантная топологическая информация позволяет постоянно усложнять проекты и сокращать сроки их разработки. В свою очередь усложнение микроэлектронной компонентной базы и ужесточение требований по срокам ее проектирования привели к созданию методики разработки СБИС на основе библиотек крупных модулей, называемых макроблоками СБИС.

Технология проектирования нерегулярных макроблоков базируется на алгоритмах размещения и трассировки ячеек библиотеки стандартных фрагментов. Разработка же регулярных макроблоков требует тщательной индивидуальной проработки как структурно-топологических планов макроблоков, так и топологии их ячеек, что позволяет добиться снижения аппаратных затрат.

Существуют разные подходы к организации систем иерархического проектирования топологии макроблоков СБИС в технологически инвариантной концепции [1].

Предлагаемый доклад посвящен рассмотрению оригинальных результатов проведенных авторами исследований по автоматизации плотноупакованного иерархического структурно-топологического проектирования макроблоков СБИС в технологически инвариантной концепции.

Проектирование топологии макроблоков. Полный цикл проектирования топологии макроблоков включает в себя следующие этапы:

- разработка индивидуального топологического плана макроблока;
- разработка топологических моделей, различных для разных ячеек макроблока;
- разработка специализированной библиотеки, ячейки которой не обладают стандартизированными габаритами и положением выводов;
- разработка индивидуальных программ сборки топологии из ячеек.

Процесс проектирования топологии макроблоков СБИС, описанный в [2–4], базируется на оригинальных методах и средствах программной генерации топологии. Технологическая инвариантность ячеек макроблоков обеспечивается с помощью системы сжатия ячеек «*TopDesign*» [5, 6]. При настройке на требуемые проектные нормы она минимизирует расстояние между элементами в соответствии как с технологическими требованиями, так и с ограничениями, налагаемыми разработчиками на взаимное расположение различных частей топологии. Высокая плотность упаковки топологии достигается оригинальным методом [7–9] индивидуального итерационного согласования размеров и положения выводов ячеек, на основе которого разработана система иерархического проектирования топологии макроблоков «*Matching of Cells*» [2–4].

Технологически инвариантное структурно-топологическое проектирование иерархических макроблоков СБИС. Целью исследований авторов по структурно-топологическому проектированию макроблоков является разработка методов и средств автоматизации полного цикла проектирования топологии крупных иерархических фрагментов СБИС. Однако вышеназванные средства программной генерации топологии макроблоков решают лишь часть задач разработки топологии. Система «*TopDesign*» используется при разработке библиотеки ячеек

для «рисования» проектировщиком технологически инвариантных эскизов топологии и настройке их на требуемые проектные нормы. Система «*Matching of Cells*» формирует дополнительные ограничения для процесса сжатия, позволяющие создать библиотеку ячеек, согласованных по габаритам и координатам выводов, и осуществляет сборку топологии из ячеек.

Для автоматизации недостающих этапов проектирования топологии макроблоков СБИС были разработаны алгоритмы и объединенные в систему «*Macroblock Structure Design*» программные средства, моделирующие действия разработчика по проектированию макроблоков.

Разработка структурно-топологического плана макроблока осуществляется в графическом редакторе в режиме «рисования таблиц». Структурно-топологический план макроблока формируется или путем задания таблицы с требуемым числом строк и столбцов, или путем «рисования» такой же таблицы с помощью линий «граница ячейки». Ячейкам задаются имена и коэффициенты матрицирования.

На структурно-топологическом плане с помощью линий (с параметрами «топологический слой», «ширина», «имя») проводятся магистральные шины и шины межсоединений (на границах смежных ячеек). Так прямо на топологическом плане формируются топологические модели, различных ячеек макроблока. С помощью разработанной библиотеки функций план макроблока разбивается на ячейки и по результатам разбиения формируются следующие текстовые файлы:

- спецификации ячеек, содержащие описания границ ячеек и их выводов;
- иерархическая спецификация макроблока;
- структурированное описание компонуемой топологии.

Файлы спецификации ячеек используются:

- для проектирования технологически инвариантных топологических эскизов ячеек или путем разработки вручную топологом, или путем программной генерации эскизов [10] по задаваемым в форматах EDF или Spice-netlist электрическим схемам ячеек;
- для согласования ячеек системой «*Matching of Cells*».

Файлы иерархической спецификации макроблоков используются системой «*Matching of Cells*» для согласования ячеек и сборки из них топологии макроблоков.

Заключение. Основными полученными результатами являются формализация действий тополога по проектированию макроблоков, разработка системы структурно-топологического проектирования макроблоков СБИС «*Macroblock Structure Design*» и разработка методики иерархического проектирования топологии макроблоков в системе «*Macroblock Structure Design*».

Методика иерархического проектирования топологии с помощью системы «*Macroblock Structure Design*» тестируются в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 8.2080.2017/4.6 при проведении работ по проектированию микроэлектронных схем.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Bamji C., Varadarajan, R.** Leaf Cell and Hierarchical Compaction Techniques, New York – Springer Science & Business Media, LLC, Dec 6, 2012 - Technology & Engineering – 161 p., DOI 10.1007/978-1-4615-6139-2
2. **Миронов С.Э., А.Ю. Васильев, А.Х. Мурсаев.** Модели и средства проектирования сложных топологических объектов микроэлектронных систем в условиях неопределенности проектных норм // XXI-я международная конференция по мягким вычислениям и измерениям (SCM-2018): в 3 т. Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 г. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. Т. 1. С. 522–525. ISBN: 978-5-7629-2239-5.
3. **Миронов С.Э., А.Ю. Васильев, Н.М. Сафьянников.** Средства автоматизации иерархического проектирования сложных микроэлектронных схем при неопределенности проектных норм [Текст] // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем» / под общ. ред. академика РАН А. Л. Стемпковского. Зеленоград, 01–05 октября 2018 г. М.: ИППМ РАН, 2018. Выпуск III. С. 60–66. ISBN: 978-5-94627-160- 8.
4. Means of Automating the Hierarchical Design of Complex Microelectronic Circuits with Uncertainty of Design Rules /S. E. Mironov, A. Yu Vasiliyev, N. M. Safyannikov. P. 67. DOI 10.31114/2078-7707-2018-3-60-67
5. **Зуев И.С., Миронов С.Э., Сафьянников Н.М.** Проектирование специализированных кремниевых компиляторов в САПР параметризованных фрагментов КМОП БИС TopDesign. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. 226 с., [20] с. цв. ил. ISBN 978-5-7629-2289-0.
6. **Зуев И. С.** Виртуальное символьное проектирование параметризованных фрагментов КМОП БИС / И. С. Зуев, С. Э. Миронов, Н. М. Сафьянников, А. Б. Максимов. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 236 с., [20] с. вкл. ISBN 978-5-7629-2196-1.
7. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2018619554. Программа специализированного кремниевого компилятора TopDesign параметризованных фрагментов КМОП БИС (СКК TopDesign) / И. С. Зуев;

правообладатель: Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (RU) – № 2018616919, заявл. 04.07.2018; зарег. 08.08.2018, опубл. 08.08.2018.

8. **Васильев А.Ю., Миронов С. Э.** Иерархическое проектирование топологии макроблоков КМОП больших интегральных схем в САПР Topdesign // Навигация и управление движением. Материалы XVIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием. Санкт-Петербург, 15–18 марта 2016 г. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. 691 с. ISBN 978-5-91995-047-9. с. 191-197.
9. **Миронов С. Э., Васильев А.Ю.** Управление процессом согласования сложных топологических объектов микроэлектронных систем в условиях неопределенности проектных норм // II-я международная научная конференция по проблемам управления в технических системах (CTS'2017): Материалы конференции. Санкт-Петербург, 25–27 октября 2017 г. СПб: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2017. С. 198–201.
10. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2018611806. Программа индивидуального согласования положения стыкуемых выводов и границ топологии ячеек макроблоков СБИС / А.Ю. Васильев, С.Э. Миронов, Н.М. Сафьянников; правообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Сенсотроника» (RU) – № 2017660700, заявл. 24.10.2017; зарег. 07.02.2018, опубл. 07.02.2018.
11. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2017617050. Программа автоматизированного проектирования топологии ячеек СБИС / О. А. Жирнова, А. К. Фролкин; правообладатель: Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (RU) – № 2017612514, заявл. 28.03.2017; зарег. 23.06.2017, опубл. 23.06.2017.

L.E. Andreev, S.E. Mironov (Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg). **Hierarchical structural and topological design of VLSI macroblocks in a process tolerant concept**

Abstract. The paper presents methods and approaches for automation of the complete cycle of hierarchical macrobloks layout design of super large scale integration circuits.

УДК 621.396.6

А.А. НАЗВАНОВ, М.С. ЕНУЧЕНКО
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

10-РАЗРЯДНЫЙ ФИБОНАЧЧИЕВЫЙ ЦАП

Работа посвящена разработке цифро-аналогового преобразователя (ЦАП) с архитектурой Фибоначчи. Получена аппроксимация разрядности кода Фибоначчи от разрядности входного кода ЦАП. Предложен алгоритм проектирования дешифратора в код Фибоначчи. Предложен алгоритм динамического согласования элементов, использующий неоднозначность представления в коде Фибоначчи и обеспечивающий увеличение динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих, на 10 дБ.

Введение. Параллельные цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП) имеют две базовых архитектуры. Первая – это бинарная архитектура, в которой используются элементы, имеющие значения (или «веса»), пропорциональные 2^n. Вторая – это унарная архитектура, в которой используются элементы, имеющие одинаковый вес. Основные особенности обеих архитектур описаны в [1–2]. Для бинарной и унарной архитектур соотношение двух смежных взвешивающих элементов составляет 2 и 1 соответственно. Для чисел Фибоначчи такое соотношение составляет приблизительно 1,6, поэтому ЦАП, у которого веса элементов будут числами Фибоначчи, окажется промежуточным вариантом как с точки зрения количества взвешивающих элементов, так и с точки зрения отношения максимального веса элемента к минимальному. Последнее позволяет снизить требования к согласованию взвешивающих элементов без значительного увеличения их количества. В работах [3–4] такой ЦАП рассматривался, однако ряд вопросов остался нерешённым. В частности, не был рассмотрен вопрос необходимого количества взвешивающих элементов в зависимости от разрядности ЦАП, а также не был рассмотрен способ построения дешифратора для управления такими взвешивающими элементами.

В предлагаемой работе обсуждается вопрос определения числа взвешивающих элементов в фибоначчиевом ЦАП, алгоритм проектирования дешифратора для кода Фибоначчи, а также возможности по динамическому согласованию элементов в таком ЦАП.

Свойства чисел Фибоначчи. Согласно работам [5–6], любое натуральное число n может быть представлено как

$$n = a_1 F_1 + a_2 F_2 + \ldots + a_k F_k, \tag{1}$$

где $a_i \in \{0,1\}$ – коэффициенты разложения; F_i – это i-е число Фибоначчи, k – необходимое число чисел Фибоначчи для разложения. Коэффициенты a_i образуют код, который в этой статье будет называться «кодом Фибоначчи». Например, число 19 можно представить следующим образом:

$$19 = 1\cdot 13 + 0\cdot 8 + 1\cdot 5 + 0\cdot 3 + 0\cdot 2 + 1\cdot 1 + 0\cdot 1 = 1\cdot F_7 + 0\cdot F_6 + 1\cdot F_5 + 0\cdot F_4 + 0\cdot F_3 + 1\cdot F_2 + 0\cdot F_1 = \overline{1010010}. \tag{2}$$

Представление числа в коде Фибоначчи неоднозначно. Свойство чисел Фибоначчи – каждое число является суммой двух предыдущих – позволяет переходить от одного кода к другому, сохраняя их эквивалентность. Такой переход может быть выполнен с использованием так называемых операций «свёртки» и «развёртки», которые заменяют комбинацию «100» на «011» и наоборот. Максимальная форма – это код Фибоначчи, для которого выполнены все возможные операции развёртки.

Разрядность кода Фибоначчи. Возможность разложения натурального числа в код Фибоначчи позволяет создать ЦАП, состоящий из элементов, взвешенных как числа Фибоначчи. Для определения разрядности кода Фибоначчи был проведён расчёт необходимого количества чисел Фибоначчи N_{Fib} в зависимости от разрядности входного кода ЦАП N_{bin}. Аппроксимация полученных результатов линейной функцией имеет вид

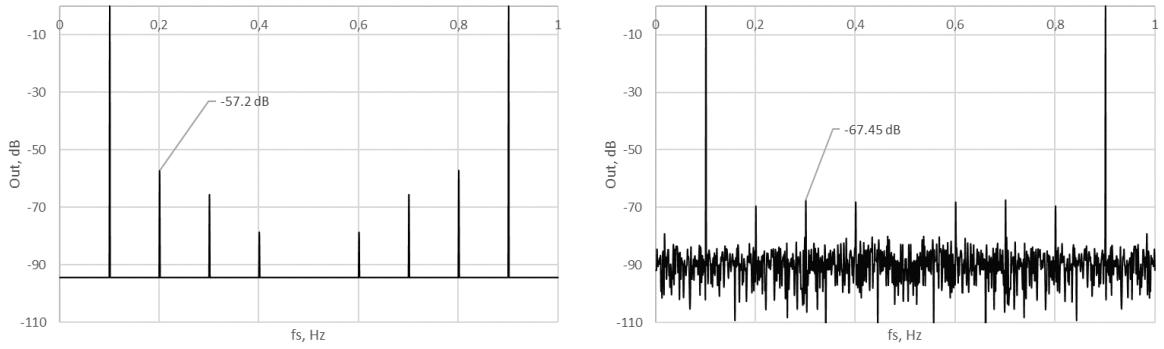
$$N_{Fib} = 1,4422 \cdot N_{bin} + 0,1031. \quad (3)$$

С учётом округления результата в сторону ближайшего целого числа полученная аппроксимация имеет нулевую ошибку в диапазоне N_{bin} от 2 до 16 бит.

Фибоначчиевый ЦАП. Для преобразования входного кода ЦАП в код Фибоначчи необходим дешифратор. Логические функции такого дешифратора не имеют регулярности, что усложняет разработку. Поэтому для проектирования дешифратора Фибоначчи предлагается на языке высокого уровня написать программу, генерирующую файл с таблицей истинности дешифратора на языке описания аппаратуры (например, Verilog). Тогда становится возможным стандартный маршрут проектирования с использованием средств проектирования цифровых устройств.

Как уже было сказано, разложение в код Фибоначчи неоднозначно, т. е. выходной сигнал ЦАП может формироваться различными комбинациями взвешивающих элементов. Такая особенность в настоящее время используется в унарных ЦАП для динамического согласования элементов (ДСЭ) [7–10]. При использовании в дешифрировании операции свёртки и развёртки в разные моменты времени для одного и того же кода могут быть получены разные его представления в коде Фибоначчи. Число операций свёртки/развёртки варьируется от 0 до $N_{Fib}/2$ в зависимости от входного кода. Для эффективной работы ДСЭ комбинации взвешивающих элементов не должны коррелировать друг с другом. Поэтому необходимо обеспечить псевдослучайное число развёрток для каждого входного кода. Для получения этого псевдослучайного числа развёрток можно использовать регистр сдвига с линейной обратной связью.

Для проверки предложенного подхода использовался 16-битный регистр с периодом случайной последовательности 57453 чисел. Моделирование проводилось для 10-разрядного ЦАП, спектр выходного сигнала представлен на рисунке. При отношении частоты дискретизации (f_s) к частоте гармонического сигнала (f) $f_s/f = 10$ выигрыш динамического диапазона, свободного от паразитных составляющих (SFDR), составил 10,2 дБ.



а) б)

Спектр выходного сигнала ЦАП (а) без и (б) с использованием предложенного подхода к динамическому согласованию элементов

Заключение. Поскольку любое натуральное число может быть разложено на сумму чисел Фибоначчи, то можно ввести код Фибоначчи, описывающий такое разложение. Использование этого разложения позволяет разработать ЦАП с элементами, взвешенными в соответствии с последовательностью чисел Фибоначчи. Необходимое количество таких весовых ячеек растет линейно с разрядностью ЦАП. В этой работе получено линейное приближение этой зависимости, имеющее нулевую ошибку для разрядности входного кода от 2 до 16 бит.

По аналогии с унарными ЦАП неоднозначность представления выходного сигнала комбинацией взвешивающих элементов может использоваться для динамического согласования элементов. Для формирования эквивалентных комбинаций предлагается использовать операцию развёртки в дешифраторе. Для получения максимальной эффективности ДСЭ используется псевдослучайная последовательность числа разверток. Такой подход позволяет улучшить SFDR на 10,2 дБ при соотношении $f_s/f = 10$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **C. Martin.** High-perfomance D/A-converters. *Springer*-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013, P. 20-25.
2. **Д. В. Морозов, М. С. Енученко.** Цифро-аналоговые преобразователи с унарной и сегментной архитектурами / Научно-технические ведомости СПбГПУ Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2013. №1 (164). С. 81–86.
3. **K.Hokazono, D.Kanemoto.** A Low-Glitch and Small-Logic-Area Fibonacci Series DAC. *Graduate School of Information Science and Electrical Engineering*, Kyushu University, Japan, 2011
4. **R.Kubokawai, T.Ohshima.** Development of low power DAC with pseudo Fibonacci sequence. *Graduate School of Information Science and Engineering*, Kyushu University, Japan, 2010
5. **A.Stakhov.** Fibonacci p-codes and Codes of the "Golden" p proportions: New Informational and Arithmetical Foundations of Computer Science and Digital Metrology for Mission-Critical Applications. *British Journal of Mathematics & Computer Science*, 2016, P. 1-49
6. **A.Stakhov,** Introduction into algorithmic measurement theory. Moscow, *Soviet Radio*; 1977
7. **P. Stubberud, J. Bruce.** An Analysis of Dynamic Element Matching Flash Digital-to-Analog Converters. *IEEE Transactions On Circuits And Systems—Ii: Analog And Digital Signal Processing*, Vol. 48, No. 2, February 2001, P. 205-213
8. **Ian Galton.** Why Dynamic-Element-Matching DACs Work. *IEEE Transactions On Circuits And Systems—Ii: Express Briefs*, Vol. 57, No. 2, February 2010, P. 69-74
9. **H. T. Jensen.** A Low-Complexity Dynamic Element Matching DAC for Direct Digital Synthesis. *IEEE Transactions On Circuits And Systems—Ii: Analog And Digital Signal Processing*, Vol. 45, No. 1, January 1998, P. 13-27
10. **Da-Huei Lee, Tai-Haur Kuo, Kow-Liang Wen.** Low-Cost 14-Bit Current-Steering DAC With a Randomized Thermometer-Coding Method. *IEEE Transactions On Circuits And Systems—Ii: Express Briefs*, Vol. 56, No. 2, February 2009, P. 137-141

A.A. Nazvanov, M.S. Yenuchenko (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University). **10-bit Fibonacci DAC**

Abstract. The paper is devoted to Fibonacci digital-to-analog converter. A decomposition of natural numbers in Fibonacci code is discussed. An expression is obtained for determining a resolution of a Fibonacci code. Fibonacci decoder's design flow is proposed. A Fibonacci series property is employed in dynamic element matching algorithm. The proposed algorithm is tested and improves SFDR by 10 dB.

УДК 681.51

О.А. КОЗАЧЁК, М.В. ДРУЖИНИНА, Н.А. НИКОЛАЕВ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ LABVIEW

В работе исследуется схемотехника и аппаратное обеспечение электромеханической системы лабораторного практикума «Микропривод» на основе двигателя постоянного тока (ДПТ). Анализируется возможность реализации современных алгоритмов управления ДПТ в среде LabView.

Введение. Электромеханические системы получили широкое распространение во многих сферах, таких как промышленность, авиация, кораблестроение, робототехника и различные её направления и т.д. В таких системах перемещение в пространстве осуществляется посредством преобразования электрической энергии в механическую. Подобные преобразования проводятся с помощью различных электрических машин: синхронные и асинхронные двигатели, коллекторные машины постоянного и переменного тока [1]. Вопросы, связанные с управлением ДПТ и сервоприводами на их основе, достаточно хорошо изучены, однако интерес к разработке и исследованию алгоритмов управления, отличных от ПИД-регулятора, остается [2, 3]. В настоящее время область применения ДПТ и сервоприводов на их основе достаточно широка, поэтому исследования в данной сфере являются актуальными. Существуют различные регуляторы, позволяющие задать желаемый характер движения. Одним из наиболее распространённых регуляторов для управления ДПТ является ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор) [4]. Существуют и другие алгоритмы управления, и интерес представляет возможность их реализации на базе электромеханической системы, состоящей из управляемого ДПТ, ДПТ, используемого в качестве нагрузочного, а также датчика частоты вращения. Наряду с проблемами управления электромеханическими системами, актуальной остается задача идентификации параметров (в том числе параметров ДПТ) [5]. Существуют различные методы исследования электромеханических систем, в том числе с использованием программной среды Matlab/Simulink, Java-программирование, LabView [6].

В работе рассматриваются схемотехнические и программные составляющие практикума “Микропривод” [7], а также возможности подключения и управления двигателями практикума с помощью имеющегося аппаратного обеспечения и программной среды LabView для реализации современных алгоритмов управления.

Исследование лабораторного практикума «Микропривод». В качестве электромеханической системы в работе рассматривается лабораторный практикум “Микропривод” [7]. Для последующей реализации управления необходимо изучить состав аппаратного обеспечения, определить, каким образом осуществлено формирование управляющего сигнала, подаваемого на двигатель, а также на каком датчике построена обратная связь. Затем необходимо выяснить, в каком виде и каким образом происходит обмен данными с программной средой LabView.

Состав аппаратного обеспечения. Оборудование, входящее в лабораторный практикум «Микропривод», включает специально разработанную плату «Микропривод», блок питания для неё и комплект соединительных проводов. Плата работает совместно с рабочей станцией NI ELVIS II, подключаемой к персональному компьютеру по USB. На плате установлено два двигателя с общим валом. Один из них – исследуемый, второй – нагрузочный. Оба двигателя имеют марку HS3SN-22240. На плате также расположен маховик, позволяющий увеличивать инерционность двигателя. В роли датчика обратной связи выступает оптический энкодер марки HOA901-11. Макет совместно с поставляемым программным обеспечением позволяет проводить исследование работы системы с ПИД-регулятором. Некоторые из лабораторных работ практикума предусматривают аппаратное исполнение и ручную настройку регулятора. Однако в рамках данной работы схемотехническое решение ПИД-регулятора рассматриваться не будет.

Подключение платы и обработка данных. Плата подключается через двухсторонний разъем NI ELVIS II с 62 контактами с каждой стороны. Если не считать контакты, сигнал на

которых задается автоматически (контакты с напряжением питания, а также заземлённые контакты), то фактически при программном управлении используются лишь несколько из них.

Управление каждым из двигателей происходит независимо. Управляющий сигнал формируется на микросхеме LMD18200T. Для этого на три её входа (“PWM”, “Brake” и “DIR”) подаются цифровые сигналы. Вход “Brake” отвечает за прекращение движения при любых прочих входных. Изменяя сигнал на входе “DIR”, можно менять направление вращения двигателя. Наиболее значимым является вход “PWM”. На этот вход подаётся сигнал с широтно-импульсной модуляцией, то есть сигнал, имеющий постоянную частоту и программируемое время импульса [8]. С помощью изменения сигнала, подаваемого на вход “PWM”, можно осуществлять управление скоростью вращения двигателя.

В качестве датчика угловой скорости выступает оптический энкодер. Импульсы с него, проходя через триггер Шмитта (микросхема LS14), поступают на аналоговый и программируемый входы рабочей станции. Программируемый вход может работать в режиме счётчика, что позволит без лишних преобразований получить значение частоты вращения с целью дальнейшего построения системы управления. Если рассматривать для этих целей аналоговый вход, то для получения значения частоты вращения необходимо будет реализовать в LabView счётчик импульсов.

Программная среда LabView используется для обработки результатов измерений, визуализации данных, формирования управляющих сигналов как на управляемый ДПТ, так и на нагрузочный ДПТ, реализует интерфейс для взаимодействия пользователя с лабораторным практикумом.

Заключение. Проведено исследование лабораторного практикума «Микропривод». Изучены основные элементы аппаратного обеспечения и принципы управления имеющимся двигателем постоянного тока. Сформировано представление о том, как устанавливается управляющий сигнал, каким образом преобразовывается на плате сигнал с датчика обратной связи и в каком виде он поступает на вход контрольно-измерительного оборудования. Следующим этапом работы является разработка виртуального прибора в программной среде NI LabView, который расширит возможности лабораторного практикума «Микропривод». С использованием нового виртуального прибора планируется реализовать возможности исследования современных алгоритмов управления и идентификации параметров электромеханических систем на базе ДПТ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Усольцев А.А.** Электрические машины / Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013, 415 с.
2. **Bhavana Pillai, Krishnapriya.T.Nair.** Intelligent Adaptive Controller for DC Servo Motor Position Control in LabVIEW. International Conference on Intelligent Computing,Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), 2017
3. **E.A. Ramadan, M. El-bardini, M.A. Fkirin.** Design and FPGA-implementation of an improved adaptive fuzzy logic controller for DC motor speed control. Ain Shams Engineering Journal. Volume 5, Issue 3, September 2014, Pages 803-816
4. **N. Bacac, V. Slukic, M. Puškaric, B. Štih, E. Kamenar, S. Zelenika**. Comparison of different DC motor positioning control algorithms. MIPRO 2014, 26-30 May2014, Opatija, Croatia
5. **Nicolae Patrascoiu.** Identification of parameters for dynamic regime of DC motor through virtual instrumentation. 14th International Conference on Engineeringof Modern Electric Systems (EMES), 2017
6. **Harshatej K. Raneand S. K. Parchandekar.** A Web-Based Monitoring and Control of DC Motor using LabVIEW Environment. 2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials (ICSTM), Vel Tech Rangarajan Dr. Sagunthala R&D Institute of Science and Technology, Chennai, T.N., India. 6-8 May 2015. pp.543-547.
7. https://adv-techno.ru/upload/iblock/efb/efb806254f74a963e0b482676024e9f8.pdf
8. **Ключев А.О., Ковязина Д.Р., Кустарев П.В., Платунов А.Е.** Аппаратные и программные средства встраиваемых систем/Учебное пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010, 290 с.

O.A. Kozachek, M.V. Druzhinina, N.A. Nikolaev (ITMO university, Saint-Petersburg). **Electromechanics systems controllers research based on LabView.**

Abstract. DC (direct current) motor is considered as an electromechanical system in this research. Software that is used to control the system, was created in the LabView. In this report the hardware of the system was investigated. The purpose of the research is to define if modern control algorithms can be implemented.

УДК 62.50

С.А. АЛЕКСАНДРОВА, О.В. СЛИТА, Е.А. КАРПЕНКО
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ЗАКОН УПРАВЛЕНИЯ МОСТОВЫМ ПОВЫШАЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ С МЯГКИМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ НА ОСНОВЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЧАСТОТЫ КОММУТАЦИИ ТРАНЗИСТОРОВ

Предлагается метод фазового управления мостовым повышающим преобразователем напряжения постоянного тока, напряжение питания которого меняется в широком диапазоне, основанный на изменении частоты коммутации транзисторов и реализованный в виде пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора. Разработанный метод позволяет достичь желаемых динамических характеристик системы и ограничить максимальный ток, коммутируемый транзисторами.

Введение. В качестве частотных преобразователей для управления электродвигателями широко используются транзисторные преобразователи [1, 2]. При низком входном напряжении и требуемых высоких выходных напряжении и мощности применяется мостовая схема преобразователя напряжения с повышающим трансформатором и добавочной индуктивностью, введенной в структуру для обеспечения мягкой коммутации силовых ключей. Однако существенным недостатком данной топологии являются высокие пиковые значения тока, коммутируемого транзисторами мостового инвертора. Анализ тепловых процессов, коммутационных потерь транзисторных модулей [3, 4] подтверждает эффективность изменения частоты коммутации с целью увеличения КПД преобразователя при изменении напряжения питания.

В работе предлагается метод фазового управления мостовым преобразователем, основанного на изменении частоты коммутации, значение которой определяется величинами напряжения питания и допустимого значения пикового тока. Метод позволяет реализовать ограничение максимальных токов, коммутируемых силовыми ключами, что увеличивает срок службы дорогостоящих полупроводниковых элементов.

Постановка задачи. Параметры разрабатываемого преобразователя напряжения постоянного тока: диапазон возможных значений напряжения питания $U_{\text{пит}}$ – от 175 В до 320 В, значение выходного стабилизированного напряжения – 610 В, максимальный коммутируемый ток выбранных транзисторов – 1250 А, номинальная выходная мощность – 100 кВт. Передаточная функция преобразователя «управляющий сигнал – напряжение на выходе» [5]:

$$W(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{U_{\text{вых}}(s)}{d(s)} = \frac{nU_{\text{пит}}}{s^2 L' C_f + s\dfrac{L'}{R_l} + 1}, \quad (1)$$

где $U_{\text{вых}}(s)$ – преобразование Лапласа напряжения выхода, $d(s)$ – преобразование Лапласа сигнала управления замкнутой системы, коэффициента заполнения, L' – эквивалентная суммарная индуктивность инвертора, R_l – сопротивление нагрузки, n – коэффициент трансформации трансформатора, C_f – ёмкость выходного фильтра.

Цель работы состоит в обеспечении заданных показателей качества проектируемой системы, в состав которой входит объект управления (ОУ) (1): время переходного процесса не более 5 с, перерегулирование не более 5%, повышение КПД рассматриваемого устройства и обеспечение ограничение токов, коммутируемых транзисторами, на уровне 1000 А.

Основной результат. Для увеличения КПД преобразователя при фиксации 1000 А предлагается не использовать максимально допустимую частоту коммутации транзисторов для всего диапазона напряжения питания, определяемую для максимального напряжения питания, а настраивать ее значение [6].

Для обеспечения требуемых показателей качества замкнутой системы будем использовать обратную связь по напряжению с помощью ПИ-регулятора [7] с передаточной функцией:

$$W_{pi}(s) = k(1 + \frac{1}{Ts}), \tag{2}$$

где k, T – параметры регулятора.

Коэффициенты ОУ (1) представим в интервальной форме:

$$[a_1] = \frac{1}{[L']C_f},\ [a_2] = \frac{1}{C_f[R_l]},\ [b_1] = \frac{n[U_{\text{пит}}]}{[L']C_f}, \tag{3}$$

где L' – эквивалентная суммарная индуктивность инвертора, R_l – сопротивление нагрузки, n – коэффициент трансформации трансформатора, C_f – ёмкость выходного фильтра, $U_{\text{пит}}$ – диапазон возможных значений напряжения питания.

Рассчитаем k, T для всех значений $[b_1]$. Параметр $k_u = \frac{k}{T}$ определяется заданной добротностью по скорости D ($D = 5$):

$$k_u = \frac{D\overline{[a_1]}}{\underline{[b_1]}} \tag{4}$$

Параметр k необходимо находить для заданной степени устойчивости $\zeta > 5$, обеспечивающей требуемое время переходного процесса [8]. ПИ-регулятор для $\underline{b_1}$, то есть для минимального значения напряжения питания $U_{\text{пит}0} = 175$ В, и для установленного эффективного значения частоты коммутации 14,5 кГц [4] принимает вид:

$$W_{pi0}(s) = k_0(1 + \frac{1}{T_0 s}) = 5 \cdot 10^{-4}\left(1 + \frac{1}{8{,}77 \cdot 10^{-3} s}\right). \tag{5}$$

При изменении входного напряжения частота коммутации будет изменяться в установленных пределах, а параметры ПИ-регулятора настраиваться по выражениям:

$$T = \frac{T_0 f_{sw0}}{f_{sw}},\ k = \frac{k_0 T U_{\text{пит}0}}{T_0 U_{\text{пит}}}. \tag{6}$$

Заключение. Предложен способ управления мостовым преобразователем с настройкой частоты коммутации транзисторов в зависимости от напряжения питания, достоверность которого подтверждается экспериментальными результатами. В дальнейшем метод можно доработать для использования при изменении нагрузки в широком диапазоне от 10% до 100%.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Erickson R., Maksimovic D.** Fundamentals of power electronics, Norwell, Mass: Kluwer Academic, 2001. 885 p.
2. **Мелешин В.И., Овчинников Д.А.**Управление транзисторными преобразователями электроэнергии. М.: Техносфера, 2011. 576 с.
3. **Mallik A., Khalib A.** Variable Switching Frequency State Feedback Control of a Phase Shifted Full Bridge DC/DC Converter// IEEE Trans. Power Electron. 2016. V. 32. N 8. P. 6523–6531.
4. **Alexandrova S., Baev A., Goncharenko M., Nikolaev N., Slita O.** Practical Implementation of High Power and Efficiency Dc-dc Full-Bridge PWM Boost Converter// Proceedings of the International Conf. on Information and Digital Technologies 2017.
5. **Di Capua G., Shirsavar S.A., Hallworth M.A., Femia N.**An enhanced model for small-signal analysis of the phase-shifted full-bridge converter//IEEE Transactions on Power Electronics. 2004. P. 99–102.

6. **Александрова С.А., Баев А.П., Николаев Н.А., Слита О.В.** Синтез закона управления мостового преобразователя напряжения с мягким переключением на базе изменения частоты коммутации транзисторов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т.18, № 4. С. 700–703.
7. **Aidan O'Dwyer.** Handbook of PI and PID controller tuning rules, 3nd Edition. London: Imperial College Press, 2009. 608 p.
8. **Goyvoronsky S.A., Ezangin T.A.** Robust control of complex dynamic units with interval plant // In Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on System and Compute Science (ICSCS). 2013. P. 201–204.

S.A. Alexandrova, O.V. Slita, E.A. Karpenko (ITMO University, Saint Petersburg). **Control law design for boost full-bridge converter with soft commutation on the base of switching frequency variation**

Abstract. The method of phase-shift control of high power boost full-bridge converter with widely varied supply voltage based on switching frequency variation and implemented as PI-controller is proposed. The method allows improving dynamic characteristics of the system and limiting of maximum current commuted by transistors.

▪ НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫМИ АППАРАТАМИ ▪

УДК 681.58

Д.А. ЧЕРГИНЕЦ, В.А. АНТИПОВ, А.О. ОВЧАРОВ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ ЗА ДВИЖУЩИМСЯ ОБЪЕКТОМ ДЛЯ КВАДРОКОПТЕРА

Рассматривается задача слежения за объектом с камеры квадрокоптера. Выбран и реализован алгоритм компьютерного зрения для отслеживания объекта. Построен П-регулятор для удерживания камеры в направлении отслеживаемого объекта. Реализована система слежения за движущимся объектом.

Введение. Киноиндустрия, охранные предприятия, правоохранительные органы и промышленные предприятия часто нуждаются в системах слежения за объектом. Это может быть актер, преследуемый человек, рабочий или любой другой движущийся объект. И отличным, а иногда и единственным возможным способом слежения за движущимся объектом, является слежение при помощи квадрокоптера. Использование пилотов в данных случаях может приводить к ошибкам, а также ограничивает область полета радиусом охвата управляющего модуля. Целью данной работы является разработка системы слежения за движущимся объектом при помощи квадрокоптера PARROT AR.DRONE 2.0.

Система слежения за движущимся объектом. Объектом слежения в работе был принят шар, цвет которого выбран контрастным по отношению к фону. В качестве исходных данных для следящего алгоритма управления выбраны радиус шара и его координаты в камере. В HSV базисе выбирается цветовой диапазон объекта и выполняется фильтрация фона. На отфильтрованном изображении происходит поиск замкнутых контуров, чьи площади находятся в заданном диапазоне. Радиус шара определяется из площади контура, а координаты центра c_x, c_y по моментам изображения контура [1]. Далее находится разница между идеальной окружностью с радиусом R и радиусом найденного контура. Если эта разница не превышает 10% от R, то контур считается искомым шаром.

Регулятор. Когда объект найден, необходимо удержать камеру в направлении на отслеживаемый объект. С этой целью в работе предложен П-регулятор, позволяющий вычислять относительные скорости, которые необходимо достичь, чтобы объект находился в центре изображения и камера захватывала заданную часть области. П-регулятор определяется соотношениями:

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_z \\ v_\psi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_z & 0 \\ 0 & 0 & k_\psi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s^* - s \\ c_y^* \\ c_x^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

где v_x, v_y – скорости по осям e_1, e_3 (рис. 1), v_ψ – скорость изменения угла ψ, $\{k_x \;\; k_z \;\; k_\psi\}$ – подобранные коэффициенты для П-регулятора , s – размер видимой камерой области, s^* – желаемый размер видимой камерой области, c_y^*, c_x^* – положение центра объекта с учетом матрицы поворота. Для уменьшения колебаний системы в регулятор добавлена зона нечувствительности. То есть отслеживаемый объект может находиться в некоторой окрестности центра изображения без изменения скорости квадрокоптера.

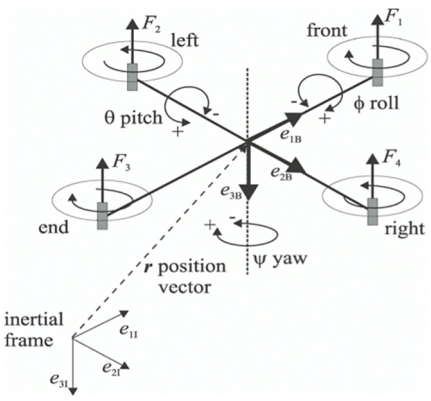


Рис. 1. Поиск объекта в системе координат квадрокоптера

Научный руководитель к.т.н., старший научный сотрудник Ведяков А.А.

Система управления. Управление происходит при помощи ROS [3] и пакета ardrone_autonomy, драйвер квадрокоптера уже реализован в данном пакете. Структура разработанной системы представлена на рисунке 2.

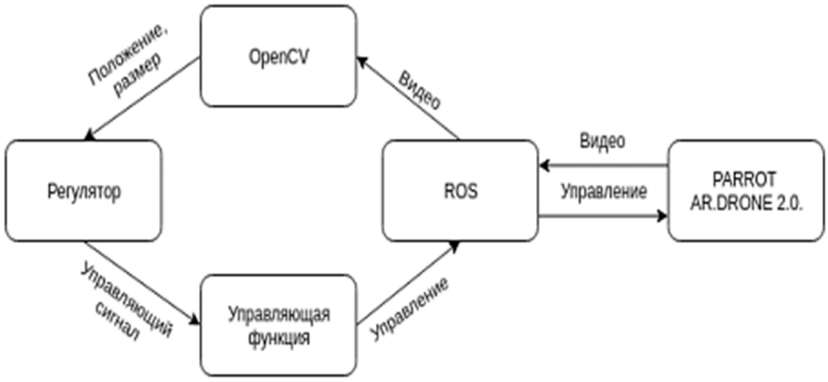


Рис. 2. Структура разработанной системы

После создания системы слежения производилась калибровка камеры и настройка алгоритма компьютерного зрения OpenCV [1] на освещение и на цвет шара. Эксперименты проводились в хорошо освещенном помещении соранжевым мячиком диаметром 7 см (рис. 3). В результате эксперимента квадрокоптер обнаруживал, отслеживал и следовал за мячиком при его перемещении. При резком изменении положения объекта была замечена небольшая колебательность системы и потеря объекта.

Рис. 3. Изображение с камеры во время проведения эксперимента

Заключение. Разработанная система слежения отслеживает и удерживает в поле зрения объект слежения с момента взлета и до посадки, однако система показала себя с плохой стороны при высоких задержках передачи сигнала, но данную проблему можно решить путем установки бортового компьютера. Для подавления колебаний системы необходимо построение более сложного регулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gary Bradski and Adrian Kaehler,** Learning OpenCV, O'Reilly Media. 2008
2. **Teppo Luukkonen,** Modelling and control of quadcopter, Aalto University, Espoo, 2011, pp. 2-5
3. **Khassanov Alisher, Krupenkin Alexander, Borgul Alexandr,** Control of the Mobile Robots with ROS in Robotics Courses, Procedia Engineering, Volume 100, 2015, Pages 1475-1484, ISSN 1877 -7058

D.A. Cherginets, A.A.Antipov, A.O.Ovcharov (ITMO University, St.Petersburg). **Moving object tracking system via quadcopter**

Abstract. To track an object, data transfers from the quadcopter's camera and via the open source computer vision library (OpenCV), calculate the position and dimensions of the object. The obtained values of the position and size of the object are using by the regulator to calculate the control signal. Received signal is transmitting to quadcopter by ROS (Robot Operating System) and the ardrone_autonomy package.

УДК 681.5.017

М.Ю. ШАВИН
(Московский физико-технический институт, Долгопрудный)

Д.А. ПРИТЫКИН
(Сколковский институт науки и технологий)

ЭКСТРЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ КВАДРОКОПТЕРОМ С ПОВОРОТНЫМИ РОТОРАМИ ПРИ ОТКАЗЕ ДВУХ СМЕЖНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассматривается управляемая динамика беспилотного летательного аппарата (БЛА) с четырьмя поворотными роторами. Моделируется сценарий потери аппаратом пары кормовых двигателей. Предложены дополнения к существующим алгоритмам, обеспечивающие возвращение аппарата на базу и выполнение им мягкой посадки при отказе двух смежных двигателей.

Введение. Некоторое время назад малые БЛА в основном можно было встретить на специализированых технических конференциях и в научных лабораториях, а основной областью их применения была отработка различных подходов к синтезу систем управления, апробация различных инженерных приемов и технических систем. Однако, с развитием технологий и алгоритмов, позволяющих увеличить время автономной работы, повысить безопасность использования и автономность мультикоптеров, а также общее количество переносимой полезной нагрузки, область их применения значительно расширилась.

При этом ценность малых летающих роботов, в том числе квадрокоптеров, в качестве испытательного стенда для тестирования новых инженерных и научных разработок ничуть не снизилась. Одним из распространенных направлений исследований, например, является синтез систем управления, предусматривающих внезапный выход из строя ключевых приводящих узлов и отработка перехода в экстремальный режим управления [1–4]. В последних работах авторам удалось добиться возможности продолжения миссии квадрокоптера с одним вышедшим из строя двигателем на высокой скорости [5] и показать, что успешная посадка аппарата возможна даже при наличии всего двух работающих двигателей, расположенных на противолежащих лучах аппарата [6]. Подобные исследования проводились также для квадрокоптеров нестандартной конструкции, например тильт-роторов, где дополнительные исполнительные органы системы управления, а именно сервоприводы, изменяющие направления тяги оставшихся двигателей, способны частично компенсировать потерю управляемости БЛА вследствие потери одного двигателя [7].

В докладе рассматривается мультикоптер с четырьмя поворотными роторами. Построена модель динамики аппарата [8], кратко описывается подход к синтезу контура управления, использующего полноразмерный вектор управляющих воздействий. Рассматривается сценарий, при котором аппарат теряет пару кормовых двигателей. Для этого сценария предложены дополнения к существующим алгоритмам, обеспечивающие возвращение аппарата на базу и выполнение им мягкой посадки. Работоспособность разработанных алгоритмов подтверждается результатами численных экспериментов.

Конструкция аппарата. Конструкция БЛА включает в себя корпус, из которого выходят лучи с закрепленными на концах двигателями, имеющими пропеллеры. Лучи расположены симметрично относительно корпуса аппарата, т.е. реализована так называемая X-схема. Направления вращения смежных пропеллеров противоположны: первый и третий – пропеллеры левого вращения, второй и четвертый – правого. Дополнительно каждый ротор может поворачиваться вокруг продольной оси луча специальным сервоприводом (рис. 1).

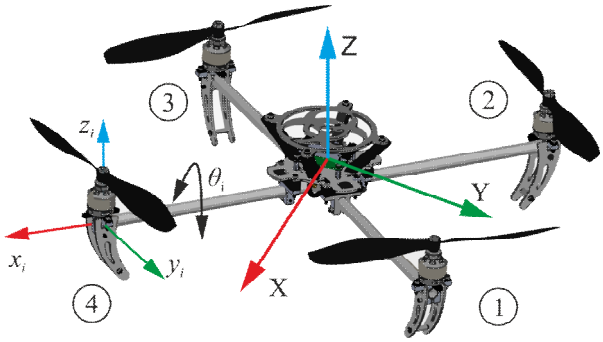


Рис. 1. Общая схема БЛА с поворотными роторами

Постановка задачи. Рассмотрим сценарий, при котором в рабочем состоянии остаются только два смежных двигателя. Без потери общности можно выбрать, например, двигатели, расположенные спереди (первый и четвертый, рис 1).

В качестве компонент вектора управляющих воздействий u выберем скорости вращения работающих двигателей $\tilde{\omega}_i$ и углы их отклонения относительно вертикального положения θ_i:

$$u = \begin{pmatrix} \omega \\ \theta \end{pmatrix}, \quad \begin{matrix} \omega = \left(\tilde{\omega}_1 \left|\tilde{\omega}_1\right| \quad \tilde{\omega}_4 \left|\tilde{\omega}_4\right|\right)^T, \\ \theta = \left(\theta_1 \quad \theta_4\right)^T. \end{matrix} \tag{1}$$

Целью управления положим обеспечение требуемой наперёд заданной траектории центра масс аппарата. Такая постановка позволит формализовать задачу возвращения аппарата на базу и безопасной посадки.

Контур управления. Размерность вектора управляющего воздействия (1), равная четырем, может позволить независимо управлять ориентацией и высотой полета аппарата при построении соответствующих регуляторов. Уравнения динамики аппарата, при некоторых упрощениях, могут быть записаны в виде

$$F\left(\ddot{r}, \dot{r}, \dot{\Omega}, \Omega, q\right) = \mathbb{M}\left(\theta\right)\omega, \tag{2}$$

где r − положение центра масс аппарата в системе координат, связанной с Землей с началом в точке взлета, Ω − угловая скорость его корпуса, q − кватернион его ориентации. В работе показано, что уравнения (2) могут быть разрешены относительно компонент вектора u (1), что позволяет найти углы поворотов сервоприводов и скорости вращения пропеллеров, обеспечивающих необходимое управление. Изменение ориентации корпуса БЛА при известном направлении вектора общей тяги, в свою очередь, позволяет решить задачу отслеживания траектории центром масс аппарата. Проведенные численные эксперименты показали, что погрешность приведения квадрокоптера с двумя работающими двигателями на базу не превысила 25 см.

Заключение. Рассмотрена управляемая динамика БЛА с поворотными роторами в случае отказа двух смежных двигателей. Предложены алгоритмы экстренного управления аппаратом. Работоспособность алгоритмов подтверждена численными экспериментами.

Работа проводилась при поддержке лаборатории перспективных систем управления МФТИ acsl.mipt.ru

ЛИТЕРАТУРА

1. **L. Besnard, Y. B. Shtessel, and B. Landrum**, “Quadrotor vehicle control via sliding mode controller driven by sliding mode disturbance observer,” J. Franklin Inst., vol. 349, no. 2, pp. 658–684, 2012
2. **V. Lippiello, F. Ruggiero, and D. Serra**, “Emergency landing for a quadrotor in case of a propeller failure: A backstepping approach,” in Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots Syst., 2014, pp. 4782–4788.
3. **M. W. Mueller and R. D’Andrea**, “Relaxed hover solutions for multicopters: Application to algorithmic redundancy and novel vehicles,” Int. J. Robot. Res., vol. 35, pp. 873–889, 2015.
4. **Морозов Ю.В.** Экстренное управление квадрокоптером при отказе двух симметричных винтов. Автоматика и телемеханика. 2018, № 3, с. 92-110.
5. **S. Sun, L. Sijbers, X. Wang and C. de Visser**, "High-Speed Flight of Quadrotor Despite Loss of Single Rotor," in *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 4, pp. 3201-3207, Oct. 2018.doi: 10.1109/LRA.2018.2851028
6. **Gomes, Raif C., and George A.P.** Thé. "PID-based fail-safe strategy against the break of opposite motors in quadcopters." *2015 Workshop on Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems (RED-UAS)*. IEEE, 2015.

7. **Nemati, Alireza, Rumit Kumar, and Manish Kumar**. "Stabilizing and control of tilting-rotor quadcopter in case of a propeller failure." *ASME 2016 Dynamic Systems and Control Conference*. American Society of Mechanical Engineers, 2016.
8. **Шавин, М. Ю.** Управляемая динамика квадрокоптера с поворотными роторами. *Инженерный журнал: наука и инновации,* 2018, 76 (4), doi: 10.18698/2308-6033-2018-4-1755.

M.Y. Shavin (Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny), **D.A. Pritykin** (Skolkovo Institute of Science and Technology). **Emergency Control of a Tilt-Rotor Quadrotor in Case of Two Adjacent Motors Malfunction.**

Abstract. We revisit the dynamics and control of a quadrotor with four tilting rotors. An emergency case is studied, when two hind motors are lost. For this scenario, we propose control algorithms allowing the vehicle to return home and make a soft landing.

УДК 681.51

Ю.С. ЗАЙЦЕВА
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ПОДАВЛЕНИЕ КОЛЕБАНИЙ В КОНТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ «ОПЕРАТОР – БЕСПИЛОТНЫЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ»

Рассматривается явление неблагоприятного взаимодействия в режиме ручного управления между человеком-оператором и беспилотным летательным аппаратом по причине ограничения скорости привода и отставания по времени входного сигнала пилота, которые вызывают нелинейные колебания беспилотного летательного аппарата вплоть до потери управления. Эти колебания предлагается подавлять с помощью нелинейного корректирующего устройства.

Введение. Рассматриваемое в докладе аномальное взаимодействие между человеком-оператором и беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) относится к явлению раскачки самолета летчиком (РСЛ) в большой авиации [1]. Преемственность этого явления в системах управления БПЛА объясняется наличием тех же причин, что и в пилотируемых самолетах: технология электро-дистанционного управления приводами, которые имеют ограничение скорости и запаздывание по времени управляющего сигнала. Для предотвращения колебаний применяют фильтры низких частот [2], метод инверсной динамики [3], адаптивный закон управления [4] и другие [5]. В данной работе разрабатывается нелинейное корректирующее устройство, позволяющего избежать возникновения колебаний в контуре управления «оператор – БПЛА».

Корректирующее устройство для подавления колебаний. В работе рассматривается движение малого БПЛА в режиме ручного управления с наземной станции. Имеющаяся задержка по времени определяется как разница во времени между моментом, когда регистрируется управляющий сигнал, генерируемый пилотом, и временем, когда записывается отклонение руля высоты. Привод органа управления БПЛА имеет конструктивное ограничение скорости сигнала управления. При определенных параметрах полета в продольной оси управления появляются непреднамеренные колебания летательного аппарата [1]. В данной работе предлагается включить в контур управления по продольной оси последовательное нелинейное корректирующее устройство (НКУ). Внедрение НКУ в систему управления с нелинейностями, такими как насыщение, трение, зона нечувствительности, уменьшает скорость переходного процесса, подавляет автоколебания [6]. НКУ имеет уравнения вида [7, 8] :

$$y = \mathrm{k}|u|\,sign(x), \qquad (1)$$
$$\mathrm{A}(p)x = \mathrm{B}(p)u,$$

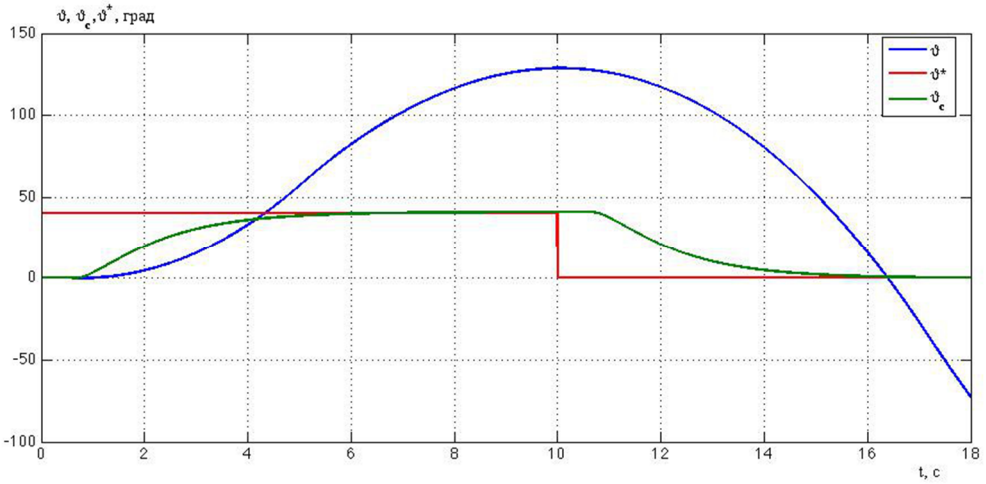
где p – оператор дифференцирования, A(p), B(p) – полиномы такие, что W(s)=B(s)/A(s) – передаточная функция упреждающего фильтра, который выбирается в следующей форме:

$$\mathrm{W}(s) = \frac{\mathrm{T_1}}{\mathrm{T_2}} \bullet \frac{\mathrm{T_2 s}+1}{\mathrm{T_1 s}+1}, \qquad (2)$$

где T_1= 0.01с, T_2=0.1 с – постоянные времени, которые обеспечивают максимальный запас по фазе НКУ, s – оператор Лапласа. Входной сигнал x, разветвляясь, проходит по двум каналам фильтра. Первая ветвь u состоит из коэффициента усиления k и блока взятия модуля, вторая ветвь состоит из фильтра (2) и блока сигнатуры. Сигнал на выходе фильтра y получается как произведение выходных сигналов обеих ветвей.

Научный руководитель д.т.н., проф. Андриевский Б.Р.

В исследуемый контур управления входят модель человека-оператора, НКУ и модель привода органа управления второго порядка с ограничением на скорость. Все параметры моделей взяты из [1]. Результаты моделирования, соответствующие максимально возможной нагрузке на систему управления, приведены на рисунке.



Переходные процессы системы по углу тангажа

На рисунке показаны переходные процессы по углу тангажа для задающего сигнала ϑ^*, система без коррекции ϑ, с коррекцией – ϑ_c. Введение НКУ позволило одновременно увеличить коэффициент усиления оператора с 0.4 до 8 и амплитуду задающего сигнала до 40 град при времени задержки сигнала τ =0.6 с.

Заключение. Результаты работы показывают, что предложенный метод нелинейной коррекции в контуре управления БПЛА позволяет предотвратить нелинейные колебания в условиях фазовой задержки и ограничения скорости привода, при этом на порядок увеличить быстродействие оператора. В работе метод нелинейной коррекции был применен впервые к математической модели БПЛА «*Phastball*».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gu Y., Chao H., Rhudy M. B**.. Flight data analysis of pilot-induced oscillations of a remotely controlled aircraft. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2013. Boston, MA.
2. **Brieger O., Kerr M.** And others. Pilot-involved-oscillation suppression using low-order antiwindup: flight-test evaluation. Journal of guidance, control and dynamics. 2012. Vol. 35. No. 2. P. 471 – 483.
3. **Lane S.H., Stengel R.F**. Flight control design using non-linear inverse dynamics. Automatica. Vol.24, No. 4, pp.471-483. 1988.
4. **Rysdyk R., Calise A.J.** Robust nonlinear adaptive flight control for consistent handling qualities. IEEE. 2005. Vol. 13. No. 6. P. 896 – 910.
5. **Зайцева Ю.С.** Обзор методов подавления колебаний, вызванных раскачкой самолета летчиком. Материалы XIX КМУ «Навигация и управление движением». 2017. С. 65 – 67.
6. **Попов Е.П.** Нелинейные корректирующие устройства в системах автоматического управления. М.: Машиностроение, 1971.
7. **Andrievsky B., Kuznetsov N., Kuznetsova O. et al.** Nonlinear phase shift compensator for pilot-induced oscillation prevention. Prepr. 9th IEEE Europ. Modeling Symp. On Mathematical Modeling and Computer Simulation (EMS 2015). Madrid, Spain: 2015. P. 225 – 231.
8. **Andrievsky B., Kravchuk K., Kuznetsov N**. et al. Hidden oscillations in the closed-loop aircraft-pilot system and their prevention. IFAC-PapersON-Line. 2016.

I.S. Zaitceva (ITMO University, St-Petersburg). **Suppression of oscillations in control loop of human operator and unmanned aerial vehicle.**

Abstract. The report is devoted the phenomenon of adverse interaction between the human operator and the unmanned aerial vehicle in the manual control mode due to the rate limit and system time delay, which causes nonlinear oscillations of the unmanned aircraft up to control loss. It is proposed to suppress these oscillations by use of a nonlinear corrective device.

УДК 629.05

А.В. САВКИН, Л.А. КОЛГАНОВ, Е.Л. ЧЕХОВ
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет))

СИНТЕЗ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Представлены результаты разработки программно-алгоритмического обеспечения систем навигации и управления движением автономного необитаемого подводного аппарата среднего класса. Описаны состав комплекса бортового оборудования, методы и подходы, применяемые в процессе синтеза и тестирования программ и алгоритмов. Приведены результаты испытаний.

Введение. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) в настоящее время нашли широкое применение и доказали свою эффективность при обеспечении безопасности судоходства, мониторинге трубопроводов, наблюдении природных процессов [1]. Наиболее распространенным и востребованным является класс средних (переносных) АНПА массой от 50 до 500 кг. Такие аппараты активно разрабатываются как отечественными, так и зарубежными производителями [2].

Вследствие схожих областей применения и требований, предъявляемых к тактико-техническим характеристикам АНПА, многие аппараты имеют схожий состав комплекса бортового оборудования. Основными различиями являются разнообразие типов управляющих поверхностей (рулей) и несхожесть программно-алгоритмического обеспечения, как самих аппаратов, так и постов оператора. Доклад посвящен промежуточным итогам разработки программно-алгоритмического обеспечения навигации и управления движением АНПА среднего класса.

Навигационное обеспечение АНПА. В ходе выполнения опытно-конструкторских работ по созданию АНПА возникла задача синтеза алгоритмов навигации и управления движением и их реализация на центральном вычислителе.

Для обеспечения контура управления параметрами объекта на аппарате установлены: допплеровский измеритель скорости; датчик давления, впередсмотрящий эхолот; бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) разработки коллектива кафедры «Автоматизированные комплексы систем ориентации и навигации»; двухантенный спутниковый приемник. Расположение измерителей в корпусе АНПА изображено на рис. 1. Данные с измерителей преобразуются модулями контроля и сопряжения во внутренний протокол обмена и передаются по шине CAN (Controlled Area Network) в блок вычислителя.

Рис. 1. Расположение датчиков и систем в корпусе АНПА

Такая архитектура позволяет быстро добавлять новые измерители и исследовательскую аппаратуру (полезную нагрузку) потребителя в систему. БИНС, алгоритм ориентации которой построен на основе модифицированного уравнения Пуассона, служит основным источником па-

Научный руководитель к.т.н., доцент Антонов Д.А.

раметров ориентации и навигации. Совместная обработка измерений производится с применением алгоритмов комплексной обработки информации на вычислителе с тройным резервированием [3]. Рассчитанные параметры объекта передаются в контур управления для осуществления стабилизации и траекторного управления.

Контур управления. Контур управления условно делится на два блока: блок стабилизации и блок формирования траекторных параметров. Регуляторы блока стабилизации обеспечивают соответствие рассчитанных параметров положения объекта требованиям, заданным блоком формирования траекторных параметров.

Для расчета параметров регуляторов блока стабилизации была разработана математическая модель аппарата, учитывающая силы и моменты, возникающие в следствие тяговых, гидродинамических, управляющих и других воздействий, влияющих на аппарат [4]. Идентификация коэффициентов модели на начальном этапе производилась при помощи компьютерного моделирования в среде SolidWorks и аналитическими методами [5]. Гидродинамические коэффициенты модели получены в виде зависимостей от углов атаки и скольжения, а также, от угловых скоростей аппарата, и использованы для расчета параметров регуляторов блока стабилизации методами оптимизации.

Подход к созданию и тестированию программного обеспечения. Для ускорения процесса разработки и упрощения тестирования разрабатываемого программного обеспечения, все алгоритмы были реализованы в среде Matlab/Simulink с последующей конвертацией в программный код микроконтроллера на языке Си. Такой подход дает возможность оперативно вносить крупные изменения в алгоритмическую структуру, а также позволяет быстро проводить моделирование алгоритмов на базе персонального копмьютера.

Проверка навигационных алгоритмов производилась с использованием полученных данных с эталонной инерциально-спутниковой системы SPAN-SE, в состав которой входят модуль инерциальных измерителей LCI-1, состоящий из волоконно-оптических датчиков угловых скоростей (дрейф нуля менее 1^0/ч) и акселерометров тактического класса точности, а также двухчастотный приёмник глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) OEMV-2. Все модули произведены компанией NovAtel. [6].

Запись показаний датчиков производилась на Волоколамском шоссе и прилегающей территории, г. Москва. Место проведения записи выбиралось исходя из необходимости обеспечения открытого небосвода и минимального расстояния до базовой станции. Длина тестовой траектории составила 10 км. Средняя скорость движения удерживалась на уровне 4.5 м/с, что соответствует возможностям АНПА. На испытаниях производилась запись показаний инерциальных датчиков и приёмника ГНСС. По результатам постобработки полученных данных, зафиксированные параметры движения вырабатывались с точностью на уровне 0.02 м/с для проекций скоростей и 0.01 м для параметров навигации с привязкой к шкале времени на уровне 0.00002 с. Результатом обработки полученных данных являются: запись показаний инерциальных датчиков и параметры эталонной траектории, привязанные к единой временной шкале.

Важно отметить тот факт, что, во время выполнения целевых функций, навигационный алгоритм АНПА работает в режиме комплексирования показаний БИНС, гидролокатора бокового обзора, альтиметра и другого бортового оборудования, однако, показания БИНС являются наиболее точными и достоверными в условиях недоступности сигналов СНС. В связи с этим, к БИНС предъявляются особые требования к точности и достоверности измерений, выполнение которых необходимо подтверждать на каждом этапе разработки системы. Первым таким этапом, является разработка алгоритмического обеспечения БИНС. Проверка алгоритмов БИНС производилась в предположении автономной работы БИНС (без использования информации от внешних средств коррекции) следующим образом. На вход алгоритма подавались записанные («сырые») показания инерциальных датчиков и выходные данные сравнивались с соответствующими эталонной параметрами. В качестве начальных значений на первом такте моделирования принимались соответствующие значения параметров эталонной траектории.

На рис. 2 изображены траектории, полученные эталонной инерциально-спутниковой системы и траектории, рассчитанные навигационными алгоритмами БИНС.

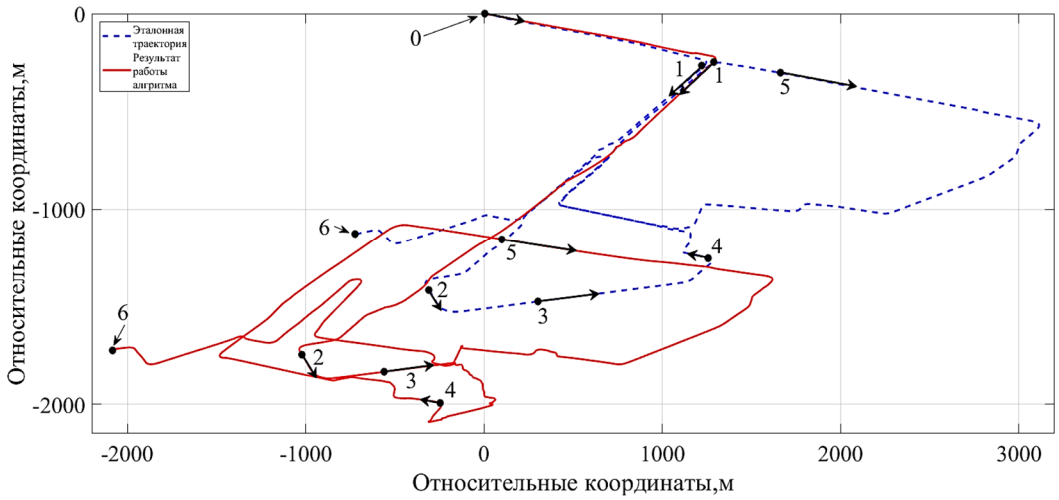


Рис. 2 Траектории эталонной системы, корректируемой по данным СНС и предлагаемой системы с использованием алгоритмов БИНС в автономном режиме.

На рисунке 2 показаны точки, характеризующие истинное и рассчитанное значения местоположения объекта. Точки 0 и 6 соответствуют началам и концам траекторий, точки 1-5 – промежуточным пунктам маршрута. Стрелками указано направление движения.

По результатам моделирования была подтверждена работоспособность предложенных навигационных алгоритмов. Однако, как видно из рисунка, на момент окончания испытаний, т.е. через 67 мин с начала работы, погрешность определения координат превышает километр. Причина накопления такой большой погрешности связана с тем, что рассматривался режим работы БИНС без использования внешних средств коррекции. Продолжением этой работы является разработка алгоритмов коррекции БИНС на основе комплексной обработки информации.

Заключение. В ходе опытно-конструкторских работ разработано программно-алгоритмическое обеспечение АНПА с целью решения задачи навигации и управления движением. Синтезированные алгоритмы применены к математической модели аппарата. По результатам моделирования первого этапа алгоритмы показали свою принципиальную работоспособность.

В дальнейшем планируются испытания макета АНПА с целью уточнения параметров математической модели и повышение точности БИНС, а также отработка траекторного управления в реальных условиях.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ №19-08-01223-а

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бахарев С.А., Карасев В.В., Карасев А.В.** Использование автономных необитаемых подводных аппаратов в процессе изучения мирового океана. // Научные труды Дальрыбвтуза, 2012, С. 1-4.
2. **Агеев М.Д., Киселев Ю.В., Матвиенко Ю.В.** Автономные подводные роботы. М.: Наука, 2005, С. 8-44.
3. **Помыкаев И.И., Селезнев В.П., Дмитроченко Л.А.** Навигационные приборы и системы. М.: Машиностроение, 1983, С. 226-329.
4. **Лукомский Ю.А., Чугунов В.С.** Системы управления морскими подвижными объектами. Л: Судостроение, 1988. С. 43-83.
5. **Грумондз В.Т., Половинкин В.В., Яковлев Г.А.** Теория движения двусредных аппаратов: математические модели и методы исследования. М.: Вузовская книга, 2012. С. 31-38.
6. **NovAtel** Span SE user manual. OM-20000124 Rev 9.

A.V.Savkin, L.A.Kolganov, E.L.Chekhov *(*Moscow Aviation Institute (National Research University). **Development of a navigation and motion control software solution for autonomous unmanned underwater vehicle.**

Abstract. Work is dedicated to mid-term results and achievements in development of a software navigation and motion control solution for autonomous unmanned underwater vehicle. Approach to software development and internal hardware structure are presented.

УДК 629.13.014.57

Н.Е. ЧЕЧУЛИНА
(АО «Концерн «Гранит-Электрон», Санкт-Петербург)

АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНЕГО ВОЗМУЩЕНИЯ

Предлагается алгоритм оценивания скорости и направления ветра, использующий измерения воздушной скорости беспилотного летательного аппарата и аэродинамического угла атаки, которые выполняются системой воздушных сигналов. Работоспособность метода подтверждается моделированием на стенде алгоритмического обеспечения, учитывающем уравнения движения с учётом ветра, полное описание атмосферы, аэродинамических и массо-центровочных инерционных характеристик беспилотного летательного аппарата.

Введение. Информация о скорости ветра используется при решении многих задач на борту летательных аппаратов, поэтому точность данных о скорости ветра имеет существенное самостоятельное значение. В настоящее время ведётся разработка ряда перспективных законов управления, направленных на повышение быстродействия и точности систем приведения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в заданную точку, для которых требуются параметры ветрового возмущения. Предлагается способ получения оценки скорости ветра, использующий информацию от системы воздушных сигналов (СВС) [1, 2]. В отличие от способов-прототипов, например [3], он не предполагает установку на борту сложного, громоздкого оборудования, состоящего из множества датчиков и систем, образующих комплексную измерительную систему. На многих БПЛА, в силу конструктивных особенностей, установка подобных систем просто невозможна.

В настоящей работе рассматривается проблема оценивания скорости и направления ветра на борту БПЛА в процессе полёта. Для оценивания требуются измерения истинной воздушной скорости и аэродинамического угла атаки БПЛА, выполняемые СВС, и измерения скорости и угла тангажа БПЛА, выполняемые инерциальной навигационной системой (ИНС) [4].

Предлагаемый алгоритм даёт оценки составляющих вектора скорости ветра на земную систему координат и позволяет определить угол и наклон ветра.

Описание алгоритма. Уравнения проекций вектора скорости ветра на продольную плоскость в земной нормальной системе координат $O_0X_gY_gZ_g$ имеют вид:

$$\begin{aligned} \overline{W}_x &= V_k\cos(\alpha_k-\vartheta) - V\cos(\alpha-\vartheta), \\ \overline{W}_y &= V\sin(\alpha-\vartheta) - V_k\sin(\alpha_k-\vartheta), \\ \overline{W} &= \sqrt{\overline{W}_x^2+\overline{W}_y^2}, \end{aligned} \qquad (1)$$

где: V_k – скорость полёта относительно Земли, V – скорость полёта относительно воздушной среды, α – угол атаки (угол между продольной осью БПЛА и проекцией скорости $\vec{V}$ относительно воздушной среды на плоскость OX_1Y_1 связанной системы координат), α_k – угол атаки с учётом возмущения (угол между продольной осью БПЛА и проекцией скорости $\overrightarrow{V_k}$ на плоскость OX_1Y_1 связанной системы координат), ϑ – угол тангажа, $\overline{W}_x, \overline{W}_y$ – оценки составляющих вектора скорости ветра, $\overline{W}$ – полное значение вектора скорости [5]. Соотношение указанных величин поясняется на рис.1.

В рассматриваемом алгоритме предполагается, что измерению доступны переменные V, α, V_k, ϑ. Источником поступления сигналов V, α является СВС, измерения V_k, ϑ поступают из алгоритмов ИНС. Угол атаки α_k может быть получен расчётным путём из соотношения:

$$\alpha_k = \vartheta - \arcsin(\dot{H}/V_k), \qquad (2)$$

где: H_k – высота, поступающая из алгоритмов комплексирования.

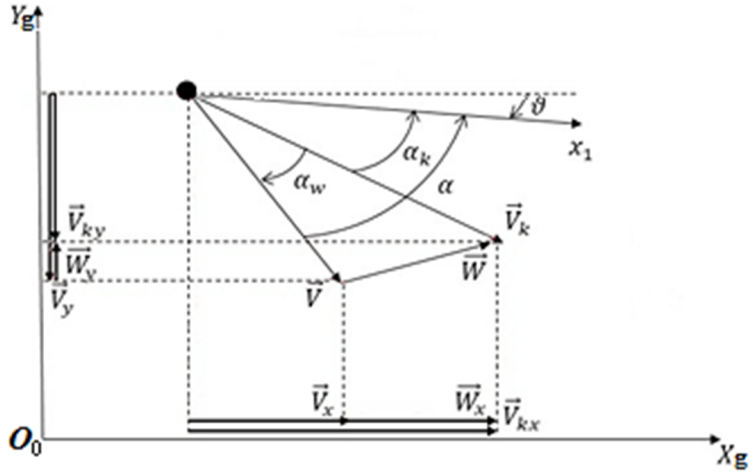


Рис.1. Соотношение используемых величин

Моделирование. Для проверки алгоритма было проведено моделирование на стенде алгоритмического обеспечения одного из современных изделий разработки АО "Концерн "Гранит-Электрон". Стенд содержит систему нелинейных дифференциальных уравнений динамики ЛА, полное описание аэродинамических и массо-центровочных инерционных характеристик изделия, а также рулевых трактов, двигательной установки и бортовых измерительных систем.

Задача решалась в продольной плоскости. Предполагалось, что измерительные системы работают идеально и не вносят погрешностей в выдаваемые величины.

Модель ветра имеет вид:

$$W_{xg} = W\cos\theta_w\cos K_w + W\sin\theta_w,$$
$$W_{yg} = -W\cos\theta_w\cos K_w + W\sin\theta_w, \qquad (3)$$

где: W_{xg}, W_{yg} – значения проекций вектора скорости ветра на земную систему координат; W – значение скорости ветра; θ_w – наклон ветра; K_w – угол ветра. Углы ориентации вектора скорости ветра показаны на рис.2.

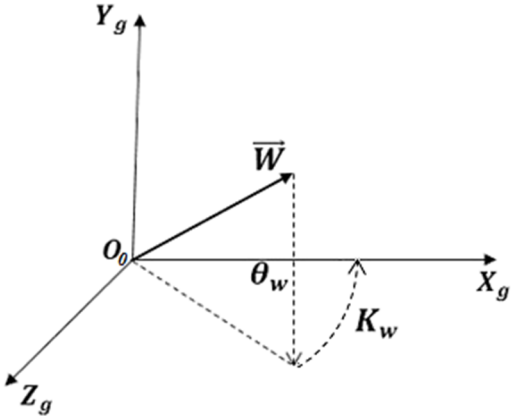


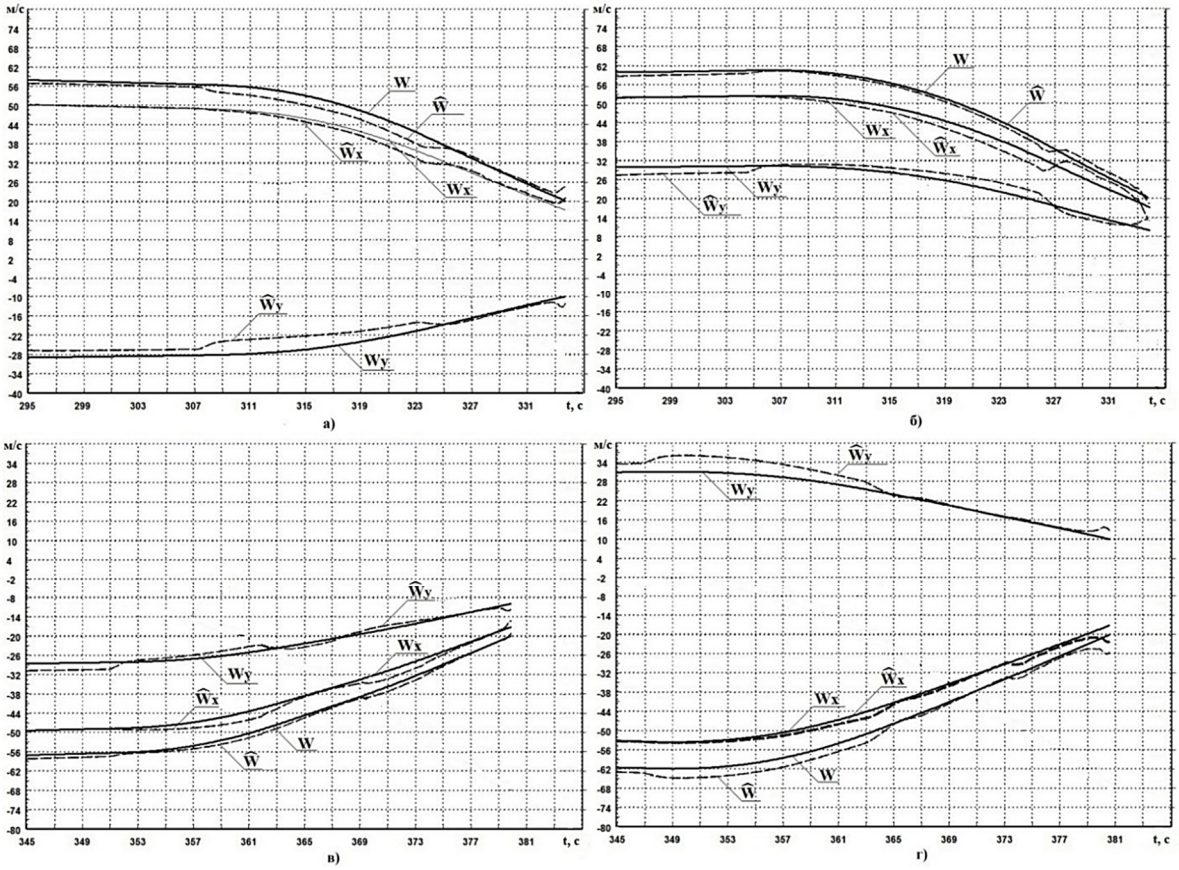
Рис. 2. Ориентация вектора скорости ветра в земной системе отсчёта

При проведении моделирования были рассмотрены различные варианты формирования «модельного» ветрового возмущения, в которых варьировались угол и наклон вектора скорости ветра. Изменение величины скорости ветра было задано в виде функции, зависящей от высоты.

Результаты моделирования представлены на рис.3, где сплошным линиям соответствуют «модельные» значения величин вектора скорости ветра W и его проекций W_x, W_y, а пунктирным – величины полученных оценок $\overline{W},\overline{W}_x,\overline{W}_y$ соответственно. Анализ показал, что на всём

протяжении движения полученные величины оценок приближаются к «модельным» с заданной точностью.

Заключение. Разработан алгоритм оценивания параметров ветрового возмущения, использующий измерения, выполняемые СВС. Результаты моделирования подтверждают работоспособность предложенного метода. Это позволяет использовать оценки скорости ветра при формировании управляющего сигнала, выдаваемого на органы управления изделия, реализующего метод приведения в выбранную точку с заданным вектором состояния.



$а) K_w = 0°, \theta_w = -30°;\ б) K_w = 0°, \theta_w = 30°;\ в) K_w = 180°, \theta_w = -30°;\ г) K_w = 180°, \theta_w = 30°$

Рис.3. Сравнение "модельных" параметров и их оценок

ЛИТЕРАТУРА

1. **Davis M. C., Pahle J. W., White J. T., Marshall L. A., Mashburn M. J., Franks R.** Development of a Flush Airdata Sensing System on a Sharp-Nosed Vehicle for Flight at Mach 3 to 8, NASA/TM2000209017, May 2000
2. **Gavrilovic N., Bronz M., Moschetta J-M., Bénard E.** Angle of attack measurements through surface pressure distribution. International Journal of Micro Air Vehicles, 2018, 10 (3), pp.273-284.
3. Патент РФ №2461801, 20.09.2011
4. **Браславский Д.А., Логунов С.С., Пельпор Д.С.** Авиационные приборы и автоматы. М.: Машиностроение, 1978. 432 с.
5. ГОСТ 20058-80 Динамика летательных аппаратов в атмосфере. Термины, определения и обозначения. М.: Издательство стандартов, −1981. 54 с.

N.E. Chechulina (JSC "Concern "Granit-Electron", St. Petersburg). **Algorithm of estimation of parameters external disturbance**

Abstract. An algorithm is proposed for estimating wind speed and direction using measurements of the unmanned aerial vehicle (UAV) airspeed and aerodynamic angle of attack, which are performed by an air data system. The efficiency of the method is confirmed by modeling on the bench of algorithmic support containing the equations of motion of the UAV taking into account the wind, a complete description of the atmosphere, aerodynamic and mass centering inertial characteristics.

УДК 623.746.4-519

Ю.В. СУХАРЕВ, В.Г. НИКИТИН
(Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения)

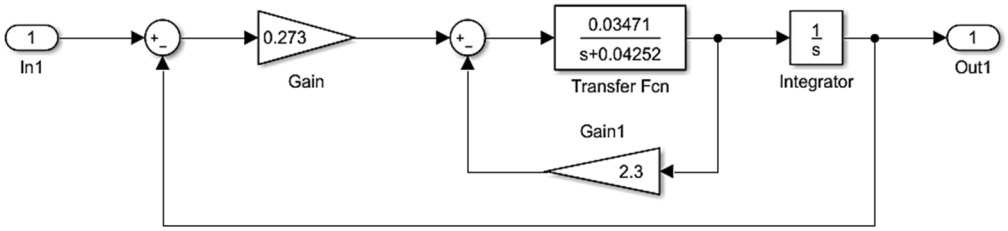
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ НА КАЧЕСТВО УПРАВЛЕНИЯ МАЛОГАБАРИТНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Путем моделирования исследовано влияние параметров акселерометров на качество управления малогабаритными беспилотными летательными аппаратами.

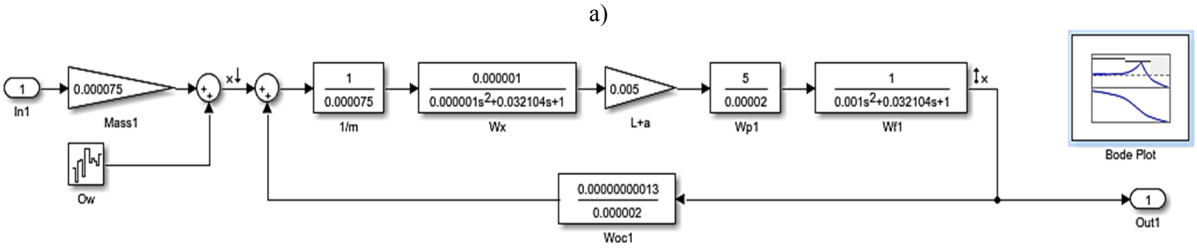
Введение. Влияние параметров датчиков на качество управления – очень важный аспект в исследовании систем навигации и ориентации. Целью настоящей работы является исследования влияния параметров акселерометров на качество управления малогабаритными беспилотными летательными аппаратами (МБПЛА). Критерием качества управления являлась устойчивость к ошибкам измерений датчиков и величина перерегулирования переходного процесса.

В работе были рассмотрены два акселерометра с компенсационным преобразованием: отечественный АТ-1104 [1] и зарубежный ADXL-325 [2]. АТ-1104 имеет постоянную времени τ = 0,1 с и минимальный диапазон измерений ±1g [4], а ADXL-325 постоянную времени τ = 0,1 с, и минимальный диапазонам измерений ±2g [3]. Влияние параметров акселерометров исследовалось при помощи моделирования математических моделей датчиков в виде передаточных функций в пакете MatLAB/Simulink. Исследование проводилось на базе МБПЛА Инспектор-601, имеющем взлетный вес в 120 кг [5].

Результаты моделирования. При выполнении моделирования использовались передаточные функции датчиков (Рисунок 1), а также передаточные функции канала управления (крен, тангаж, рысканье) Инспектора-601 (Рисунок 2). Помимо идеального случая был рассмотрен приближенный к реальному путем введения ошибки в виде белого шума с интенсивностью 0.0025 Гц.



а)



б)

Рис. 1. Схема моделирования а) ADXL-325 б) АТ-1104

По каналу крена, при использовании акселерометра АТ-1104, были получены следующие результаты.

Исходя из графиков переходного процесса (рис. 3 и 4) можно сделать вывод, что система имеет высокое быстродействие и помехозащищенность. Длительность перехода в устоявшийся режим составляет приблизительно 2 минуты. С учетом помехи длительность переходного процесса не увеличилась, однако его форма стала хуже.

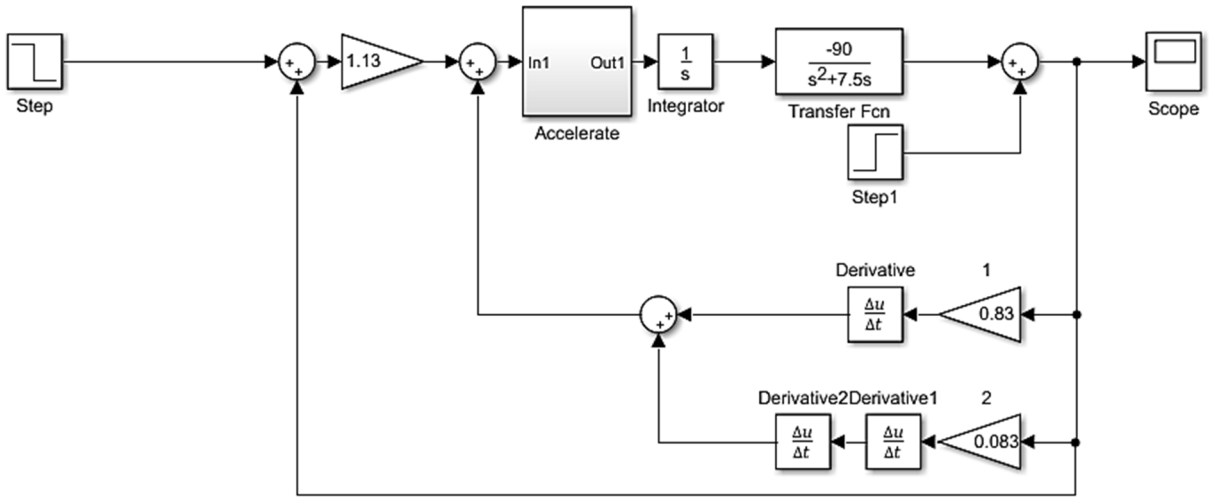


Рис. 2. Схема моделирования канала крена

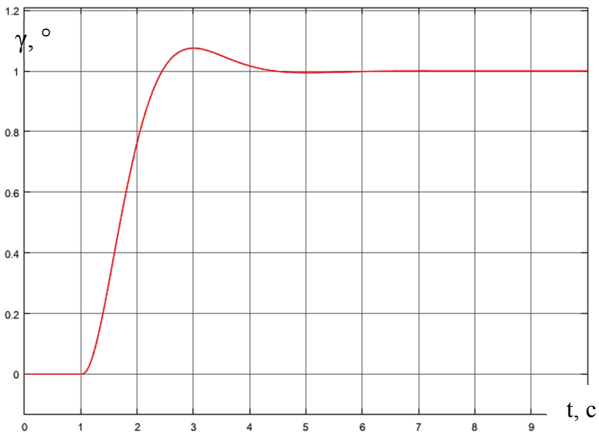


Рис. 3. График переходного процесса без учета ошибок (идеальный случай) АТ-1104

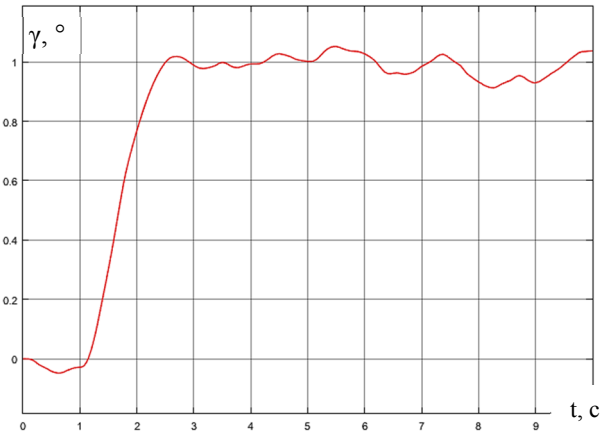


Рис. 4 График переходного процесса с учетом ошибок (приближенный к реальному случай) АТ-1104

Далее приведены результаты моделирования для акселерометра ADXL-325. Исходя из графиков переходного процесса (Рисунок 5 и 6) можно сделать вывод, что система имеет высокое быстродействие (длительность перехода в устоявшийся режим составляет приблизительно 1,5 с, что быстрее чем у отечественного аналога). После перехода в устоявшийся режим (значение угла 1°) – процесс продолжает оставаться в зоне ±10%, что свидетельствует о малой величине запаздывания не смотря на наличие ошибки (длительность перехода в устоявшийся режим приблизительно составляет 2 с).

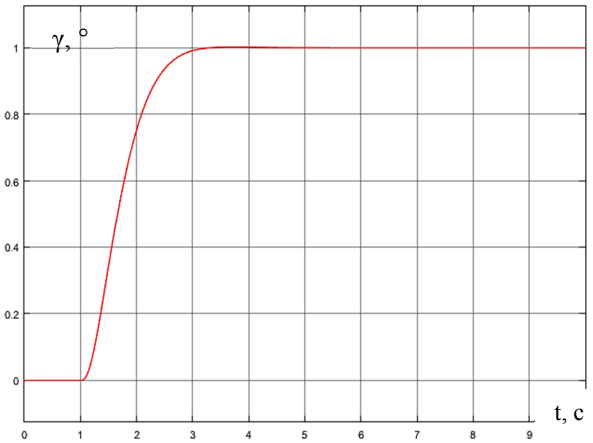


Рис. 5. График переходного процесса без учета ошибок (идеальный случай) ADXL-325

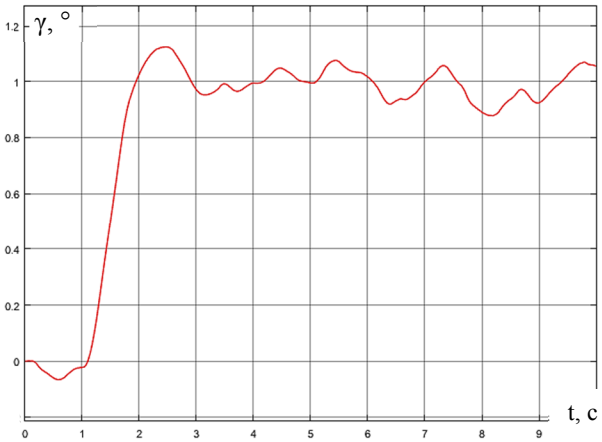


Рис. 6. График переходного процесса с учетом ошибок (приближенный к реальному случай) ADXL-325

Система автоматического управления с акселерометром ADXL-325, исходя из графиков переходных процессов, является более точной, чем с акселерометром АТ-1104. Величина перерегулирования (первого выброса) у зарубежного датчика стремится к 0 (рис. 5), тогда как у отечественного к 0,7 (рис. 3). Также видно, что оба акселерометра имеют высокую устойчивость к ошибкам (робастность). Влияние ошибки на качество переходного процесса ухудшает его, но оказывает незначительное влияние. Время перехода в устоявшийся режим увеличивается не более чем на 10%, а величина перерегулирования не изменяется более чем на 5% по сравнению с идеальным случаем.

Заключение. Одним из основных показателей влияния параметров акселерометров на качество управления МБПЛА является устойчивость к ошибкам измерений. Как видно из результатов моделирования ошибки измерений акселерометров значительно ухудшает форму переходного процесса, но не его характеристики. Время перехода в установившейся режим составляет порядка 2 секунд, величина перерегулирования возрастает примерно на 10% от идеального случая.

ЛИТЕРАТУРА

1. **В.Я.Распопов** Микромеханические Приборы / учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2007. - 400с., ил.
2. **Рэндал У. Биард, Тимоти У. МакЛейн** Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика; Litres, 2017. -350с., ил.
3. **DATASHEET ADXL-325 https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf**
4. **Электронный ресурс: http://pribory-si.ru/catalog/4401/5004/**
5. **Электронный ресурс:** http://aerocon.ru/inspector/

Yu.V. Sukharev, V.G. Nikitin (St. Petersburg State University Of Aerocosmic Instrumentation). **Research Of The Impact Of Parameters Of Accelerometers On The Quality Of Management Of Small-Sized Unmanned Aircraft**

Abstract. Investigated The Effect Of Accelerometer Parameters On The Quality Of Control Of Small-Sized Unmanned Aerial Vehicles (Suav) Using Sensor And Control Systems Modeling.

УДК 681.51

Т.А. ЛУЧКИНА
(АО «Уральский завод гражданской авиации», ОКБ ПАК, г. Казань)

АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ АВТОНОМНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

Сформулированы алгоритмы, обеспечивающие повышение точности автономного определения углов ориентации с применением триады датчиков угловой скорости, триады акселерометров, триады магнитометров и датчиков воздушных параметров. Приведены результаты моделирования.

Введение. В настоящее время беспилотные подвижные объекты имеют широкое применение в различных технических областях. Требования по обеспечению автономного функционирования, и в частности определения ориентации (без корректирующего сигнала спутниковой радионавигационной системы) обуславливают необходимость применения датчиков различного принципа функционирования. Традиционно при построении подобных информационно-измерительных систем применяется принцип информационной избыточности, и используются алгоритмы комплексирования оценок, имеющих разнородные доминирующие погрешности [1]. Однако присущие датчикам нестабильности инструментальных погрешностей, а также методические погрешности алгоритмов автономных оценок углов ориентации, смещают результат комплексирования и приводят к ограничениям автономного режима функционирования информационно-измерительных систем.

Предлагаемый доклад посвящен алгоритмам коррекции методических погрешностей и компенсации нестационарных инструментальных погрешностей датчиков, позволяющих повысить точность результата комплексирования оценок информационно-измерительной системы, построенной на базе триады датчиков угловых скоростей (ТД), триады акселерометров (ТА), триады магнитометров (ТМ) и датчиков воздушных параметров.

Алгоритмы повышения точности автономной оценки углов ориентации. Для повышения точности автономной оценки углов ориентации объекта в условиях информационной избыточности, используя сигналы ТД, ТА, ТМ и датчиков воздушных параметров, разработаны следующие алгоритмы, которые можно объединить в три группы (рис. 1).

1) Алгоритмы калибровки датчиков, обеспечивающие оценку и компенсацию непостоянных во времени аддитивных инструментальных погрешностей в режиме движения объекта, а именно:

- алгоритм калибровки ТД, основанный на применении расширенного дискретного фильтра Калмана и использовании линеаризованной модели движения объекта, обеспечивающий компенсацию систематической составляющей и фильтрацию случайных составляющих (типа «белый» и «цветной» шум) инструментальной погрешности ТД [2];
- алгоритм калибровки ТМ, основанный на применении модернизированного алгоритма Tamcal [3], обеспечивающий компенсацию вариаций систематической составляющей инструментальной погрешности ТМ, вызванной изменением магнитной обстановки [4];
- алгоритм оценки температурной составляющей смещения нуля сигнала ТД, ТА и ТМ, основанный на применении метода наименьших квадратов, обеспечивающий компенсацию вызванных изменением температуры вариаций погрешности датчиков [5].

2) Алгоритмы определения оценок с коррекцией методических погрешностей, включающие:

- алгоритм определения оценки углов ориентации путем интегрирования сигналов ТД с коррекцией методической ошибки, вызванной влиянием вектора переносной угловой скорости (от скорости вращения Земли и относительной скорости движения объекта), за счет использования информации от датчиков воздушных параметров;
- алгоритм определения оценки углов наклона по сигналам ТА, основанный на соотношениях проекций на связанную с объектом систему координат вектора ускорения гра-

Научный руководитель к.т.н., доцент Потапов А.А.

витационного поля Земли, с коррекцией методической ошибки, вызванной влиянием вектора абсолютного линейного ускорения объекта.

3) Алгоритм комплексирования оценок. Информационная избыточность и разнотипность доминирующих погрешностей в результатах оценок углов ориентации (доминирование низкочастотных погрешностей в оценках, определяемых по показаниям ТД, и высокочастотных погрешностей в оценках, определяемых по показаниям ТА и ТМ) обуславливает возможность применения в качестве алгоритма классическую схему комплексирования двух позиционных сигналов [6], модернизированную в части:

- введения ограничения коррекции на время смены режимов движения объекта, обеспечивающее устранение влияния «выбросов» оценок углов наклона по ТА и угла курса по ТМ на результирующие автономные оценки углов ориентации;
- введения компенсации остаточного (несписанного) дрейфа оценок углов ориентации по ТД.

Результаты математического моделирования. Численная оценка эффективности предложенных алгоритмов выполнена с использованием разработанной имитационной модели, включающей модель динамики движения беспилотного летательного аппарата и учитывающей значения инструментальных погрешностей, указанные в Таблице 1.

Таблица 1

Значения инструментальных погрешностей датчиков

ТД	ТА	ТМ (с учетом параметров девиации)	Датчики воздушных параметров
Систематические аддитивные инструментальные погрешности			
≈ 0,2 °/с	≈ 5 mg	≈ 10 мкТл	-
Детерминированные мультипликативные инструментальные погрешности			
-	≈ 1%	≈ 30%	-
Температурные аддитивные инструментальные погрешности			
≈ 0,01 °/с /°С	-	-	-
Случайные аддитивные инструментальные погрешности			
Составляющая типа «белый» шум: ≈ 90°/ч (σ); Составляющая типа «цветной» шум: ≈ 0.05°/с (σ), время корреляции ≈ 300 с	Составляющая типа «белый» шум: 1.5 mg (σ)	Составляющая типа «белый» шум: 0.3 мкТл (σ)	Составляющая типа «белый» шум: канал статического и полного давлений 0.13 кПа (σ); канал температуры индикаторной 0.5 °С (σ)

Оценка результатов математического моделирования участка полета беспилотного летательного аппарата, содержащего маневры в продольном и боковом каналах (Рис. 1), показала, что разработанные алгоритмы обеспечивают повышение точности автономных оценок углов ориентации: значения абсолютных погрешностей автономных оценок углов ориентации до применения и после применения разработанных алгоритмов указаны в таблице 2.

Таблица 2

Погрешности автономных оценок углов ориентации, градус

	До применения разработанных алгоритмов	После применения разработанных алгоритмов
Угол тангажа:		
дрейф, °/ч	~300	отсутствует
смещение оценки, °		-0,041
дисперсия, °, σ	~7	0,115
Угол крена:		
дрейф, °/ч	~300	отсутствует
смещение оценки, °		0,056
дисперсия,°, σ	~25	0,115
Угол курса:		
дрейф, °/ч	~600	отсутствует
смещение оценки, °		0,158
дисперсия, °, σ	~31	0,0551

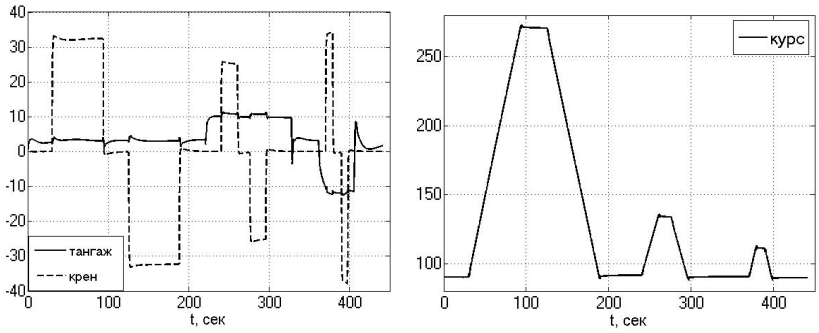


Рис. 1. Моделируемые истинные значения углов ориентации, градус

Заключение. Разработанные алгоритмы обеспечивают повышение точности автономного функционирования информационно-измерительной системы определения углов ориентации, построенной на базе ТД, ТА, ТМ и датчиков воздушных параметров, что подтверждается результатами моделирования. В качестве дальнейшего направления исследования планируется решение задачи повышения точности автономной оценки навигационных параметров объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Матвеев В.В.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов; под общ. ред. В.Я. Распопова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
2. **Лучкина Т.А.** Повышение точности работы микромеханических датчиков угловых скоростей с низкими эксплуатационными характеристиками / Т.А. Лучкина, А.А. Потапов // Авиакосмическое приборостроение. 2018. №2. С. 18-25.
3. **Davenport P.B.** In-Flight Determination of Spacecraft Magnetic Bias Independent of Attitude / [P.B. Davenport and others] // GSFC FDD Flight Mechanics/Estimation Theory Symposium 1988, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Mayland, May 1988 - №89-15950. pp. 326-343.
4. **Лучкина Т.А.** Алгоритмы предстартовой калибровки и автономной коррекции оценки аддитивных составляющих погрешностей триады магнитометров при движении подвижного объекта / Т.А. Лучкина, А.А. Потапов // Датчики и системы. 2019. №2. С. 3-9.
5. **Колеватов А.П.** Волоконно-оптический гироскоп бесплатформенных инерциальных систем навигационного класса. Разработка, термокомпенсация, испытания / [А.П. Колеватов и др.] // Гироскопия и навигация. 2010. №3 (70). С. 49-60.
6. **Воробьев В.Г.** Авиационные приборы, информационно-измерительные системы и комплексы. Учебник для вузов / В.Г. Воробьев, В.В. Глухов, И.К. Кадышев; Под ред. В.Г. Воробьева. М.: Транспорт, 1992. 399 с.

T.A. Luchkina (Joint-Stock Company “Ural works of civil aviation”) **An autonomous attitude estimation accuracy improvement algorithms of information and measuring system autonomous running-mode**

An algorithm of inconsistent instrumental errors compensation, particular estimation methodical errors compensation, and algorithm of particular attitude estimations interconnecting is introduced. The developed algorithms are provides improvement of autonomous attitude estimation accuracy by using triad of gyroscopes, triad of accelerometers, triad of magnetometers and air parameters sensors. A modeling result is introduced.

УДК 629.7

Д.Ю. ЛИВШИЦ, И.К. КУЗЬМЕНКО, А.А. СЕРАНОВА
(АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики», Саратов)

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПОСАДКИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Выполнена оценка надежности лазерной системы автоматической посадки для беспилотных летательных аппаратов.

Введение. Заход на посадку и посадка беспилотных летательных аппаратов, особенно среднего и тяжелого класса (массой от 400 кг) – наиболее ответственные этапы полета, которые осуществляются, как правило, с использованием имеющихся на земле средств обеспечения высокоточной навигации [1]. В качестве такого средства может быть использована система автоматической посадки на основе лазерных маяков [2].

Расчет показателей надежности на этапе проектирования является обязательной задачей, решаемой при разработке каждого изделия. Анализ показателей надежности позволяет избежать ошибок в построении системы, обнаружить «узкие» места, приводящие к повышенным затратам на обслуживание, повысить эффективность эксплуатации, выбрать оптимальные сроки проведения ремонта и технического обслуживания, и т.д.

В процессе разработки системы посадки предполагается включить в ее состав четыре наземных лазерных маяка. При использовании в составе каждого маяка угломерных датчиков и подсистем измерения дальности, система сможет функционировать с использованием всего одного маяка. Большее число маяков обеспечивает большую вероятность попадания луча в бортовой приемник-отражатель [3,4], а также снижает требования к точности изготовления механической части маяков. Кроме того, большее число маяков должно повысить надежность системы посадки с деградацией точностных характеристик в случае отказов. Целью настоящей работы является подтверждение реализуемости предполагаемой конфигурации системы путем проведения оценочного расчета надежности.

Расчет показателей надежности. Обеспечение высокой степени надежности системы посадки является одной из первостепенных задач, так как это напрямую связано с безопасностью полетов, эффективностью использования и материальными затратами. Для обеспечения требуемой надежности на этапе проектирования применяется метод количественной оценки безотказности системы по известным значениям безотказности элементов [5]. При этом самым удобным является применение метода структурных схем [6], то есть реальная система отображается структурной схемой событий безотказной работы элементов, состоящей из последовательно и параллельно соединенных звеньев (рис.1). Для оценки показателей надежности предлагаемой системы автоматической посадки составляется схема расчета надежности на основе анализа состава подсистем и выполняемых ими функций с учетом принятых

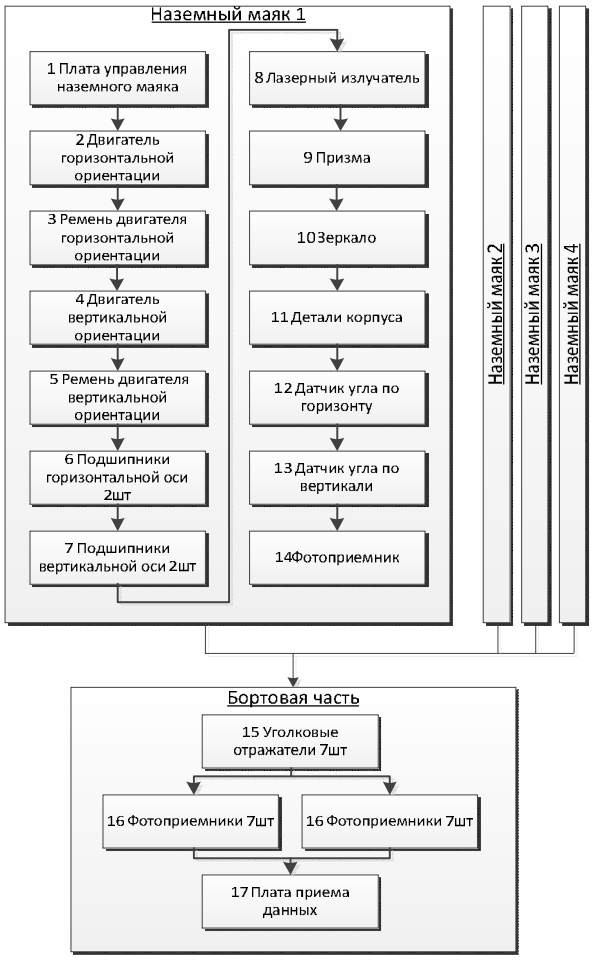


Рис. 1. Структурная схема системы посадки для расчета надежности

критериев отказа элементов, входящих в подсистемы. В качестве элемента принимается функционально законченный объект из состава каждой составной части наземной и бортовой части системы автоматической посадки, дальнейшая детализация которой не является необходимой в пределах проводимого расчета. Кроме того, каждый используемый элемент принимается в расчет как сборочная единица со своими показателями надежности, рассчитанными предприятиями-изготовителями и указанными в эксплуатационной документации.

Показатели надежности оцениваются с учетом указанных допущений: каждый элемент может находиться в состоянии работоспособность, либо отказ. Отказы элементов независимые события.

Вспомогательные элементы оборудования, устройства отображения, приборы контроля и т.п., не влияющие на работу элементов системы автоматической посадки в основных рабочих режимах, в расчет параметров надежности не входят.

Таблица 1

Показатели надежности элементов системы согласно структурной схеме

№ по Рис.1	Наименование элемента	Кол-во	Средняя интенсивность отказов, $\lambda_i x 10^6$	
			На один элемент	Суммарная
	Система посадки	1		29,4
	Наземный маяк	4		0,0000001
1.	Плата управления наземного маяка	1	26,3	26,3
2.	Двигатель горизонтальной ориентации	1	2,84	2,84
3.	Ремень двигателя горизонтальной ориентации	1	83,3	83,3
4.	Двигатель вертикальной ориентации	1	2,84	2,84
5.	Ремень двигателя вертикальной ориентации	1	75,1	75,1
6.	Подшипник горизонтальной оси	2	4	8
7.	Подшипник вертикальной оси	2	2	4
8.	Лазерный излучатель	1	15,8	15,8
9.	Призма	1	0,2	0,2
10.	Зеркало	1	0,8	0,8
11.	Детали корпуса	1	0,1	0,1
12.	Датчик угла по горизонту	1	1,13	1,13
13.	Датчик угла по вертикали	1	1,13	1,13
14.	Фотоприемник	1	1,8	1,8
	Бортовая часть			
15.	Уголковый отражатель	7	0,8	5,6
16.	Фотоприемник	14	1,9	0,0000113
17.	Плата приема данных	1	23,8	23,8

Наработка на отказ ($T_{посл}$) при последовательном соединении элементов в структурной схеме системы рассчитывается согласно формуле:

$$T_{посл} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i}, \quad (1)$$

где λ_i – интенсивность отказов i-го элемента структурной схемы системы, n – количество элементов.

Наработка на отказ ($T_{пар}$) при параллельном соединении элементов в структурной схеме системы рассчитывается согласно формуле:

$$T_{пар} = \frac{1}{\lambda_э} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{i}, \quad (2)$$

где $\lambda_э$ – интенсивность отказов элемента структурной схемы системы в параллельном соединении, n – количество элементов.

Исходя из данных, приведенных на рис.1 и в таблице 1, а также формул (1) и (2), можно произвести оценку надежности предлагаемой системы автоматической посадки [5, 6]. В результате получено значение наработки на отказ в 34000 часов.

Заключение. В результате проведения оценочного расчета надежности системы автоматической посадки показано, что общая надежность снижается по сравнению с системами с меньшим количеством элементов. Но при использовании резервирования элементов или составных частей, имеющих наиболее низкие показатели надежности, а также функционально резервируемых элементов, достигается повышение надежности системы. В данном случае оценочный расчет показал, что предлагаемая система автоматической посадки при использовании 4-х наземных маяков обеспечивает 34000 часов наработки на отказ, что является достаточным показателем для эксплуатации [7].

Работа проводилась при поддержке гранта УМНИК 2017

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абакумов А.В.** Особенности конструирования пилотажно-навигационных комплексов для малых беспилотных летательных аппаратов различного типа / Д.Е. Гуцевич, Р.В. Ермаков, Д.Ю. Лившиц, С.Н. Ромадин, А.А. Серанова, И.В. Сергушов, Е.Н. Скрипаль // XXIV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2017. С. 142–152.
2. **Абакумов А.В.** Система автоматической посадки беспилотных летательных аппаратов с использованием лазерных излучателей / А.В. Абакумов, И.К. Кузьменко, Д.Ю. Лившиц, И.В. Сергушов, В.Н. Слонов // М 33 Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-29 [текст]: сб. трудов XXIX Междунар. науч. конф.: в 12 т. Т.8. / под общ. ред. А.А. Большакова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т; Санкт-Петербург: СПбГТИ(ТУ), СПбПУ, СПИИРАН; Самара: Самарск. гос. техн. ун-т, 2016. С. 130-138.
3. **Раймонд М.** Лазерное дистанционное зондирование / Пер. с англ. И.Г. Городецкого, под ред. А.Б. Карасева. М.: Мир, 1987. 550 с.
4. **Козинцев В.И.** Основы импульсной лазерной локации / Белов М.Л., Орлов В.М., Городничев В.А., Стрелков Б.В. // 2-е изд., доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 572 с
5. Надежность электрорадиоизделий : Справочник // М.: 22 ЦНИИИ МО РФ, 2006. 641с.
6. **Рябинин, И.А.** Надежность и безопасность структурно-сложных систем. СПб: Политехника, 2000. 248с.:ил.
7. ГОСТ Р 51747-2001 Система инструментального захода летательных аппаратов на посадку. Основные параметры и методы измерений.

D.Yu. Livshits, I.K. Kuzmenko, A.A. Seranova *(JSC DBIA).* **Evaluation of the reliability of the landing laser system for UAV**

Abstract. The reliability of the laser automated landing system for UAV has been evaluated.

▪ БОРТОВЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ▪

УДК 579.61

В.А. МАСТАЛИЕВА
(Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИБОРОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ МИНИАТЮРНОЙ ЗАМКНУТОЙ БИОСИСТЕМОЙ

Рассматривается система контроля параметров замкнутой биологической системы для её стабильного функционирования длительное время. Приведены результаты компьютерного моделирования. Подтверждено, что рассматриваемая замкнутая экосистема может самоорганизовываться и поддерживать свое состояние длительный промежуток времени.

Введение. Замкнутая экологическая система все чаще воспринимается не только как средство для поддержания человеческой жизни во враждебной среде − в космосе − но в первую очередь как инструмент для экспериментального исследования проблем Земли с биосферой.

Важной задачей является “диагностика” нормального функционирования таких биосистем, ориентированная на выбор биохимических параметров в качестве индикаторов сбалансированного состояния биосистем [1].

Актуальность работ этого направления в полной мере относится к использованию экосистем в условиях космоса. Особая роль здесь принадлежит биосистемам фитопланктона (водорослям), которые в космосе могут стать источником возобновляемого кислорода и пищи.

Таким образом, основными направлениями исследований замкнутых экологических систем являются:

1) Комплексное изучение принципов функционирования замкнутых экосистем различной степени сложности;

2) Разработка научных основ создания экспериментальных замкнутых экосистем и их исследование как моделей биосферы Земли и искусственных биосфер для жизнеобеспечения человека [2];

3) Создание принципов и действующих моделей замкнутых экосистем, включая стационарное совершенствование регенерирующих звеньев, для длительного пребывания человека в экстремальных земных и космических условиях.

Доклад посвящён разработке методики биологического эксперимента, который предлагается провести на борту международной космической станции. Модель учитывает возможность адаптации организмов, населяющих экосистему, а также она дополнена механизмом адаптивной обратной связи, который корректирует структуру связей системы, пытаясь возвратить ее в стационарное состояние. И тем самым обеспечивает своевременную реакцию на устранение факторов, нарушающих устойчивость экосистемы.

Описание биосистемы. Исследуемая экосистема представляет собой герметичный стеклянный сосуд объемом 2 литра, в котором в соотношении 2/3 к 1/3 содержится вода и воздух. Основу экосистемы составляют водные растения – микроводоросли и фитопланктон (продуценты). В процессе фотосинтеза микроводорослями на свету выделяется кислород, происходит поглощение диоксида углерода и создание запасов органических веществ, необходимых для питания живыми организмами – консументами (креветками, рыбками).

Такая миниатюрная экосистема позволяет увидеть закономерности функционирования настоящих природных сообществ. Ее аналоги участвовали в экспериментах на борту американского “Шаттла” и Российской космической станции “Мир” [3].

Научный руководитель к.т.н., доцент Перлюк В.В.

Для оценки возможностей замкнутой экосистемы и с целью оптимизации управления ею построена математическая модель, опирающаяся на кинетические коэффициенты, полученные в экспериментальных исследованиях.

Разработка математической модели объекта исследования. Известно, что биосистема меняется в течение времени, это позволяет представить состояние системы, в виде движения фазовой точки по фазовой траектории с заданным начальным условием $X_0 = X(0)$ в начальный момент времени $t = 0$. При дискретном задании времени, фазовая траектория задаётся набором точек $\{X_0, X_1, X_2, ...\}$ в фазовом пространстве и часто называется орбитой. При непрерывном задании времени, состояние системы задаётся обыкновенными дифференциальными уравнениями.

Для задания динамики экосистемы и ее моделирования рекомендуется использовать систему дифференциальных уравнений, которая описывает трофические взаимодействия всех компонентов, а также помогает отслеживать устойчивость [4]:

$$\dot{X} = (-ay + (bMu + d)(1 - x / R) - c_1)x,$$
$$\dot{Y} = (ax - ez - c_2)y,$$
$$\dot{Z} = (ey - hu - c_3)z,$$
$$\dot{U} = (hz - bx - c_4)u,$$

где a – скорость потребления биомассы компонента 1 в результате взаимодействия с компонентом; e, h – удельные скорости потребления биомассы 2 и 3 компонентами с элементами 3 и 4 соответственно; b – удельная скорость потери биомассы компонентом; M – мультипликатор, который учитывается при увеличении биомассы первого компонента; d – скорость возрастания числового значения компонента.

Описанная выше модель была использована при разработке моделирующей компьютерной программы в среде LabVIEW (рис.1 и рис.2). Программа содержит датчики, которые отвечают за параметры системы: кислород, углекислый газ, освещённость и влажность. Данные поступают на управляющий компьютер, что позволяет определить текущее состояние системы, а также оценить тенденцию изменения ее состояния [5].

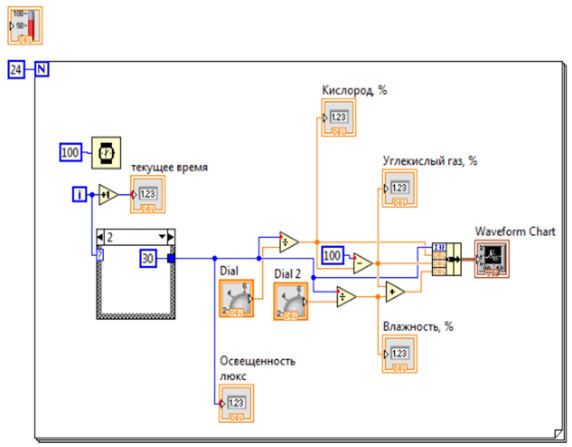


Рис. 1. Общая модель представления работы всей системы, обеспечивающая передачу показаний для контроля за стабильностью существования замкнутой экосистемы (Панель диаграмм в программе Labview)

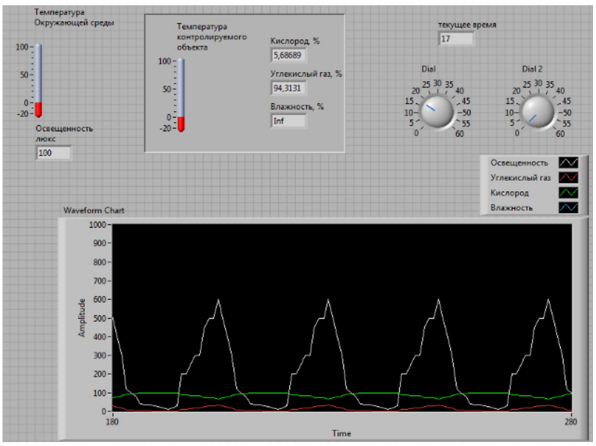


Рис.2. Панель управления с датчиками для подключённой экосистемы, для отслеживания и поддержания её стабильного функционирования и жизнеобеспечения

Для регулировки параметров необходима панель управления, через которую осуществляется передача изменений параметров и отслеживается общий уровень состояния системы. Пример панели управления приведён на рисунке 2.

Направления дальнейших исследований. Для улучшения действенности системы, необходимо расширение состава контролируемых параметров экосистемы. Также в качестве дальнейших планов стоит реализация автоматической системы стабилизации температуры объекта с помощью управляемых заслонок в теплоизоляционных отверстиях микроспутника.

Вывод. Рассмотренная модель даст возможность исследовать и оценивать текущую устойчивость конкретных экологических систем путем биологических наблюдений и математических вычислений скорости потребления биомассы, освещённости, температуры между уровнями трофической пирамиды, что позволит сделать вывод о необходимости стабильного существования и способах регулирования систем для обеспечения их бесперебойного устойчивого состояния. В практическом отношении подобные системы позволят обеспечить высокое качество жизни человека за пределами биосферы – в космосе, а также в экстремальных условиях полярных широт, пустынь, высокогорья или под водой.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Моделирование адаптивной самоорганизации экосистем** [Электронный ресурс]: науч. журн./ Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5 – режим доступа к журн.: https://science-education.ru/
2. **Жмудь В. А.** Моделирование замкнутых систем автоматического управления: учебное пособие для академического бакалавриата / В. А. Жмудь. 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательство Юрайт, 2018. 126 с.
3. **Нечитайло Галина Семеновна.** Биология в космосе : Исслед. на орбит. станциях / Г. С. Нечитайло, А. Л. Машинский; Пер. с рус. Н. Любимов. М. : Мир, Б. г. (1993). 503 с.
4. **Флоренсов А.Н.** Описание динамики экосистемы с помощью четырехкомпонентной математической модели// Вестник ТГУ, т.19, вып.5, 2014. 4 с.
5. **Перлюк М.Ф., Перлюк В.В**., Экологические аспекты оценки критериев устойчивости рационального использования морских биоценозов, Мурманск, МГТУ, 1997

V.A. Mastalieva (State University of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg). **Computer simulation of monitoring and control devices of a miniature closed biosystem**

Abstract. The system of control of parameters of the closed biological system for its stable functioning for a long time is considered. The results of computer simulation are presented. It is confirmed that the considered closed ecosystem can self-organize and maintain its state for a long period of time.

УДК 681.518.54

Е.В. ЛУКОЯНОВ, А.М. ГРУЗЛИКОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ПОСТРОЕНИЯ ТЕСТОВ ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Предлагается алгоритм построения тестов для распределенной вычислительной системы реального времени. Алгоритм использует сетединамическую модель системы и формирует тест для диагностирования нарушений в адресации обменов между программными модулями системы. Привидится описание инструментальной среды, автоматизирующей процедуру генерации тестовых воздействий и эталонных выходных последовательностей.

Введение. В настоящем докладе рассматривается проблема тестового диагностирования произвольной распределенной вычислительной системы (РВС) реального времени, представленной набором функционально связанных программных модулей. Для РВС разработка средств диагностирования (СД) является достаточно сложной проблемой из-за высокой размерности системы, параллельного характера вычислений и множественности причин возникновения нарушений. Источником нарушений могут быть не только отказы аппаратуры, но и допущенные разработчиками ошибки в организации вычислений и в используемых программах. С целью преодоления высокой сложности проблемы процесс разработки СД всегда декомпозируется с помощью иерархического подхода [1]. В этом случае множество компонентов системы в соответствии с отношением включения распределяется по уровням сложности так, что компоненты более высокого уровня представляются композицией компонентов более низкого уровня. Ниже рассматривается тестовое диагностирование самого верхнего уровня (высокоуровневое диагностирование), на котором РВС представляется композицией систем. Для описания РВС используется сетединамическая модель [2], которая встраивается в программное обеспечение системы и предназначена для тестового диагностирования нарушений в адресации обменов между программными модулями системы. Рассматриваемая модель относится к классу дискретно-событийных [4], широко применяемых при анализе и тестировании сложных систем [5].

На практике количество программных модулей систем рассматриваемого класса может достигать сотен единиц, поэтому в докладе ставятся задачи об автоматизации процедуры синтеза модели, построения тестовых воздействий и эталонных последовательностей согласно модели. В работе приводится описание инструментальных средств для решения этих задач.

Алгоритм построения теста для сетединамической модели. Алгоритм построения сетединамической модели приведен в [3]. Он состоит из двух этапов и справедлив для любой РВС реального времени. Результирующая модель системы имеет вид линейной дискретной периодически нестационарной динамической системы. В терминах этой модели класс рассматриваемых нарушений определяется как всевозможные искажения матриц этой модели.

Периодически нестационарная динамическая система имеет вид

$$x_i(t+1) = F_i^c(j)\,x_i(t) + G_i^c(j)\,u_i(t), \quad y_i(t) = H_i^c(j)\,x(t) \quad j = \overline{1, L+1}, \qquad (1)$$

где $x(t)$ – вектор состояния, $y(t)$ – вектор выхода, $u(t)$ – входное воздействие (тест), $F^c(j)$, $G^c(j)$, $H^c(j)$ – матрицы динамики входа и выхода, элементы которой зависят от сеанса обмена j. Тест для системы (1) состоит из N фрагментов: $U_T = U_{\gamma_1} U_{\gamma_2} ... U_{\gamma_N}$, где N – период системы. Каждый из фрагментов включает две части: $U_{\gamma_r} = U_{1,\gamma_r} U_{2,\gamma_r}$. Первая часть U_{1,γ_r} представлена последовательностью векторов u^*_{i,γ_r}, которые определены как установочные последовательности длиной, кратной N. Значения u^*_{i,γ_r} определяются на основании перевода системы при заданной последо-

Научный руководитель д.т.н., профессор, гл. науч. сотрудник Колесов Н.В.

вательности матриц γ_r через состояния выбранного базиса $X = \{x_i \mid i = \overline{1,n}\}$, обеспечивая проверку наличия искажений в матрицах динамики и выхода системы. Вторая часть U_{2,γ_r} представлена последовательностью векторов $u_{i,\gamma_r} \quad i = \overline{1,m}$, принадлежащих базису пространства входных векторов $U = \{u_i \mid i = \overline{1,n}\}$. После каждого вектора система находится в свободном движении в течение *nN* тактов при последовательности матриц γ_r.

Далее при построении теста используется следующий известный факт: для любой цепи S^c, которая описывается моделью (1) и имеет на периоде функционирования один сеанс приема информации от средств диагностирования, описываемый для некоторой последовательности γ_r матрицами $F(\gamma_r(N)), G(\gamma_r(N)), H(\gamma_r(N))$, и один сеанс выдачи информации в средства диагностирования, описываемый матрицами $F(\gamma_r(N-1)), G(\gamma_r(N-1)), H(\gamma_r(N-1))$, существует стационарная система $\widehat{S}^c$

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad y(k) = Cx(k), \tag{2}$$

где

$$A = F_p(\gamma_r) = \prod_{i=1}^{N} F(\gamma_r(N-i+1)),\ B = G(\gamma_r(N)),$$

$$C = H(\gamma_r(N-1))F^{-1}(\gamma_r(N-1))F^{-1}(\gamma_r(N))A = H(\gamma_r(N-1))A,$$

$F(j), G(j), H(j)$ – матрицы динамики входа и выхода исходной периодически нестационарной динамической системы, которая при любой входной последовательности формирует выходные последовательности, совпадающие с выходными последовательностями цепи S^c на $\gamma_г$, при этом *k* – периоды системы (1).

В докладе показывается, что тест для системы (2) является одновременно тестом для системы (1), но при этом характеризуется существенно меньшей длиной, нежели U_T и гарантированным списком обнаруживаемых отказов, совпадающим с соответствующим списком для U_T.

Описание инструментальной среды автоматизации построения тестов. Программная среда реализована на языке C/C++. Входной информацией для нее является описание цепей, составляющих модель с указанием количества входящих в них звеньев. В результате работы программы формируются входная тестовая и выходная (эталонная) последовательности. Программа автоматизации обеспечивает генерацию для каждого звена анализируемой цепи генерацию матриц динамики, входа и выхода, удовлетворяющих условиям управляемости и наблюдаемости. На основе этих матриц формируются матрицы сеансов обмена для модели (1), в отношении которой в дальнейшем применяются процедуры синтеза тестов.

Заключение. В докладе предлагается алгоритм высокоуровневого тестирования для РВС реального времени. Приводится описание инструментальной среды, автоматизирующей процедуру генерации тестовых воздействий и эталонных выходных последовательностей.

В следующих работах планируется расширение функционала инструментальной среды с целью реализации в ней процедуры перевода произвольного графа информационных связей системы в набор независимых цепей.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ № 19-08-00052

ЛИТЕРАТУРА

1. **Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В.** Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование. СПб: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. 185 с.

2. **Лукоянов Е.В. Грузликов А.М.** Сетединамическая модель распределенной вычислительной системы реального времени // Навигация и управление движением: Материалы XX конференции молодых ученых с международным участием (Санкт-Петербург, 20-23 марта 2018г.) – 2018, с. 416–418.
3. **Грузликов А.М. Колесов Н.В. Лукоянов Е.В.** Тестовое диагностирование нарушений адресаций информационных обменов в вычислительных системах с использованием параллельной модели// Известия РАН. Теория и системы управления – 2018. № 3, с. 76–89
4. **Cassandras C.G., Lafortune S.** Introduction to discrete event systems. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. – 2008., p. 848.
5. **Zaytoon J., Lafortune S.** Overview of Fault Diagnosis Methods for Discrete Event Systems // Annual Reviews in Control. 2013. V.37 P. 308–320.

E.V. Lukoyanov, A.M. Gruzlikov (CSRI Electropribor, Saint-Petersburg). **Automation of the test synthesis procedure for a distributed computational real time system.**

Abstract. The algorithm of a real-time distributed system testing is proposed. The algorithm based on two steps: synthesis of a system network-dynamic model, test synthesis procedure to detect addressing errors in exchanges between program modules. The description of the automation tool for tests and reference sequences synthesis is given.

УДК 65.012.122

Д.В. КОСТЫГОВ, А.М. ГРУЗЛИКОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ОТКАЗОУСТОЙЧИВАЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ

Предложен подход к построению отказоустойчивых и энергоэффективных вычислительных систем на кристалле. Подход основан на введении избыточности для снижения энергопотребления системы, а также на принципах распределенного диагностирования, позволяющих децентрализовать процесс управления отказоустойчивостью

Введение. История исследований вопросов разработки отказоустойчивых систем насчитывает несколько десятилетий. Однако данная проблематика по-прежнему остается актуальной и широко освещается в современной отечественной и зарубежной литературе [1 – 9]. При этом традиционный подход обычно связывают с использованием того или иного варианта резервирования (горячего, холодного, поблочного, поэлементного, с потерей и без потери качества функционирования при восстановлении и т.п.). К числу их общих недостатков можно отнести, в частности то, что построение осуществляется без учета уровня энергопотребления будущей отказоустойчивой системы. Эта проблема является одной из ключевых при проектировании вычислительных систем. В последние десятилетия ей уделяется особое внимание, в том числе и в связи с обсуждением ее в отношении систем на кристалле [10 – 12]. О признании практической значимости этого направления свидетельствует и тот факт, что разработчики процессоров в целях снижения энергопотребления стали предусматривать в своих проектах встроенные средства для варьирования тактовой частотой и напряжением питания.

В работе рассматривается подход к построению отказоустойчивых и энергоэффективных вычислительных систем на кристалле.

Алгоритм определения энергоэффективной архитектуры. Основная идея подхода заключается в расщеплении множества ядер, т.е. введение дополнительных вычислительных элементов к уже существующим элементам с пропорциональным снижением тактовой частоты и напряжения питания. Идея заложена в алгоритм определения энергоэффективной архитектуры, представленный ниже. Известно [11], что мощность имеет две составляющие – динамическую и статическую. При этом первая составляющая, как правило, доминирует и определяется выражением:

$$P_d = aNV^2 f, \tag{1}$$

где a - коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств кристалла, N – число процессоров (ядер) в системе, V – напряжение питания, f – тактовая частота. Дополнительно для анализа полезна приближенная формула, определяющая задержку, вносимую схемой при напряжении питания V [16]:

$$D = bV, \tag{2}$$

где b - коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств кристалла. Архитектуру системы представим вектором состава $A = (a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n)$, где a_i - число ядер в расщепленном множестве *i*-го ядра, и вектором средней потребляемой мощности $\overline{P} = (\overline{P_1} \quad \overline{P_2} \quad \dots \quad \overline{P_n})$, где $\overline{P_i}$ - средняя по расщепленному множеству *i*-го ядра потребляемая мощность. Итак, предлагается следующий простой алгоритм.

Алгоритм 1 (определение энергоэффективной архитектуры)

Шаг 1. Сделать начальные присвоения: $M = n_d$ (допустимое число дополнительных ядер), $A = (1 \quad 1 \quad \ldots \quad 1)$, $\overline{P} = (\overline{P}_1 \quad \overline{P}_2 \quad \ldots \quad \overline{P}_n)$.

Шаг 2. Выбрать в $\overline{P} = (\overline{P}_1 \quad \overline{P}_2 \quad \ldots \quad \overline{P}_n)$ компоненту с максимальным значением $\overline{P}_{\max}$. Пусть ее номер равен l. Ввести дополнительное ядро в l-ю стадию. Произвести между ядрами l-й стадии приближенно сбалансированное перераспределение нагрузки. Пересчитать параметры алгоритма: $\overline{P}$, $a_l := a_l + 1$, $M := M - 1$. Если $M \neq 0$, то повторить шаг 2, иначе конец.

Подход к построению энергоэффективной отказоустойчивой системы. Концепция отказоустойчивости основана на рассмотренных выше принципах построения энергоэффективных систем, а также принципах распределенного диагностирования, предполагающего взаимные проверки между процессорными модулями и распределенную процедуру принятия решений. При построении энергоэффективной отказоустойчивой системы предлагается воспользоваться скрытой избыточностью энергоэффективной системы. Действительно, при планировании задач в этой системе в ее состав вводились дополнительные ядра. При возникновении отказа предлагается запускать обратный процесс - перераспределения нагрузку среди оставшиеся ядер.

Моделирование коммуникационной системы. Проанализируем требования, предъявляемые к коммуникационной системе, основанной на общей памяти. С одной стороны, число межъядерных связи необходимо сокращать с целью сокращения площади кристалла, отведенной под память. Однако с другой стороны число и геометрия этих связей влияет на эффективность диагностического эксперимента. Действительно, применяемая коммуникационная система должна не только допускать организацию в системе принятого диагностического эксперимента, но и не увеличивать чрезмерно его длительность, оставаясь в заданных ограничениях по площади кристалла. Для проектирования коммуникационной системы необходимо располагать значениями ее соответствующих характеристик. С целью получения таких характеристик было проведено моделирование в среде YACSIM [13]. При этом исследовались коммуникационные системы трех типов – решетка, тор, гиперкуб [14, 15].

Целевой характеристикой моделирования была длительность диагностического эксперимента, включающего взаимные межпроцессорные проверки и сбор всех результатов в каждом из процессоров. Моделирование проводилось в предположении, что реализуется эксперимент с проверкой соседних ядер, причем время проверки одного ядра другим было принято равным 2,1 усл. ед., а время трансляции диагностической информации с входа ядра на его выход равным 1,4 усл. ед.

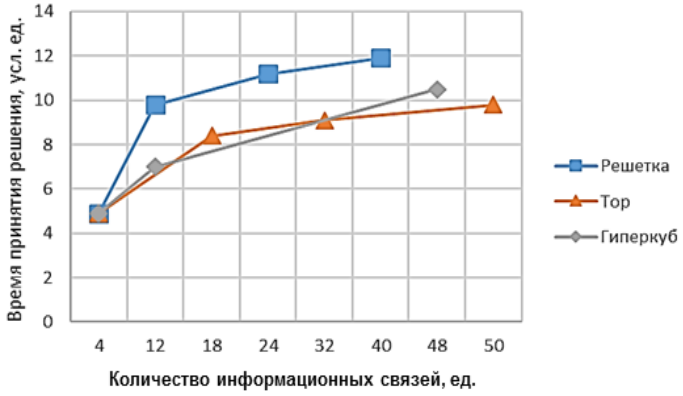


Рис. 1. Результаты моделирования

На рис. 1 для каждого из трех типов приведены зависимости этой характеристики от числа реализуемых информационных связей (объема используемой общей памяти). Последовательности расчетных точек на графиках соответствуют последовательности размерностей коммуникационной системы – 2x2, 3x3, 4x4, 5x5.

В ходе диагностического эксперимента получено, что наиболее эффективной коммуникационной системой с точки зрения времени принятия решений является схема типа «тор».

Заключение. Предложен подход к построению децентрализованной отказоустойчивой и энергоэффективной многоядерной системы на кристалле. Подход основан на введении дополнительных вычислительных ядер или процессоров, позволяющих снизить общую тактовую частоту и напряжение питания без потери производительности. После добавления дополнительных ядер в системе возникает искусственная избыточность, что позволяет построить отказоустойчивую систему, основанную на децентрализованной системе диагностирования и реконфигурации.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 19-08-00052

ЛИТЕРАТУРА

1. **Каляев И.А., Мельник Э.В.** Децентрализованные системы компьютерного управления. - Ростов н/Д: Издательство ЮНЦ РАН, 2011. 196 с.
2. **Abd-El-Barr M.** Design and Analysis of Reliable and Fault-Tolerant Computer Systems. - London: Imperial College Press, 2007. 463 p.
3. **Pradhan, D.** (Editor), Fault-Tolerant Computer System Design. - New Jersey: Prentice-Hall PTR, 1996.
4. **Pradhan, D. and Avresky, D.** (Editors), Fault-Tolerant Parallel and Distributed Systems. - California: Computer Society Press, 1995.
5. **Jalote, P.**, Fault Tolerance in Distributed Systems. - New Jersey: Prentice-Hall PTR, 1994.
6. **Каравай М. Ф.**, Минимизированное вложение произвольных гамильтоновых графов в отказоустойчивый граф и реконфигурация при отказах. I. Одноотказоустойчивые структуры // Автомат. и телемех., 2004, № 12, 159–177.
7. **Каравай М. Ф., Подлазов В. С.,** Метод инвариантного расширения системных сетей многопроцессорных вычислительных систем. Идеальная системная сеть // Автомат. и телемех., 2010, № 12, 166 – 177.
8. **Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В.** Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование. СПб: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. 185 с.
9. **Агеев А.М., Бронников А.М., Буков В.Н., Гамаюмов И.Ф.** Супервизорный метод управления избыточностью технических систем // Известия РАН. Теория и системы управления, 2017, № 3. С. 72 - 82.
10. **Xu R., Melhem R., Moss D**. Energy-Aware Scheduling for Streaming Applications on Chip Multiprocessors // 28th IEEE International Real-Time Systems Symposium. 2007. pp. 25 – 38.
11. **Panda P. R., Shrivastava A., Silpa B.V.N., Gummidipudi K**. Power-efficient System Design, // Springer, New York, 2010. 260p.
12. **Rubavani R., Saranraj S., Saranya S., Ranjani Devi R**. Power Efficient Scheduling for Network on Chip Applications on Multicore Processor // International Journal of Applied Engineering Research, Vol. 11, 2016, № 7, pp 4751-4757.
13. **Jump R. J.** YACSIM: Reference Manual. [Электрон. ресурс]. 1993. V. 2.1. Режим доступа: http://oucsace.cs.ohiou.edu/ avinashk/classes/ee663/yac.ps.
14. **Каравай М.Ф., Подлазов В.С**. Расширенный обобщенный гиперкуб как отказоустойчивая системная сеть для многопроцессорных систем // Управление большими системами, выпуск 45, 2013. С. 344 - 371.
15. **Молдованова О.В.** Децентрализованный алгоритм самодиагностики для крупномасштабных распределенных вычислительных систем различных топологий // Проблемы информатики, 2012, № 2. С. 70 - 75.

D.V. Kostygov, N.V. Kolesov (Concern CSRI Elektropribor, Saint Petersburg, Russia). **Failure-resistant and energy-efficient computing system on crystal**

Abstract. An approach to building fault-tolerant and energy-efficient systems on a chip for information processing is proposed. It is based on the introduction of redundancy to reduce the energy consumption of the system, as well as on the principles of distributed diagnostics, which allow to decentralize the fault tolerance management process.

УДК 044.438

А.С. САТУЛЕНКОВ, Ю.П. ИВАНОВ
(Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения)

СОВРЕМЕННЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Предлагается один из универсальных методов реализации графического интерфейса на примере трехмерного авиагоризонта. Детально разобраны вопросы выбора программного обеспечения, создания трехмерных моделей, текстур и использования библиотек для работы с графическими элементами.

Введение. В современном приборостроении на вычислительных машинах функционируют различные операционные системы, такие как Linux, QNX и т.д., как следствие разработчик программного обеспечения должен решить вопрос: «Как и в какой среде реализовывать графический интерфейс для отображения измеряемых величин?». В докладе приведён универсальный метод создания интерфейсов на примере 3х мерного авиагоризонта. Метод позволяет существенно сэкономить время разработки индикаторов и подобных интерфейсов.

Для наглядной демонстрации алгоритма создания индикатора, возьмем одно из заданий вертолетостроительного холдинга АО «Вертолеты России» - создание 3х мерного авиагоризонта. Рассматриваемая задача наглядно продемонстрирует возможность работы не только с двумерной графикой, но и с трехмерными объектами сцены.

По заданию индикатор должен работать на Linux-подобной операционной системе [1] на базе процессора ARM a9.

При решении задачи необходимо решить следующие вопросы: как сделать трехмерный объект, где рисовать текстуры и наконец, как обеспечить рендеринг в реальном времени? Исходя из поставленных вопросов, последовательность реализации интерфейса можно определить следующим образом:

1) Выбор программного обеспечения;
2) Создание трехмерной модели;
3) Создание текстур;
4) Выбор языка программирования и библиотек для работы с графикой.

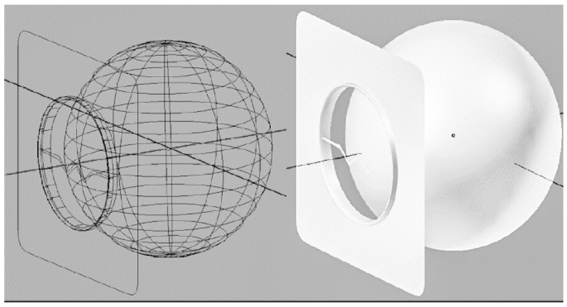


Рис. 1. Трехмерная модель авиагоризонта

Далее рассмотрим этот процесс более детально.

Выбор программного обеспечения. В первую очередь необходимо сделать трехмерную модель авиагоризонта, в этом могут помочь такие программы как 3DMAX, Maya, XSI, Cinema 4D и Blender [2]. После, необходимо нарисовать текстуры и для этого подойдет абсолютно любой векторный редактор, например, Adobe Illustrator. Далее необходимо выбрать язык программирования – рекомендуется использовать язык C/C++. Для решения задачи универсальности метода разработки и работы с графикой будут использоваться библиотеки Qt [3], которые можно собрать под большинство современных операционных систем, тем самым обеспечить переносимость программы индикации на другие системы без переработки исходного кода.

Создание трехмерной модели. Для создания трехмерного объекта использовался Blender 3D. Для того что бы в дальнейшем была возможность запрограммировать модель авиагоризонта необходимо получить файл в формате *.obj (файл описания геометрии вершин модели). Так же Blender 3D позволяет получить развертку объекта, которая понадобится для точного рисования текстур. Результат можно увидеть на рис. 1 и 2.

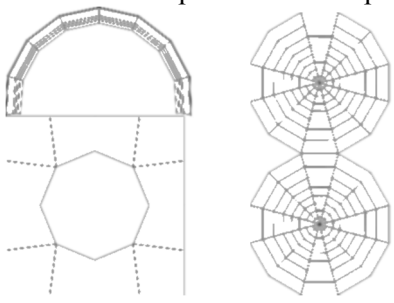


Рис. 2. Развертка авиагоризонта

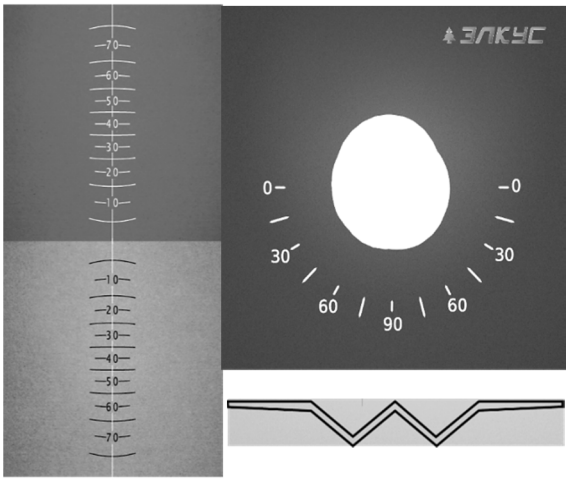


Рис. 3. Текстуры

Создание текстур. Текстуры были нарисованы в векторном редакторе Adobe Illustrator. Для отображения теней необходимо сделать 2 текстуры цветную и монохромную. Полученные текстуры представлены на рис. 3.

Выбор языка программирования и библиотек для работы с графикой. Как правило, для работы с графическими интерфейсами и различными индикаторами используется язык Java. Но для задач приборостроения требуется язык с открытым исходным кодом, и с возможностью использовать различного рода интерфейсы, такие как Aring, MIL и т.п. для вывода значений с датчиков. К сожалению, Java не удовлетворяет данным требованиям. В отличие от Java, язык программирования C/C++ все требования в состоянии удовлетворить, поэтому он и будет использоваться в дальнейшем.

Для реализации работы с трехмерными объектами сцены, несомненно, помогут библиотеки Qt [3]. Они позволят решить следующие задачи: рендеринг в реальном времени, наложение текстур, добавление шейдеров, настройка освещения, сопряжение координат объектов с датчиками и многое другое. И самое главное полученную программу можно будет в дальнейшем пересобрать под любую операционную систему без правки кода. Все эти замечательные возможности позволят сэкономить немало времени разработчику. Результат объединения всех составляющих можно увидеть на рис. 4.

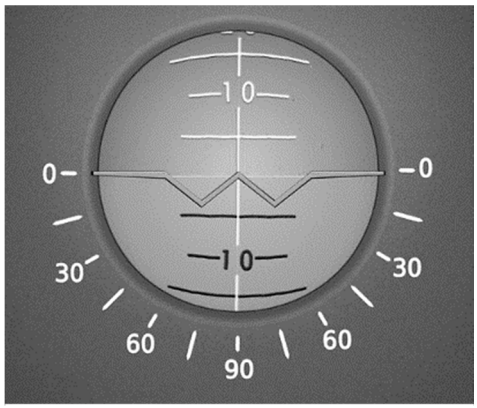


Рис. 4. Готовый авиагоризонт

Заключение. Предлагаемый метод разработки индикаторов показал свою эффективность и на других задачах: разработана консольная панель (для перспективного вертолета) которая демонстрировалась на выставках МАКС-2018, Армия 2018 и т.д.; реализованы интерфейс авиагоризонта и указатель курса для легкомоторных самолетов.

Из дополнительных преимуществ стоит отметить, что метод разработки графического интерфейса позволяет улучшить качество графики и как следствие повысить качество отображения навигационной информации с индикаторов, что в свою очередь повышает безопасность пилотирования летательного аппарата, особенно на взлете и посадке.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Прахов А. А.** Самоучитель Blender. БХВ-Петербург,2016
2. **Колисниченко Д. Н., Ален Питер В.** Linux. Полное руководство
3. **Шлее М.** Qt 5.3 Профессиональное программирование на C++ СПб.:2013г

A.S. Satulenkov, U.P. Ivanov (Saint-Petersburg State University Of Aerospace Instrumentation, Saint-Petersburg). **Modern Graphical Tools for Navigation Data Display**

Abstract. One of the universal methods of realization of the graphic interface on the example of 3D airplane attitude indicator is offered. The issues of software selection, creation of 3D models, textures and the use of libraries for working with graphics elements are discussed in detail.

УДК 681.7.068.4

Т.А. МАНВЕЛОВА
(ОАО «Авангард», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. Ульянова (Ленина))

Н.Н. ИВАНОВ
(ОАО «Авангард», Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича)

РАЗРАБОТКА МАКЕТА КОММУТАЦИОННОЙ ПЛАТЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Представлены результаты разработки макета коммутационной платы нового поколения на базе оптико-электронной шины передачи данных. Выбран оптический полимер PDMS для изготовления планарных оптических волноводов оптико-электронной шины с помощью технологии мягкой литографии. По результатам отработки технологического процесса было обеспечено снижение в 2 раза потерь оптического сигнала до 14 дБ/см при использовании материалов общего применения.

Введение. Достижение физического предела пропускной способности коммутационных плат с электрическими проводниками сделало перспективы применения новой оптико-электронной шины весьма привлекательными в современных системах обработки данных. Способность оптико-электронной шины в 10 раз увеличить пропускную способность коммутационной платы и возможность изготовления на печатном основании из недорогостоящих оптических материалов подчеркивают несомненную актуальность разработки коммутационных плат нового поколения.

Новизна проекта заключается в замене электрических проводников коммутационной платы на оптические волноводы оптико-электронной шины и в использовании полимерных материалов для формирования макета с помощью технологии мягкой литографии.

Доклад посвящен созданию макета инновационной коммутационной платы на базе высокоскоростной оптико-электронной шины передачи данных.

Разработка макета. Основными задачами, которые необходимо было решить для успешной разработки макета коммутационной платы нового поколения, являлись:

- определить конструктивно-технологические особенности коммутационной платы;
- разработать конструкцию оптико-электронной шины;
- выбрать подходящую технологию и материалы;
- определить последовательность этапов технологического процесса;
- разработать методики пооперационного контроля и измерения характеристик макета;
- изготовить макет коммутационной платы и определить его характеристики.

Увеличение пропускной способности коммутационной платы может быть достигнуто за счет изготовления на ее поверхности оптико-электронной шины. Такая шина включает в себя массив планарных оптических волноводов прямоугольного сечения [1] (рис. 1) и элементы ввода/вывода оптического излучения.

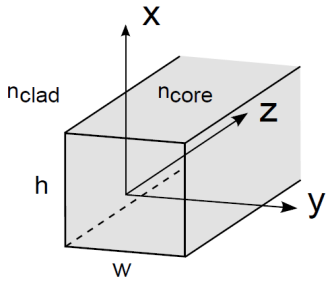


Рис. 1. Модель планарного (прямоугольного) оптического волновода [1]

Преимуществами оптико-электронной шин являются:

- большая ширина полосы пропускания (до 100 ГГц на канал);
- низкий уровень рассеиваемой мощности на высоких частотах;
- отсутствие емкостных задержек и чувствительности к электромагнитным помехам;
- частотное уплотнение оптических каналов [2].

Выбор в пользу полимерных материалов был сделан из-за их низкой стоимости, легкого процессирования и согласованности температурного коэффициента линейного расширения полимера и основания печатной платы. Большие потери оптического сигнала внутри одного устройства не влияют на его надежную передачу [2–5].

Для изготовления оптико-электронной шины выбран полимер полидиметилсилоксан (PDMS). При различном соотношении компонентов смеси полимер/связующий агент PDMS имеет показатели преломления, необходимые для изготовления оболочек и сердцевин оптических волноводов. Это позволяет снизить в них потери оптического сигнала за счет формирования из одного материала.

Аналогами разрабатываемой коммутационной платы нового поколения являются изготовленный в ИПЛИТ РАН макет оптико-электронной шины с 256 каналами и скоростью более 3 Гбит/с [6], а также, прототип коммутационной платы коллаборации HDP User Group с интегрированной оптико-электронной шиной между слоями платы и скоростью 40 Гбит/с [7].

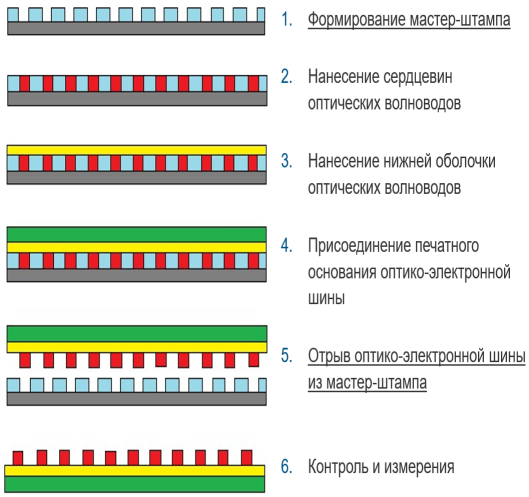


Рис. 2. Блок-схема технологического процесса формирования оптико-электронной шины передачи данных

Для изготовления макета коммутационной платы нового поколения была определена последовательность этапов создания оптико-электронной шины с соответствующими параметрами и режимами обработки (рис. 2). Разработанный технологический процесс основан на технологии мягкой литографии [4–5]. Наиболее важными этапами являются изготовление мастер-штампа с помощью фотолитографии, освоенной в ЦМСТ ОАО «Авангард», и отрыв шины из мастер-штампа. Для контроля качества выполнения технологических операций были выработаны методики пооперационного контроля.

Схема измерения характеристик макета состоит из источника РУБИН 104, приемника РУБИН 021, 2 волоконных сборок и тестовой платы (рис. 3). Передача сигнала из оптоволокна в оптико-электронную шину осуществлялась по сопряжению «встык» с использованием v-образных канавок для фиксации положения оптоволокна относительно сечения шины [2–5].

Рис. 3. Схема измерения параметров макета коммутационной платы нового поколения

По результатам измерений согласно разработанным методикам контроля, наименьшее значение удельных потерь сигнала составляет 14,13 дБ/см при использовании материалов общего применения, представленных на рынке.

Заключение. Разработан макет коммутационной платы нового поколения на базе оптико-электронной шины передачи данных, а именно:

- создана конструкция и выбраны материалы оптико-электронной шины;
- определена последовательность технологических операций изготовления макета с параметрами и режимами обработки;
- выработаны методики пооперационного контроля;
- изготовлены макеты коммутационной платы и проведены измерения их характеристик;
- выявлена необходимость дополнительной очистки материалов и разработки специальных приемов снижения потерь оптического сигнала в полимере.

Результаты проекта могут быть применены в области создания нового поколения коммутационных плат для высокоскоростной передачи сигналов в масштабе от «чип-чип» до построения сложных межблочных соединений высокопроизводительных вычислительных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Zgraggen, E.** Fabrication and System Integration of Single-Mode Polymer Optical Waveguides: doctoral thesis. Zurich, 2014. 158 p.
2. **Манвелова Т.А., Иванов Н.Н.** Разработка тестовой платы с оптической шиной передачи данных // VI Научно-практическая конференция с международным участием «НАУКА НАСТОЯЩЕГО И БУДУЩЕГО» для студентов, аспирантов и молодых ученых: тез. докл., СПб, 20 марта 2018 г. / СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018, С. 57-60.
3. **Манвелова Т.А., Иванов Н.Н.** Разработка технологического процесса формирования полимерных планарных световодов // XI Научно-техническая конференция молодых специалистов по радиоэлектронике: тез. докл., СПб, 19 апреля 2018 г. / ОАО «Авангард», СПб, 2018, С. 127-132.
4. **Манвелова Т.А.** Исследование технологии мягкой литографии при формировании полимерных планарных оптических волноводов // III Научно-техническая конференция АО «НПП Радар ММС» «Будущее предприятия – в творчестве молодых»: тез. докл., СПб, 26 мая 2018 г. / АО «НПП Радар ММС», 2018, С. 89-93.
5. **Манвелова Т.А.** Исследование технологии формирования полимерных планарных оптических волноводов: ВКР магистра / СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2018.
6. **В.И. Соколов, А.С. Ахманов, М.С. Китай, С.И. Молчанова, В.Я. Панченко, Е.В. Троицкая, М.Ю. Цветков.** Лазерные технологии формирования полимерных элементов микро и нанофотоники для высокоскоростных информационных систем. // 30 лет Институту проблем лазерных и информационных технологий Российской академии наук (ИПЛИТ РАН). URL: http://shatura.laser.ru/laser.ru/30/Polymer_photonics.pdf (дата обращения: 09.09.2018 г.).
7. **Immonen M., Wub J., Yanb H.J. etc.** Electro-Optical Backplane Demonstrator with Multimode Polymer Waveguides for Board-to-Board Interconnects // Proceedings of the 5th Electronics System-integration Technology Conference (ESTC), 16-18 Sept. 2014. / Helsinki, Finland, 2014, P. 1-6.

T.A. Manvelova (JSC «Avangard», St. Petersburg Electrotechnical University "LETI"), **N.N. Ivanov** (JSC «Avangard», Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications). **The new generation commutation board model development**

Abstract. The results of the new generation switching board prototype development based on an optical-electronic data transmission bus are presented. A PDMS optical polymer was selected for the optoelectronic bus planar optical waveguides fabrication using soft lithography technology. According to technological process work out results, the optical signal loss was reduced 2 times to 14 dB / cm using general materials.

УДК 004.3

В.К. САЛЫКИН
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ленина (Ульянова))

ОКОНЕЧНОЕ УСТРОЙСТВО БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ LORA

Представлено оконечное устройство сети LoRaWAN – приёмопередатчик, построенный на основе трансивера компании Semtech, микроконтроллера STM32 и обеспечивающий передачу данных по радиоканалу. Разработаны программное обеспечение, электрическая схема и печатная плата устройства, изготовлен его макет. Устройство может использоваться при решении задач геолокации и позиционирования.

Введение. В последнее время активно развиваются беспроводные сети передачи данных, увеличивается количество подключаемых к ним оконечных устройств. Долгое время для передачи информации в таких сетях применялась сотовая связь или Wi-Fi. Однако эти способы передачи данных имеют ряд недостатков. Мобильную связь отличает высокое энергопотребление, что ограничивает время автономной работы устройств, а также стоимость использования: при постоянном опросе многочисленных оконечных устройств GSM-связь становится слишком затратной. При использовании беспроводных каналов на основе технологий Wi-Fi необходима прямая видимость, что не всегда возможно в городских условиях. Еще один недостаток – отсутствие единого протокола. Техническое решение, свободное от указанных недостатков, связано с развитием распределенных сетей телеметрии. Примером такой сети является сеть, построенная по протоколу LPWAN, разрабатываемому и внедряемому некоммерческой организацией LoRa Alliance [1]. Предполагается, что этот протокол будет внедряться как стандарт для глобальных сетей с низким энергопотреблением (LPWAN – Low Power Wide Area Network) и использоваться для подключения устройств различного класса. В этом случае становится актуальной разработка устройств, обеспечивающих подключение к сетям передачи данных LoRa в соответствии с принятым протоколом.

Доклад посвящен вопросам разработки приёмопередатчика, ориентированного на подключение к сети LoRaWaN и способного передавать информацию (сигнал) на большие расстояния.

Особенности технологии LoRa. В основе технологии LoRa – свойство радиосвязи увеличивать дальность передачи данных при снижении скорости. Такой подход исключает потребность в ретрансляторах, что снижает стоимость сети и упрощает ее архитектуру. Сеть LoRaWAN имеет радиальную архитектуру типа “звезда”, ее узлы отличаются низким энергопотреблением, невысокой скоростью обмена данными, большой дальностью связи (до 15 км в сельской местности и до 5 км в условиях плотной городской застройки) и низкой стоимостью оконечного оборудования.

Ключевой характеристикой LoRa-устройств является высокая чувствительность (до –148 дБм), которая достигается благодаря применению метода модуляции LoRa (Long Range), разработанного компанией Semtech [2]. Этот метод модуляции предполагает использование технологии расширения спектра, при которой данные кодируются широкополосными линейно-частотно модулируемыми импульсами с частотой, увеличивающейся или уменьшающейся на некотором временном интервале. Такая технология расширения спектра совместно с применяемой упреждающей коррекцией ошибок, восстанавливающей искаженные биты данных, позволяет повысить отношение сигнал/шум и обеспечить работу в условиях импульсных помех.

Разработка приемопередатчика. При разработке приемопередатчика была поставлена задача добиться дальности связи до 15 километров и низкого энергопотребления (1–5 мкА), чтобы устройство могло работать от батарейного питания продолжительное время. Приемопередатчик должен быть оконечным устройством сети и настраиваться для связи с любым элементом следу-

Научный руководитель к.т.н., доцент Буренева О.И.

ющего уровня (концентратором или базовой станцией). При этом он может выполнять функции измерения, управления и контроля в зависимости от реализованных в нем функций.

Для решения задачи был выбран трансивер компании Semtech – SX1261, имеющий поддержку протокола сети LoRaWAN [3, 4]. Структурно трансивер состоит из SPI интерфейса, необходимого для его конфигурирования и портов ввода/вывода для общения с внешним устройством управления. Также в структуре трансивера присутствуют конфигурационные регистры, данные в которых определяют выбор типа модуляции, частоты сигнала кварцевого генератора и ряд других настроек. В принимающей и передающей части находятся демодулятор и модулятор соответственно. Они взаимодействуют с синтезатором и делителем частоты, которые зависят от выбранного кварцевого генератора. В проекте вместо кварцевого генератора используется термокомпенсированный генератор TCXO, обеспечивающий повышенную стабильность частоты.

Для управления выбранным трансивером используется микроконтроллер STM32 серии L0 – 32-битный микроконтроллер с ядром ARM Cortex-M0 со сверхнизким энергопотреблением, который, связываясь с трансивером по интерфейсу SPI, производит его настройку. По умолчанию SPI настроен для полнодуплексной связи. В этой конфигурации сдвиговые регистры главного и подчиненного устройства связаны двумя однонаправленными линиями между выводами MOSI и MISO.

Для создания принципиальной электрической схемы и макета печатной платы, использовался САПР Allegro Cadence, а именно Capture CIS и PCB Editor соответственно. При создании программного обеспечения для микроконтроллера STM32 использовалась среда разработки, основанная на Eclipse. Программное обеспечение служит для настройки и управления приемопередатчиком.

Разработанное оконечное устройство имеет батарейное питание.

Заключение. Разработано беспроводное устройство – приемопередатчик, поддерживающий работу по протоколу LPWAN и способный осуществлять связь на сверхдальние расстояния (от 5 до 15 километров): подготовлено программное обеспечение, разработана принципиальная электрическая схема, создана и изготовлена печатная плата, изготовлен макет устройства.

Подобное устройство можно применять при решении задач геолокации в «умных» городах, позиционирования персонала и оборудования в масштабах города, контроля за транспортом, мониторинга окружающей среды с автоматизированным сбором данных от инженерных систем, а также во многих областях, где требуется решать задачи контроля и управления при большой дальности связи и автономности устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. LoRaWAN™ Specification – LoRa™ Alliance, 2015. – Режим доступа: https://lora-alliance.org
2. **Верхулевский К.** Технология LoRa компании Semtech: новый импульс развития «Интернета вещей». *Беспроводные технологии* 2015. №3. С. 8 – 14.
3. Wireless RF LoRa® Transceivers. – Режим доступа: www.semtech.com
4. New LoRa® Sub-GHz Radio Transceivers. Режим доступа: www.semtech.com

---

V.K. Salykin (Saint-Petersburg State Electrotechnical University “LETI”). **Terminal device for wireless network LoRa**

Abstract. The terminal device of the LoRaWAN network is presented in this report. The device is built on the base of a Semtech transceiver and an STM32 microcontroller and provides data transmission by means a radio channel. The software of the device was designed and hardware of one was developed and manufactured. The device can be used when solving problems of geolocation and positioning.

▪ ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ ▪

УДК 629.13.053

Д.В.АНТОНОВ, И.Б.ЧЕЛПАНОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ГИРОСТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ ГЛИССАДЫ

На математической модели анализируется работа системы стабилизации оси оптической глиссады в режиме инерциальной стабилизации при информационном обеспечении посадки самолета на взлетно-посадочную полосу корабля. Анализ нацелен на повышение эффективности работы за счет возможного внедрения новых режимов комплекса. На основе использования результатов анализа разработана блок-схема системы гиростабилизации.

Введение. Посадка самолетов морской палубной авиации на ограниченную и качающуюся взлетно-посадочную полосу (ВПП) авианосца является самым сложным этапом пилотирования, требующим высочайших профессиональных качеств пилота. В работе [1] отмечается, что в последние 15-20 секунд посадки пилот корректирует траекторию полета исключительно по командам руководителя визуальной посадки и по сигналам оптической системы посадки (ОСП). ОСП предоставляет пилоту визуальную информацию, с помощью которой он определяет по световым лучам своё нахождение относительно оси глиссады гиростабилизированного излучающего модуля, направленный световой пучок которого содержит три цвета: желтый (выше глиссады), зеленый (на глиссаде) и красный (ниже глиссады). Угловой размер центрального (зеленого) сектора в вертикальной плоскости мал и составляет 11′ (с учетом перекрытия соседних секторов), в связи с чем при качании под действием суммарной килевой, бортовой, а также вертикальной качек корабля необходима точная угловая пространственная стабилизация оптической глиссады относительно горизонта.

Представленный доклад посвящен анализу работы создаваемой перспективной комбинированной одноосной системы гиростабилизации, нацеленной на облегчение работы пилота на конечной фазе посадки и, как следствие, повышения безопасности посадки.

Анализ режимов работы системы. На сегодняшний день в отечественных ОСП стабилизация оси оптической глиссады по углу места осуществляется в режиме автоматической установки и стабилизации (АУС) [2]. В этом режиме ось оптической глиссады стабилизируется относительно горизонта и, даже при точной угловой стабилизации, под воздействием вертикальной качки корабля ось глиссады будет перемещаться параллельно самой себе. Необходимо учитывать, что ОСП находится на достаточно большом отстоянии от центра качания корабля, и тогда вертикальные перемещения, вызванные составляющими качки корабля, могут достигать нескольких метров. Необходимо обеспечить такую точность угловой стабилизации глиссады, чтобы самолет при посадке на ВПП при качке попадал в расчетную точку касания в установленных пределах допусков.

Для решения этой общей задачи предлагается схема гиростабилизации оптической глиссады перспективной ОСП, в которой, помимо упомянутого режима АУС, дополнительно реализованы два режима.

Один из них – режим автоматической установки и точечной стабилизации (АУТС) [3, 4]. В этом режиме пилотирование облегчается тем, что вблизи предварительно определенной точки, находящейся на известном расстоянии от ВПП, производится компенсация вертикальных перемещений с учетом заданной дистанции до этой точки введением дополнительной угловой поправки:

$$\Delta\alpha_{\text{г}} = \tan\left(\frac{h_{вк}}{Д_0}\right), \qquad (1)$$

где $Д_0$ – дистанция до предварительно определенной точки, вблизи которой осуществляется компенсация вертикальных перемещений; $h_{ВК}$ – известные вертикальные перемещения корабля, вырабатываемые навигационным комплексом (НК), которые можно принять как:

$$h_{вк} = h_{вки} + dh_{вк}\,. \tag{2}$$

Здесь $h_{ВКИ}$ – истинное значение вертикальных перемещений, $dh_{ВК}$ – неизвестная погрешность определения вертикальных перемещений.

Другой дополнительный режим – это режим автоматической установки и инерциальной стабилизации (АУИС). В этом режиме работа пилота облегчается на всем протяжении посадки за счет компенсации вертикальных перемещений с учетом текущей дистанции $Д$ до самолета, измеряемой с помощью внешних средств измерений (например, дальномера) добавлением дополнительной угловой поправки:

$$\Delta\alpha_г = tg\left(\frac{h_{вк}}{Д}\right), \tag{3}$$

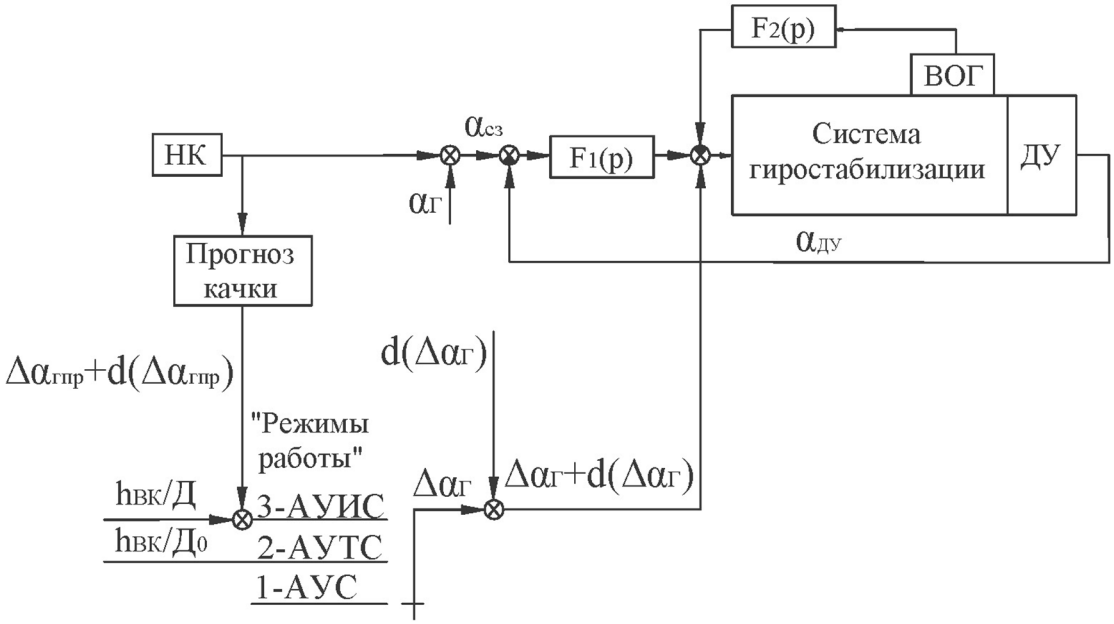
где $Д$ – известная текущая дистанция до самолета, которую можно принять как

$$Д = Д_и + \delta Д\,. \tag{4}$$

Здесь $Д_и$ – истинное измеряемое значение текущей дистанции до самолета, $\delta Д$ – неизвестная погрешность выработки текущей дистанции до самолета.

Таким образом, комбинированная система гиростабилизации оптической глиссады, блок-схема которой представлена на рисунке, работает в трех режимах:

- автоматической установки и стабилизации;
- автоматической установки и точечной стабилизации,
- автоматической установки и инерциальной стабилизации.



Блок-схема двухканальной комбинированной системы гиростабилизации оптической глиссады:
$\alpha_{СЗ}$ – текущий угол наклона глиссады относительно ВПП; $\Delta\alpha_Г$ – поправка угла наклона глиссады в режимах автоматической установки и точечной гиростабилизации и автоматической установки и инерциальной гиростаблизации; $\Delta\alpha_{Гпр}$, $d(\Delta\alpha_{Гпр})$ – составляющая поправки прогноза углов качки и её погрешность; $d(\Delta\alpha_Г)$ – погрешность выработки поправки $\Delta\alpha_Г$; $\alpha_Г$ – заданный угол наклона глиссады; $\alpha_{ДУ}$ – сигнал с датчика угла.

Работа комбинированной системы гиростабилизации осуществляется с использованием сигналов от двух источников информации – НК и волоконно-оптического гироскопа (ВОГ). Необходимо учитывать, что при использовании режима инерциальной стабилизации ось глиссады относительно пилота будет неподвижна в пространстве, в то время как палуба перемещается при качке. Для уменьшения влияния этого эффекта и повышения безопасности в системе

стабилизации блока указательных огней реализован алгоритм прогноза углов качки корабля. Устройство прогноза изображено на рисунке в виде единого модуля, одновременно вычисляющего прогноз углов качек на основе нескольких алгоритмов на интервалы времени, не превышающие 15 с, и реализующего выбор алгоритма, обеспечивающего наиболее высокую точность путем сравнения с реальными значениями углов качек через равные промежутки времени [5–8]. Прогноз осуществляется на основе данных, получаемых от НК с использованием известной математической модели динамики корабля на волнении. В режиме инерциальной стабилизации прогнозирование углов качки корабля используется для формирования дополнительной составляющей компенсирующей поправки $\Delta\alpha_{\text{Гпр}}$, с помощью которой глиссада устанавливается под заданным углом наклона к заранее спрогнозированному положению палубы.

Смысл используемого комплексирования при двухканальном преобразовании сигналов средств измерения углов качки таков. Низкочастотные составляющие извлекаются из сигнала НК, высокочастотные составляющие возмущений извлекаются из сигнала ВОГ, сигнал обратной связи получается от датчика угла (ДУ) излучающего модуля. На основе полученного результата формируется сигнал на моментный двигатель, управляющий стабилизированной платформой. Известно, что при использовании двух источников информации с различным спектральным составом помех для выделения истинного значения управляющего сигнала в контуре регулирования целесообразно воспользоваться условием инвариантности относительно полезного сигнала [9–11] (в данном случае угла):

$$F_1(p) + F_2(p) = 1, \tag{5}$$

где: $F_1(p)$ – передаточная функция динамического преобразователя с амплитудно-частотной характеристикой $|F_1(j\omega)|$ (как фильтра низких частот) для сигнала НК; $F_2(p)$ – передаточная функция динамического преобразователя с амплитудно-частотной характеристикой $|F_2(j\omega)|$ (как фильтра высоких частот) для сигнала ВОГ.

Для подавления помех от НК, ДУ и динамического наклона палубы необходимо использовать фильтр низких частот с амплитудно-частотной характеристикой $|F_1(j\omega)|$. В связи с тем, что фильтр второго порядка при его реализации достаточно сложный, предлагается фильтрацию производить фильтром первого порядка с постоянной времени T, т.е. произвести замену:

$$F_1(p) = \frac{Tp+1}{T^2p^2+2Tp+1} \rightarrow \frac{1}{Tp+1}. \tag{6}$$

Для подавления влияния постоянных угловых скоростей составляющей вращения Земли и дрейфа ВОГ предлагается фильтр с передаточной функцией второго порядка:

$$F_2(p) = \frac{T^2p}{T^2p^2+2Tp+1}. \tag{7}$$

С учетом дифференцирования сигнала по углу, производимого ВОГ, условие инвариантности (5) выполняется.

С использованием описанных способов преобразования сигналов проведено численное выборочное моделирование динамики управления глиссадой, по результатам которого можно сделать вывод о перспективности предложенных алгоритмов комплексного преобразования сигналов средств измерения углов и угловых скоростей для рассматриваемой задачи.

Заключение. Предварительный анализ математическим моделированием перспективной системы гиростабилизации глиссады с режимом инерциальной стабилизации показывает возможность облегчения пилотирования самолета палубной авиации и, как следствие, повышения безопасности посадки на взлетно-посадочную полосу корабля. Построена блок-схема системы, предназначенной для компенсации влияния качек корабля с учётом вертикальных перемещений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hernando, J.-L., & Martinez-Val, R.** Preliminary suitability analysis of carrier approach guidance and recovery of land-based aircraft. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 230(5), 2016, p. 906–920.

2. **Гутнер И.Е., Журавлев Л.Д., Зворыкин Е.Н., Молочников А.А., Орлов М.В.** Вычисление текущего угла наклона глиссады для обеспечения посадки самолета на палубу авианосца // Гироскопия и навигация. 2008. №4(63). С. 40–48.
3. **Антонов Д.В.** Использование режима точечной гиростабилизации оптической глиссады для повышения безопасности посадки вертолета на корабль, «Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», СПб. 2018г.
4. «Landing signal officer reference manual» (rev.B), 2009.
5. **Антонов Д.В., Гутнер И.Е., Зворыкин Е.Н., Молочников А.А., Семенов И.В.** Перспективная система гиростабилизации оптической глиссады для посадки самолета на авианосец // 9-я Российская мультиконференция по проблемам управления. «Материалы XXX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова», 2016. С. 221–228.
6. **Бородай И.К.** Краткосрочное прогнозирование процессов качки корабля с учетом ошибок измерений. Труды Крыловского государственного научного центра. 2017, 2(380), pp. 9–16.
7. **Menahem M. Sidar, Brian F. Doolin** On the Feasibility of Real-Time Prediction of Aircraft Carrier Motion at Sea, IEEE Transactions on automatic control, vol. AC-28, NO. 3, March 1983.
8. **Пелевин А.Е.** Прогноз угла наклона палубы корабля // Гироскопия и навигация. 2016, № 4 (95), с. 122–132.
9. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического управления. М.: «Наука», 1975. 768 с.
10. **Brown R.G., Hwang P.Y.S.** Introduction to Random Signal and Applied Kalman Filtering with Matlab Exercises and Solutions. 3rd Ed. John Wiley and Sons 1997.
11. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 509 с.

D.V. Antonov, I.B. Chelpanov (Concern CSRI "Elektropribor" JSC, Saint Petersburg). **Ways to improve the efficiency optical glissade gyrostabilization system work**

Abstract. The mathematical model analyzes the operation of the stabilization system of the axis of the optical glide path in the inertial stabilization mode with information support for landing the aircraft on the ship's runway. The analysis is aimed at improving the efficiency of work due to the possible introduction of new modes of the complex. Based on the use of analysis results, a block diagram of the gyrostabilization system has been developed.

УДК 519.27

А.Н. АРТЕМЬЕВ
(Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения)

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ВАРИАЦИИ АЛЛАНА ДЛЯ ДИСКРЕТНОЙ ВИНЕРОВСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Анализируется точность идентификации параметров случайных процессов с использованием вариации Аллана. Приводится аналитическое выражение погрешности вычисления вариации Аллана для винеровского процесса по реализации с заданным интервалом дискретизации.

Введение. На сегодняшний день для выработки навигационных и динамических параметров широкое распространение получили стохастические методы обработки информации, в том числе методы калмановской фильтрации. Их эффективность существенно зависит от точности описания небелошумных возмущений и ошибок измерений. Как следствие, одной из основных задач является идентификация параметров формирующих фильтров, используемых для описания этих процессов. В последнее время для решения такой задачи при исследовании свойств случайных ошибок чувствительных элементов инерциальных систем (гироскопов и акселерометров) широкое распространение получил метод вариации Аллана [1–6]. Ряд известных приборостроительных фирм включает оценку вариации Аллана в спецификации на инерциальные приборы [1, 4, 6].

В предложенной работе анализируется точность вычисления вариации Аллана для винеровской последовательности.

Вычисление оценок параметров случайных процессов с использованием вариации Аллана. Суть метода получения оценки вариации Аллана состоит в следующем [2, 3, 6]. Предположим, что имеется L наборов из M значений случайной последовательности (предполагается, что она и является реализацией погрешностей датчика):

$$\underbrace{x_1, x_2, ..., x_M}_{i=1}, \underbrace{x_{M+1}, ..., x_{2M}}_{i=2}, ... \underbrace{x_{(L-1)M+1}, ... x_{LM}}_{i=L}, \tag{1}$$

и для каждого из них вычисляется среднее значение

$$\overline{x}_i(M) = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} x_{(i-1)M+l},\ i = \overline{1...L}. \tag{2}$$

Вариация Аллана, как правило, вычисляется по дискретной реализации погрешностей согласно следующему соотношению:

$$\sigma_A^2(M) = \frac{1}{2(L-1)}\sum_{i=1}^{L-1}\left(\overline{x}_{i+1}(M) - \overline{x}_i(M)\right)^2. \tag{3}$$

Отсюда следует, что вариация Аллана (3) представляет собой оценку одной второй дисперсии разности средних значений $\overline{x}_i(M)$, рассчитанных для каждой группы [1, 2, 7].

В методе вариации Аллана предполагается наличие следующих случайных процессов: случайного наклона, винеровского процесса, белого шума, фликкер-шума и шума квантования. Исходя из предположения о наличии в погрешности всех упомянутых составляющих, можно представить вариацию Аллана $\sigma_A^2(\tau)$ в виде:

$$\sigma_A^2(\tau) = R^2\frac{\tau^2}{2} + K^2\frac{\tau}{3} + B^2\frac{2}{\pi}\ln 2 + N^2\frac{1}{\tau} + Q^2\frac{3}{\tau^2}, \tag{4}$$

Научный руководитель д.т.н., проф. Тупысев В.А.

где τ – время осреднения, R, K, B, N, Q – коэффициенты, характеризующие интенсивность отдельных шумовых составляющих выходного сигнала измерителя. Определение значений коэффициентов R, K, B, N, Q обычно осуществляется путем аппроксимации по методу наименьших квадратов или эмпирически [2, 3].

В настоящей работе получим аналитическое выражение вариации Аллана для винеровского процесса. Предположим, модель описывается винеровской последовательностью:

$$x_M = x_0 + \sum_{i=1}^{M} V_i \Delta T \tag{5}$$

где V_i – независимые случайные величины с дисперсиями σ_V^2. Обратим внимание, что размерности величин x_i и V_i не совпадают, т.е. если x_i имеют размерность [ед.], то V_n имеет размерность [ед./с]. На первом интервале последовательность имеет вид:

$$x_0, x_0 + V_1\Delta T, x_0 + V_1\Delta T + V_2\Delta T, \ldots \tag{6}$$

Далее суммируются отсчёты и находится среднее арифметическое по формуле

$$\overline{x}_1 = \frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M} x_i = \frac{1}{M}(Mx_0 + (M-1)V_1\Delta T + (M-2)V_2\Delta T + \ldots + V_M\Delta T). \tag{7}$$

Аналогично на втором интервале

$$\overline{x}_2 = \frac{1}{M}\sum_{i=M+1}^{2M} x_i = \frac{1}{M}(Mx_M + (M-1)V_{M+1}\Delta T + (M-2)V_{M+2}\Delta T + \ldots + V_{2M}\Delta T). \tag{8}$$

Находя разность, будем иметь

$$\overline{x}_2 - \overline{x}_1 = \frac{1}{M}(M(x_M - x_0) + M(V_{M+1} - V_1)\Delta T + (M-1)(V_{M+2} - V_2)\Delta T + \ldots). \tag{9}$$

Аналогично можно записать разность $\overline{x}_3 - \overline{x}_2$ и последующие разности. Учитывая (5), получим, что разности вида $\overline{x}_{i+1} - \overline{x}_i$ будут равны

$$\overline{x}_{i+1} - \overline{x}_i = \frac{\Delta T}{M}\begin{pmatrix}(MV_{iM+1} + (M-1)V_{iM+2} + \ldots + V_{(i+1)M})\ldots \\ \ldots - (M-1)V_{(i-1)M+1} - (M-2)V_{(i-1)M+2} - V_{(i-1)M-1} - (M-M)V_{(i-1)M}\end{pmatrix}. \tag{10}$$

Найдем математическое ожидание величины $E\left\{\sigma_A^2(M)\right\}$

$$E\left\{\sigma_A^2(M)\right\} = \frac{1}{2(L-1)}E\left\{\sum_{i=1}^{L-1}\left(\overline{x}_{i+1}(M) - \overline{x}_i(M)\right)^2\right\} = \frac{1}{2(L-1)}\sum_{i=1}^{L-1}E\left\{\left(\overline{x}_{i+1}(M) - \overline{x}_i(M)\right)^2\right\}. \tag{11}$$

Получим математическое ожидание слагаемых $E\left\{\left(\overline{x}_{i+1}(M) - \overline{x}_i(M)\right)^2\right\}$

$$\begin{aligned}
&D_i = E\left\{(\overline{x}_{i+1} - \overline{x}_i)^2\right\} = \\
&= \frac{\Delta T^2}{M^2}E\left\{\begin{pmatrix}(MV_{iM+1} + (M-1)V_{iM+2} + \ldots + V_{(i+1)M}) - \ldots \\ -(M-1)V_{(i-1)M+1} - (M-2)V_{(i-1)M+2} - V_{(i-1)M-1} - (M-M)V_{(i-1)M}\end{pmatrix}^2\right\} = \\
&= \frac{\Delta T^2}{M^2}\left(\left(M^2 + (M-1)^2 + \ldots + 1\right) + (1-M)^2 + (2-M)^2 + \ldots + 1\right)\sigma_V^2 = \frac{\Delta T^2\sigma_V^2}{M^2}\left(\sum_{i=1}^{M}(i)^2 + \sum_{j=1}^{M-1}(j)^2\right) = \\
&= \frac{\Delta T^2\sigma_V^2}{M^2}\left(\frac{M}{6}\left((2M^2 + 3M + 1) + (2M^2 - 3M + 1)\right)\right) = \frac{\Delta T^2\sigma_V^2}{M}\frac{1}{3}(2M^2 + 1).
\end{aligned} \tag{12}$$

Подставляя (12) в (11), получим, что математическое ожидание вариации будет равно

$$D = E\left\{\frac{1}{2(L-1)}\sum_{i=1}^{L-1}\left(\overline{x}_{i+1}(M)-\overline{x}_i(M)\right)^2\right\} = \frac{1}{2(L-1)}\sum_{i=1}^{L-1}E\left\{\left(\overline{x}_{i+1}(M)-\overline{x}_i(M)\right)^2\right\} =$$
$$= \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T^2\sigma_V^2}{M}\frac{1}{3}(2M^2+1)\right) = \frac{\Delta T^2\sigma_V^2}{3}M + \frac{\Delta T^2\sigma_V^2}{6M} = \frac{\tau\sigma_V^2\Delta T}{3} + \frac{\Delta T^3\sigma_V^2}{6\tau} = \frac{\tau K^2}{3} + \frac{\Delta T^2K^2}{6\tau}, \quad (13)$$

где $K^2 = \sigma_V^2\Delta T$ соответствует квадрату интенсивности порождающего шума эквивалентного непрерывного винеровского процесса. Заметим, что второе слагаемое с точностью до коэффициентов совпадает с вариацией Аллана для белого шума и зависит от интервала дискретизации, что вносит методическую погрешность при определении коэффициентов R, K, B, N, Q с использованием вариации Аллана. Однако следует отметить, что при рассмотрении непрерывных процессов полученное смещение $\Delta T^2K^2/6\tau$, как и следует ожидать, не проявляется.

Заключение. Вариация Аллана для выборочных значений винеровского процесса, полученная по дискретной реализации конечной длины, является в общем случае смещенной оценкой относительно вариации Аллана непрерывного процесса. При этом смещение с точностью до коэффициентов совпадает с вариацией Алана для белого шума и пропорционально квадрату интервала дискретизации исходной реализации. Пренебрежение вторым слагаемым может отрицательно влиять на определение коэффициентов в формуле (4) при наличии в случайных процессах, описывающих возмущения и ошибки измерений, белого шума и винеровского процесса. Определение точности идентификации этих процессов будет проведено при дальнейших исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кучерков С.Г., Лычёв Д.И., Скалон А.И., Чертков Л.А.** Использование вариации Аллана при исследовании характеристик микромеханического гироскопа // Гироскопия и навигация. №2(41), 2003. С. 98–104.
2. **Lawrence C.Ng.** On the Application of Allan Variance Method for Ring Laser Gyro Performance Characterization, (1993).
3. **Allan, D. W. 2016.** “Historicity, Strengths, and Weaknesses of Allan Variances and Their General Applications.” Gyroscopy and Navigation 7 (1). Pleiades Publishing: 1–17.
4. **Сирая Т Н.** Вариация Аллана как оценка погрешности измерения // Гироскопия и навигация. 2010. 69 (2): 29–36.
5. **Моторин А.В., Степанов О.А., Челпанов И.Б.** Точность оценивания постоянной составляющей погрешности датчиков и ее связь с вариацией Аллана // Гироскопия и навигация, 2016. №3 (94): 63–74.
6. **El-Sheimy, Naser, Haiying Hou, Xiaoji Niu.** 2008. Analysis and Modeling of Inertial Sensors Using Allan Variance. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 57 (1): 140–149.
7. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.2. Введение в теорию фильтрации. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 417 с.

A.N. Artemev (SPbSUAI, Saint-Petersburg). **Identification parameters of models of gyroscopes and accelerometers using Allan variance.**

Abstract. The accuracy of identification of random processes parameters is analyzed using the Allan variance. An analytical expression is given for the error in calculating the Allan variance of the random walk sample.

УДК 531.383.001.4

М.И. СЛУКИНА, Ю.А. ЛИТВИНЕНКО
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОГРЕШНОСТИ ДВУХСТЕПЕННОГО ПОПЛАВКОВОГО ГИРОСКОПА МЕТОДАМИ НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Описывается задача идентификации параметров модели ухода гироскопа с использованием алгоритмов нелинейной фильтрации. В качестве неизвестных параметров модели рассматривается величина, обратная интервалу корреляции марковского процесса первого порядка, описывающего случайную составляющую ухода гироскопа, и коэффициент, обуславливающий влияние изменения температуры. Результаты моделирования сравниваются с результатами, полученными при решении задачи идентификации с использованием обобщенного фильтра Калмана.

Введение. Известно, что точность инерциальных навигационных систем (ИНС), зависит не только от погрешностей инерциальных датчиков, но и от адекватности модели, используемой для описания их погрешности, что определяет актуальность задачи.

В настоящей работе рассматривается инерциальная навигационная система полуаналитического типа, построенная на поплавковых чувствительных элементах, установленных на стабилизированной платформе [3]. Обработка информации в ИНС в режиме калибровки и в рабочем режиме производится с использованием фильтра Калмана [1–4], на вход которого подается разность координат и скоростей, вырабатываемая инерциальной системой и внешними источниками навигационной информации, например спутниковой навигационной системой и относительным лагом.

Как известно, система термостабилизации поплавкового гироскопа осуществляется подогревом жидкости до температуры, несколько превышающей максимальную рабочую температуру окружающей среды [5]. Однако при варьировании температуры жидкости меняется и ее плотность. Вследствие этого можно наблюдать изменение плавучести поплавка, что и приводит к появлению дополнительного ухода гироскопа. Для компенсации такого ухода гироскопа необходимо по данным стендовых испытаний оценить зависимость ухода гироскопа от изменения температуры и составить соответствующую модель. Применение такой температурной модели гироскопа особенно востребовано как в режиме прогрева гироскопического прибора, в который уставлен гироскоп, так и в рабочем режиме ИНС.

Вопросы идентификации модели погрешности датчиков рассматривались в ряде работ [6–12], в частности в [6] рассматривается метод, основанный на вариациях Аллана. В [7] был использован метод построения выборочной корреляционной функции, в [9] предложен метод на основе обобщенного фильтра Калмана с гауссовской аппроксимацией апостериорной плотности, а в [8, 10] изложен метод на базе алгоритмов нелинейной фильтрации, используемый в настоящей работе. Применительно к рассматриваемой ИНС задача идентификации параметров модели ухода гироскопа была рассмотрена в [7, 11, 12], тем не менее необходимо отметить, что в [7, 12] температурная погрешность не рассматривалась, а в [11] точность метода, используемого при решении задачи идентификации, была недостаточно высока. В этой связи в настоящей работе была поставлена задача оценить возможность применения метода нелинейной фильтрации, показавшего высокую точность при решении задачи идентификации в [6, 8, 10], для определения параметров температурной модели погрешности поплавкового гироскопа.

Задача идентификации параметров модели ухода гироскопа. Уход гироскопа рассматриваемой ИНС описывается в виде суммы двух составляющих: случайной константы $\bar{\varepsilon}(t)$ и марковского процесса первого порядка $\tilde{\varepsilon}(t)$. Для учета температурной зависимости нужно было расширить существующую модель случайного ухода следующим образом [7]:

$$\dot{\varepsilon}(t) = -\alpha\varepsilon(t) + \beta T(t) + \sqrt{2\alpha\sigma_\varepsilon^2}\,\xi(t)\ ,\ \varepsilon(0) \in N\left\{0, \sigma_\varepsilon^2\right\}, \qquad (1)$$

где $\xi(t)$ – гауссовский белый шум единичной интенсивности, не коррелированный с $\tilde{\varepsilon}(0)$; $\tilde{\varepsilon}(0)$ – центрированная случайная величина, распределенная по нормальному закону с дисперсией σ_ε^2; $\alpha = 1/\tau$, где τ – неизвестный интервал корреляции; β – неизвестный параметр модели; $T(t)$ – температура внутри гироскопа.

Задача идентификации может быть сформулирована как задача оценки неизвестных параметров модели α и β по измерениям ухода гироскопа (1), которые были записаны при испытаниях в условиях известного с высокой точностью изменения температуры *T*.

Для определения параметров α и β модели (1) был программно реализован метод, построенный на базе алгоритма идентификации, заключающийся во включении в вектор состояния неизвестных параметров модели и использования банка фильтров Калмана [6]. Результаты моделирования приведены на рис. 1–2 и сведены в табл. 1. В этой же таблице показаны результаты идентификации, полученные в [9] с использованием обобщенного фильтра Калмана для линеаризованной модели измерений. Результаты сравнения двух алгоритмов показали, что относительная погрешность оценивания параметра α для нелинейного алгоритма на 62% меньше, чем для алгоритма на основе обобщенного фильтра Калмана.

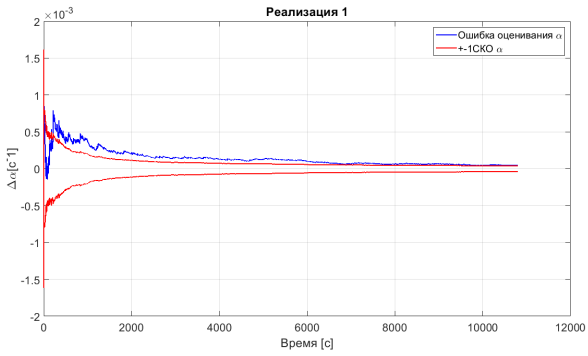


Рис.1 Ошибка оценивания температурного параметра α

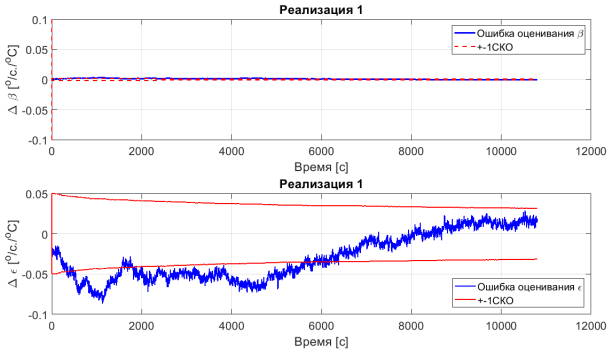


Рис.2 Ошибка оценивания температурного параметра β и марковского процесса первого порядка

Таблица 1

Результаты идентификации неизвестных параметров

Метод идентификации	Параметр α			Параметр β		
	α, c^{-1}	$\hat{\alpha}, c^{-1}$	$\Delta\alpha_{отн}, \%$	$\beta, °/(c \cdot °C)$	$\hat{\beta}, °/(c \cdot °C)$	$\Delta\beta_{отн}, \%$
Алгоритм на основе обобщенного фильтра Калмана	0.00055	0.00041	18.2	-0.001	-0.0011	10.0
Алгоритм в рамках байесовского подхода	0.00055	0.000512	6.9	-0.001	-0.0009	10.0

Заключение. Рассмотрена задача идентификации параметров модели ухода гироскопа, учитывающей влияние температуры. Показано, что точность оценивания неизвестных параметров модели с использованием алгоритмов нелинейной фильтрации существенно превышает точность оценивания с применением соотношений фильтра Калмана для линеаризованной модели измерений.

Дальнейшее направление исследований связано с обработкой натурных данных, полученных при испытаниях гироскопов на предприятии–изготовителе, а также с исследованием влияния погрешности идентификации параметров модели ухода гироскопа на точность определения координат инерциальной навигационной системой.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ № 18-08-01101А.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Степанов О.А** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.2. Введение в теорию фильтрации. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 427 с.
2. **Емельянцев Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации; акад. Пешехонов В.Г. (общ.ред.) ; Нац. исслед. ун-т ИТМО. СПб., 2016. 393 с.

3. **Вайсгант И.Б., Литвиненко Ю.А.** Погрешности выработки навигационных параметров платформенными инерциальными системами среднего класса точности в зависимости от широты места. Известия вузов Приборостроение №9., 2002.
4. **Stepanov O.A.** Optimal and sub-optimal filtering in integrated navigation systems // Aerospace Navigation Systems. NY: JohnWiley&Sons. 2016. P. 244–298.
5. **Веселов В.А., Гробовой Р.Н., Ипатов О.С., Кузнецов В.Г., Медведев В.И.** Гироскопические измерительные приборы и устройства учебное пособие: Учебное пособие. Балт. гос. техн. Ун-т. СПб., 2003. 122 с. Сер.: Элементы аналоговых систем автоматики и их применение
6. **Моторин А.В., Степанов О.А.** Проблемно-ориентированный подход к решению задачи идентификации моделей погрешностей навигационных датчиков и оцениваемых сигналов // Материалы пленарных заседаний 9-ой Российской мультиконференции по проблемам управления. АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор" IFAC. 2016. С.49–60.
7. **Тупысев В.А., Круглова Н.Д., Моторин А.В.** Субоптимальные алгоритмы идентификации погрешностей навигационных датчиков, описываемых марковским процессом // Гироскопия и навигация Том. 24, № 3 (94), 2016 с. 55–62. DOI: 10.17285/0869-7035.2016.24.2.056-067.
8. **Моторин А.В.** Идентификация моделей погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции методами нелинейной фильтрации. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. СПб., 2017. 134с.
9. **Тупысев В.А., Иванов Д.П.** Особенности применения фильтров калмановского типа при нелинейности в уравнениях динамики // XXXI Конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова, 2018г.
10. **Моторин А.В.** Идентификация моделей погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции методами нелинейной фильтрации // Материалы XX конференции молодых ученых с международным участием «Навигация и управление движением». Науч. ред. О.А. Степанов. Под общ. ред. В.Г. Пешехонова. 2018. С. 151–153.
11. **Иванов Д.П., Литвиненко Ю.А., Тупысев В.А.** Сравнение подходов к идентификации неизвестных параметров модели ухода гироскопа // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018г. Том 18. № 5(117). С. 885-893
12. **Гостева Н.Д., Литвиненко Ю.А.** Исследование математической модели ухода двухстепенного поплавкового гироскопа // Сборник докладов 15 конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». 2013. С. 117–126

M.I. Slukina, Yu.A. Litvinenko (State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC; ITMO University, St. Petersburg). **Temperature error parameters identification by nonlinear filtering methods for a floated one-axis gyroscope**

Abstract. The paper describes the problem of parameters identification for a gyroscope drift model, using the nonlinear filtering algorithms. The unknown parameters of the model considered are the reciprocal of the correlation interval of the first-order Markovian process, which describes a random component of the gyroscope drift; and a coefficient that determines the effect of temperature change. Simulation results are compared to the identification problem solution obtained with the aid of extended Kalman filter.

УДК 681.51

В.Т. ЛЕ, К.Д. ВО, Со ТАР
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЛИНЕЙНО ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ВО ВРЕМЕНИ ПАРАМЕТРОВ

Рассматривается проблема идентификации неизвестных переменных параметров для классической линейной регрессионной модели. Предлагается новый алгоритм, позволяющий, в случае выполнения ряда допущений, обеспечивать оценку неизвестных переменных параметров с нулевой ошибкой. Приводится пример компьютерного моделирования, иллюстрирующий работоспособность рассматриваемого в работе алгоритма.

Введение. В докладе рассматривается новый подход к идентификации не измеряемых нестационарных параметров с неизвестной динамикой. Подобные задачи идентификации нестационарных параметров возникают в широком спектре приложений современной теории управления и обработки сигналов. В работах [1, 2] был представлен новый алгоритм идентификации нестационарных параметров для линейной регрессионной модели. Этот алгоритм можно применять для идентификации параметров сложных технических систем, например при управлении движением робототехнических систем [3], электромеханическими объектами [4], а также при управлении фотоэлектрическими батареями [5].

Постановка задачи. Рассмотрим классическую линейную регрессионную модель вида

$$y(t) = m^{\mathrm{T}}(t)\theta(t), \tag{1}$$

где $y(t) \in R^1$ и $m(t) \in R^n$ – известные скалярная и векторная функции, $\theta(t) \in R^n$ – вектор неизвестных переменных параметров.

Для простоты рассмотрим регрессионную модель (1), состоящую из трех элементов

$$y(t) = m_1(t)\theta_1(t) + m_2(t)\theta_2(t) + m_3(t)\theta_3(t), \tag{2}$$

где $m_1(t)$, $m_2(t)$, $m_3(t)$ – известные скалярные функции, $\theta_1(t)$, $\theta_2(t)$, $\theta_3(t)$ – неизвестные нестационарные параметры.

Будем полагать, что $\theta_i(t)$ обладает следующим свойством

$$\dot{\theta}_i = \beta_i = \begin{cases} \beta_{i,1} \ при\ 0 \le t < t_{i,2}, \\ \beta_{i,2} \ при\ t_{i,2} \le t < t_{i,3}, \\ \vdots \\ \beta_{i,q} \ при\ t_{i,q} \le t < t_{i,q+1}, \end{cases} \tag{3}$$

где $\beta_{i,j}$ и $t_{i,j}$ – неизвестные числа, $j = 1,..,q$, причем $t_{i,j}$ определяет моменты времени, когда в j-й раз меняется скорость вариации параметра $\theta_i(t)$.

Описание алгоритма. Для вывода основного результата проведем ряд преобразований результатом, которого является линейная регрессионная модель в компактном виде (подробнее см. [1, 2])

$$Y_* = \beta_1 M_1 + \beta_2 M_2 + \beta_3 M_3, \tag{4}$$

где Y_*, M_1 и M_2, M_3 – известные скалярные функции времени.

Научный руководитель д.т.н., проф. Бобцов А.А.

Следуя технологии динамического расширения регрессора DREM [6, 7], введем 2 блока запаздывания с значениями τ_k, $k = \overline{1,2}$ и получим матричное уравнение вида

$$Y_e = M_e \beta, \tag{5}$$

где $Y_e = \begin{bmatrix} Y_*(t) \\ Y_*(t-\tau_1) \\ Y_*(t-\tau_2) \end{bmatrix}$, $M_e = \begin{bmatrix} M^{\mathrm{T}}(t) \\ M^{\mathrm{T}}(t-\tau_1) \\ M^{\mathrm{T}}(t-\tau_2) \end{bmatrix}$, $M = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix}$.

Умножая (5) на $\mathrm{adj}\{M_e\}$ (т.е. союзную матрицу для M_e), получаем

$$Y(t) = \Delta(t)\beta,$$

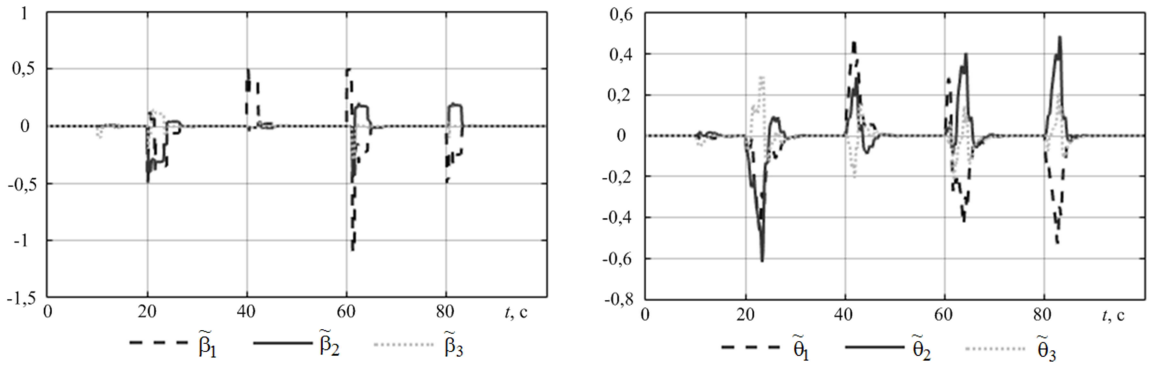
где $\Delta = \det\{M_e\} \in R^1$ – определитель матрицы M_e, $Y = \mathrm{adj}\{M_e\}Y_e$, $Y_i = \Delta\beta_i$, $i = 1,2,3$.

Тогда оценки $\beta_i(t)$ и θ_i будем отыскивать по формулам

$$\dot{\hat{\beta}}_i = -\gamma_i \Delta(\Delta\hat{\beta}_i - Y_i), \tag{6}$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \hat{\beta} - \kappa m m^T \hat{\theta} + \kappa m y, \tag{7}$$

где γ_i, к – любые положительные числа.



а б

Рис. Графики оценок параметров ошибки $\tilde{\beta}_i$ (а) и $\tilde{\theta}_i$ (б)

Результаты моделирования. Для иллюстрации работоспособности предлагаемого алгоритма идентификации рассмотрим следующий пример. Пусть элементы регрессора $m(t) \in R^n$ имеют вид $m_1 = 8\sin(4t)$, $m_2 = 8\sin(3t)$, $m_3 = 8\sin(6t)$, а параметры определяются как

$$\beta_1 = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \le t < 20, \\ 0,5 & \text{при } 20 \le t < 40, \\ 0 & \text{при } 40 \le t < 60, \\ -0,5 & \text{при } 60 \le t < 80, \\ 0 & \text{при } 80 \le t < 100, \end{cases} \quad \beta_2 = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \le t < 20, \\ 0,25 & \text{при } 20 \le t < 100 \end{cases} \text{ и } \beta_3 = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \le t < 20, \\ 0,1 & \text{при } 10 \le t < 100. \end{cases}$$

Выберем параметры $\tau_1 = 0,1$, $\tau_2 = 0,2$, $\gamma_i = 0,1$, $\kappa = 0,04$ и проведем компьютерное моделирование. На рисунке представлены графики оценок параметров ошибки $\tilde{\beta}_i$, а также $\tilde{\theta}_i$, где $\tilde{\beta}_i = \hat{\beta}_i - \beta_i$ и $\tilde{\theta}_i = \hat{\theta}_i - \theta_i$. Очевидно, что ошибка оценивания параметров $\tilde{\beta}_i$ и $\tilde{\theta}_i$ асимптотически стремится к нулю.

Заключение. Представлен новый алгоритм идентификации неизвестных нестационарных параметров, удовлетворяющих (3), для регрессионной модели (1), (2). Получена регрессионная модель (4) и для идентификации параметров использованы алгоритмы (6) и (7), позволяющие получить высокое быстродействие сходимости оценок неизвестных параметров к их истинным значениям.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ле В., Бобцов А.А., Пыркин А.А.** Новый алгоритм идентификации нестационарных параметров для линейной регрессионной модели // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 952–955.
2. **Ван Ц., Ле В.Т., Пыркин А.А., Колюбин С.А., Бобцов А.А.** Идентификация кусочно-линейных параметров регрессионных моделей нестационарных детерминированных систем // Автоматика и телемеханика. 2018. № 12. С. 71–82.
3. **Kolyubin S., Shiriaev A., Jubien A.** Refining Dynamics Identification for Co-Bots: Case Study on KUKA LWR4+ // 20th IFAC World Congress. 2017.
4. **Бобцов А.А., Пыркин А.А., Ортега Р.** Адаптивный наблюдатель магнитного потока для синхронного двигателя с постоянными магнитами. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 1. С. 40–45.
5. **Pyrkin, A., Mancilla-David, F., Ortega, R., Bobtsov, A., Aranovskiy, S.** Identification of photovoltaic arrays' maximum power extraction point via dynamic regressor extension and mixing // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2017. V. 31. № 9. P. 1337–1349.
6. **Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A.** Parameters Estimation via Dynamic Regressor Extension and Mixing // American Control Conference. 2016. P. 6971–6976.
7. **Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A.** Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing // IEEE Transactions on Automatic Control. 2016. V. 62. № 7. P. 3546–3550.

V.T. Le, Q.D. Vo, So Tar (ITMO University, Saint-Petersburg). **Identification algorithm for variable linear time-varying parameters**

Abstract. The problem of identification of unknown variable parameters for the classical linear regression model is considered. A new algorithm is proposed that guarantees in case of a set of assumptions existence an estimate of unknown parameters with a zero error. An example of computer simulation is given that illustrates the operability of the algorithm that considered in the work.

УДК 681.51

В.Т. ЛЕ, К.Д. ВО, Со ТАР
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЧАСТОТЫ СМЕЩЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО СИГНАЛА С НЕСТАЦИОНАРНЫМИ АМПЛИТУДОЙ И СМЕЩЕНИЕМ

Работа посвящена задаче идентификации частоты смещенного синусоидального сигнала для случая, когда его амплитуда и смещение являются нестационарными и неизвестными функциями. Предложена параметризация, приводящая исходное нелинейное уравнение к стандартной линейной регрессионной модели. Для полученной регрессионной модели синтезирован интегральный алгоритм идентификации.

Введение. Задача идентификации частот синусоидальных сигналов для случая стационарных амплитуд и смещений хорошо изучена и широко представлена в современной литературе (например, [1–4]). Известные методы решения этой задачи обеспечивают глобальную асимптотическую сходимость настраиваемых параметров к истинным значениям. Однако в большинстве известных методов, включая [1–4], амплитуды синусоидальных сигналов и смещения являются постоянными числами. В работе [5] был опубликован метод идентификации частоты синусоидального сигнала в случае нестационарной амплитуды. Недостатком метода [5] является допущение об амплитуде синусоидального сигнала, относительно которой предполагалось, что она представляет собой сигнал, полученный путем умножения неизвестного числа на известную функцию. В данной работе предлагается расширение задачи [5] на случай неизвестной, изменяющейся линейно во времени амплитуды. Предлагаемый подход базируется на новом результате [6], обеспечивающем идентификацию нестационарных параметров для линейной регрессионной модели. Полученный алгоритм может быть использован при решении ряда технических задач, связанных с компенсацией или подавлением возмущений и/или ошибок измерений, описываемых гармоническим или полигармоническим сигналами.

Постановка задачи. Рассмотрим измеряемый смещенный синусоидальный сигнал вида

$$y(t) = A_1 + A_2 \sin \omega t\,, \tag{1}$$

где ω – неизвестное число, $A_1(t)$ и $A_2(t)$ – неизвестные функции времени такие, что

$$\dot{A}_i = \beta_i = \begin{cases} \beta_{i,1} \ при\ 0 \le t < t_{i,2}, \\ \beta_{i,2} \ при\ t_{i,2} \le t < t_{i,3}, \\ \vdots \\ \beta_{i,q} \ при\ t_{i,q} \le t < t_{i,q+1}, \end{cases}$$

где $\beta_{i,j}$ и $t_{i,j}$ – неизвестные числа, $j = 1,..., q$, причем $t_{i,j}$ определяет моменты времени, когда в j-ый раз меняется скорость вариации параметра $A_i(t)$.

Ставится задача синтеза алгоритма идентификации

$$\hat{\omega}(t) = f(y)\,,$$

обеспечивающего асимптотическую сходимость функции $\hat{\omega}(t)$ к неизвестному числу ω

$$\lim_{t\to\infty} \left|\hat{\omega}(t) - \omega\right| = 0\,.$$

Описание алгоритма. Для оценивания параметра $\theta = \omega^2$ регрессионной модели, следуя работе [7], проведем ряд специальных преобразований. В результате этих преобразований получаем простейшую линейную регрессионную модель с одним неизвестным параметром

Научный руководитель д.т.н., проф. Бобцов А.А.

$$z_1 = \theta\phi_1, \tag{2}$$

где z_1 – специальным образом преобразованное измерение и ϕ_1 – некоторая известная функция.

Для оценивания параметра θ воспользуемся интегральным алгоритмом следующего вида

$$\dot{\hat{\theta}} = -k\hat{\theta}\varphi_1^2 + k\varphi_1 z_1, \tag{3}$$

где $k > 0$ – коэффициент настройки быстродействия сходимости.

Пример. Для иллюстрации работоспособности алгоритма идентификации (3) промоделируем пример, для которого параметры $A_1(t)$ и $A_2(t)$ изменяются следующим образом (рис. 1):

$$\dot{A}_1 = \beta_1 = \begin{cases} 0 \text{ при } 0 \le t < 50, \\ 0{,}01 \text{ при } 50 \le t < 100, \\ 0 \text{ при } 100 \le t < 250, \end{cases} \qquad \dot{A}_2 = \beta_2 = \begin{cases} 0 \text{ при } 0 \le t < 50, \\ -0{,}01 \text{ при } 50 \le t < 100, \\ 0 \text{ при } 100 \le t < 150, \\ 0{,}02 \text{ при } 150 \le t < 200, \\ 0 \text{ при } 200 \le t < 250. \end{cases}$$

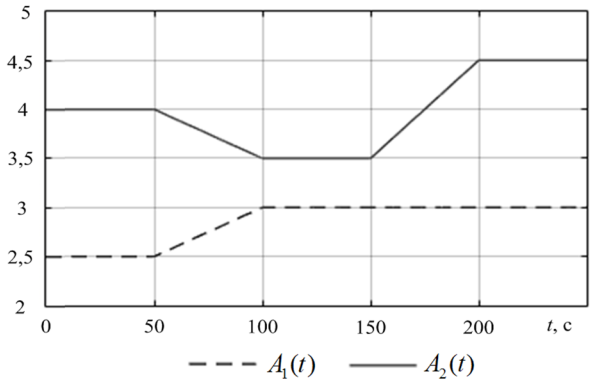


Рис. 1. График параметров $A_1(t)$ и $A_2(t)$ во времени

Пусть ω=3, тогда $y(t) = A_1 + A_2 \sin 3t$. Выберем параметр k=3000 и проведем компьютерное моделирование. Графики переходных процессов оценки параметров $\hat{\theta}(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ представлены на рис. 2. Как видно из графиков переходных процессов, функция $\hat{\omega}(t)$ асимптотически стремится к ω=3.

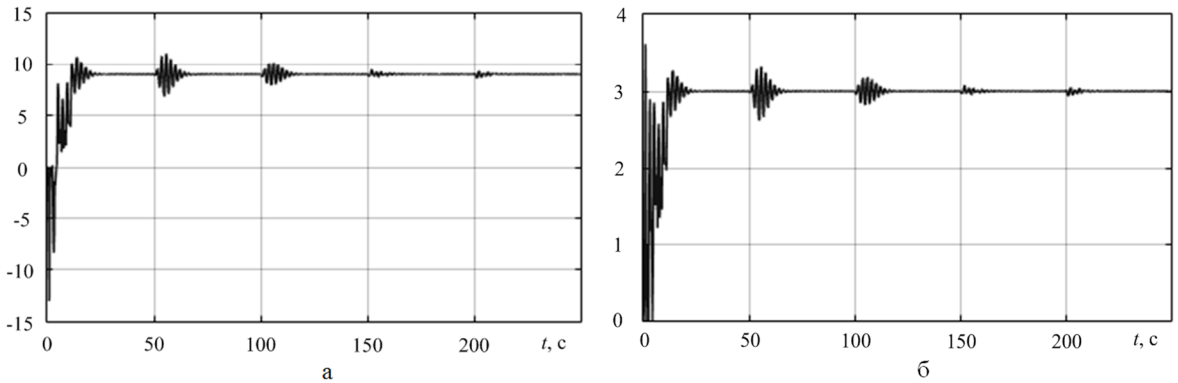


Рис. 2. Графики оценок параметров $\hat{\theta}(t)$ (а) и $\hat{\omega}(t)$ (б) для ω=3

Заключение. В работе предложен метод идентификации частоты смещенного синусоидального сигнала вида (1). Для решения поставленной задачи проведено преобразование сигнала (1) к более удобному виду (2) и применен интегральный алгоритм настройки параметра (3). Для иллюстрации работоспособности представлено компьютерное моделирование, демонстрирующее параметрическую сходимость переменной $\hat{\theta}$ алгоритма (3) к истинному значению θ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O.** Identification of frequency of biased harmonic signal // European Journal of Control. 2010. V. 16. N 2. P. 129–139.
2. **Hou M.** Parameter Identification of Sinusoids // IEEE Transactions on Automatic Control. 2012. V. 57. N 2. P. 467–472.
3. **Marino R., Tomei P.** Frequency estimation of periodic signals // European Control Conference. 2014. P. 7–12.
4. Pyrkin A.A., Bobtsov A.A., Vedyakov A.A., Kolyubin S.A. Estimation of polyharmonic signal parameters // Automation and Remote Control. 2015. V. 76. N 8. P. 1400–1416.
5. **Vedyakov A.A., Vediakova A.O., Bobtsov A.A., Pyrkin A.A., Aranovskiy S.V.** A globally convergent frequency estimator of a sinusoidal signal with a time-varying amplitude // European Journal of Control. 2017. V. 38. P. 32–38.
6. **Ле В.Т., Бобцов А.А., Пыркин А.А.** Новый алгоритм идентификации нестационарных параметров для линейной регрессионной модели // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 5. С. 952–955.
7. **Ле В.Т., Бобцов А.А.** Идентификация параметров синусоидального сигнала с неизвестной нестационарной амплитудой // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 976–981.

V.T. Le, Q.D. Vo, So Tar (ITMO University, Saint-Petersburg). **Algorithm of frequency identification for biased sinusoidal signal with variable amplitude and displacement**

Abstract. The work is devoted to the problem of the frequency identification for a biased sinusoidal signal in the case when its amplitude and displacement are variable and unknown functions. A parametrization was proposed, transferring the original nonlinear equation to the form of a standard linear regression model. For the obtained regression model an integral identification algorithm was synthesized.

УДК 519.712

И.А. ЛЕНЬ
(Санкт-Петербургский государственный университет)

СИСТЕМА ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ МЕЖДУ ИСТОЧНИКАМИ СИГНАЛОВ

Рассматривается задача разработки прототипа системы оптимизации распределения целей наблюдения между сенсорами и сравнения распределения целей с разными ограничениями. Предлагается алгоритм решения этой задачи с помощью методов полуопределенного программирования.

Введение. В современном мире средства беспроводной коммуникации активно развиваются, чем вызывают повышенный интерес к возможностям их использования для сенсорных сетей. Чаще всего рассматривается интеллектуальное слежение в местах большого скопления людей, миграции животных, изучение космоса [1–3].

Собранные с сенсора данные содержат погрешность в силу изначальной неточности прибора или возмущений из внешней среды. Уменьшить погрешность можно с помощью увеличения числа сенсоров. Однако количество наблюдаемых целей тоже может возрасти, из-за чего могут возникнуть коммуникационные, вычислительные проблемы [4]. Следовательно, появляется потребность в ограничении количества целей, за которым следит каждый сенсор с минимальными потерями в точности вычислений. Таким образом, возникает задача распределения целей между наблюдателями.

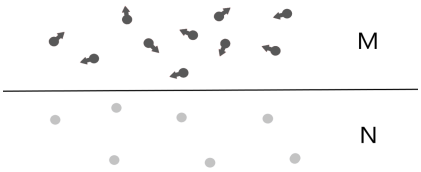


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи, где сенсоры обозначены светло-серым, их *n=7*, а цели – серым, их *m=10*.

Постановка задачи. Рассмотрим модель, в которой есть n сенсоров и m целей (рис. 1). Пусть s_t^j – положение j-го сенсора ($j \in N, N = \{1,2...n\}$), x_t^i – положение i-ой цели ($i \in M, M = \{1,2...m\}$) в момент времени t. От каждого сенсора поступают данные о траектории некой цели в момент времени t, которые задаются следующим уравнением:

$$y_t^{i,j} = \varphi(s_t^j, x_t^i) + v_t^{i,j}, \tag{1}$$

где φ – функция, отражающая измерения положения цели i сенсором j, $v_t^{i,j}$ – независимые помехи измерений с нулевым математическим ожиданием.

Для каждого измерения построен доверительный эллипсоид с уровнем достоверности p. Для повышения точности вычисления положения будем искать их пересечение. В статье [5] доказано, что вероятность нахождения искомой точки внутри пересечения доверительных эллипсоидов равна *1 – 3p*. Следовательно, для каждой цели необходимо уменьшить объем пересечения эллипсоидов, количество которых определяется количеством наблюдателей за ней, с учетом ограничения на количество сенсоров в следящей за целью группе и количества целей, за которым следит каждый сенсор. Таким образом, можно сформулировать следующую задачу минимизации:

$$F_t = \sum_{i=1}^{m} \Phi_t^i + \alpha \sum_{i=1}^{m} |S_t^i| + \beta \sum_{j=1}^{n} |T_t^j| \longrightarrow \min, \tag{2}$$

где: Φ_t^i – объем пересечения доверительных эллипсоидов для i-ой цели; S_t^i – множество сенсоров, которое следит за i-ой целью; T_t^j – множество целей, за которым следит j-ый сенсор, $|\cdot|$ – мощность множества (количество элементов), α и β малые коэффициенты регуляризации. При нулевых α и β решение задачи (2) дает наиболее точные оценки положения целей. При уве-

Научный руководитель д.ф.-м.н., проф. Граничин О.Н.

личении α будет возрастать суммарный вклад количества сенсоров, следящих за каждой из целей, т.е. вместе с задачей повышения точности оценивания будет решаться задача минимизации количества сенсоров, следящих за каждой из целей. При увеличении β будет возрастать вклад суммарной нагрузки на каждый из сенсоров (количества целей, за которыми следят каждый из сенсоров), т.е. наряду с задачей повышения точности оценивания будет решаться задача минимизации количества целей, за которыми следит каждый из сенсоров. Другими словами, коэффициент α отвечает за вклад в функционал качества стоимостей коммуникации между сенсорами, а β – за ограниченность ресурсов сенсоров.

Необходимо реализовать прототип программного комплекса, который решает задачу (2), и проверить, как влияет введение ограничения на количество сенсоров, которое может следить за целью.

Описание системы. Введем матрицу ресурсов $G_t = [g_t^{i,j}]: g_t^{i,j} = 1$, если сенсор j следит за целью i, иначе $g_t^{i,j} = 0$. Согласно [6], воспользуемся «овыпуклением» задачи (2), приведя ее к следующему виду:

$$F_t^* = \sum_{i=1}^{m} \Phi_t^i + \alpha \sum_{i=1}^{m} || G_t^{(i,\cdot)} ||_1 + \beta \sum_{j=1}^{n} || G_t^{(\cdot,j)} ||_1 \longrightarrow min, \tag{3}$$

где: $||\cdot||_1$ – l_1-норма: $||x||_1 = \sum_{i=1}^{v} |x_i|$; $G_t^{(i,\cdot)}$ – множество сенсоров, следящих за i-ой целью (сенсор входит в это множество, если для соответствующей цели в матрице значение $g_t^{i,j} = 1$); $(i,\cdot)$ в верхнем индексе обозначает i-ю строку G_t; $G_t^{(\cdot,j)}$ – множество целей, за которым следит сенсор j (аналогично, цель принадлежит этому множеству, если $g_t^{i,j} = 1$ для сенсора j); $(\cdot, j)$ в верхнем индексе обозначает j-й столбец G_t.

Для решения задачи (3) при β=0 в [7] был выбран алгоритм, основанный на решении системы LMI (линейных матричных неравенств). Этот метод появился впервые в работе [8] и совместно с l_1 оптимизацией стал удобным инструментом для решения ряда задач, в особенности при анализе и сведении в единое целое данных анализа линейных систем [9]. В настоящей работе используется аналогичный описанному в статье [7] алгоритм, результатом работы которого является матрица ресурсов G_t, где на позиции $\{i, j\}$ – вклад сенсора j в точность вычислений. Так как вклад не может равняться «абсолютному» нулю, введем порог значимости вклада: если значение $g_t^{i,j}$ меньше этого порога, то сенсор j не участвует в группе слежения за целью i.

В качестве языка программирования для системы был выбран Python 3 и библиотека для решения задач полуопределенного программирования «cvxpy».

Эксперимент. Для эксперимента возьмем 4 цели и 6 сенсоров. Определим функцию φ следующим образом:

$$\varphi(s_t^j, x_t^i) = \begin{bmatrix} \psi(s_t^j, x_t^i) \\ \rho(s_t^j, x_t^i) \end{bmatrix}, \tag{4}$$

где $\psi(s_t^j, x_t^i)$ – угол между направлением от сенсора на север и направлением на цель, $\rho(s_t^j, x_t^i)$ – расстояние между сенсором и целью.

Необходимо проверить влияние наличия регулирующего коэффициента β. Возьмем α=0.5, β=0, тогда в результате моделирования матрица G_t выглядит следующим образом:

$$G_t = \begin{pmatrix} 0.44 & 0.34 & 0.02 & 0.00 & 0.00 & 0.34 \\ 0.31 & 0.21 & 0.00 & 0.16 & 0.00 & 0.40 \\ 0.00 & 0.55 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.49 \\ 0.00 & 0.25 & 0.00 & 0.00 & 0.01 & 0.84 \end{pmatrix}, \tag{5}$$

где строки соответствуют целям, а столбцы – сенсорам. Если значение на позиции *{i, j}* равно 0, значит, *j*-й сенсор не следит за *i*-й целью. По матрице (5) видно, что наиболее нагруженными являются 2 и 6 сенсоры, так как им приходится следить за всеми целями (во 2 и 6 столбцах отсутствуют нулевые значения).

При α=0.5, β=0.5 матрица G_t принимает вид:

$$G_t = \begin{pmatrix} 0.55 & 0.93 & 0.74 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.32 & 0.88 & 0.00 & 0.00 & 0.65 \\ 0.00 & 0.00 & 0.83 & 0.00 & 0.46 & 0.00 \\ 0.99 & 0.69 & 0.00 & 0.34 & 0.00 & 0.00 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

В матрице (6) отсутствуют столбцы, в которых все элементы ненулевые, следовательно, вычислительная нагрузка на 2 и 6 сенсор уменьшилась.

Заключение. В работе разработан прототип системы, оптимизирующей распределение целей слежения между сенсорами. В ходе эксперимента, где использовалось ограничение только на количество сенсоров, следящих за целью, было выявлено, что некоторые сенсоры вынуждены следить за всеми целями. При добавлении ограничения на количество целей, за которым следит сенсор, эта проблема была частично решена.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hanif A., Mansoor A.B., Imran A.S.** Deep multi-view correspondence for identity-aware multi-target tracking // In Proc. of 2017 International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA). 2017. P. 1–8.
2. **Thite A., Mishra A.** Optimized multi-sensor multi-target tracking algorithm for air surveillance system // In Proc. of 2016 2nd International Conference on Advances in Electrical, Electronics, Information, Communication and Bio-Informatics (AEEICB). 2016. P. 637–642.
3. **Jia B., Pham K.D., Blasch E., Shen D., Wang Z., Chen G.** Cooperative space object tracking using space-based optical sensors via consensus-based filters // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2016. V. 52. No. 4. P. 1908–1936.
4. **Wei B., Nener B., Liu W., Ma L.** Centralized multi-sensor multi-target tracking with labeled random finite sets // In Proc. of International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS). 2016. P. 82–87.
5. **Ерофеева В.А.** Оптимизация распределения целей между наблюдателями и оценивание состояний с помощью циклического подхода // Стохастическая оптимизация в информатике. 2018. Т. 52. С. 330.
6. **Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С.** Разреженная обратная связь в линейных системах управления // Автоматика и телемеханика. 2014. № 12. С. 13–27.
7. **Erofeeva V., Granichin O., Leonova A**. Comparison of multi-sensor task assignment inequalities vs. brute force methods: linear matrix // IFAC-PapersOnLine, vol. 51, is. 32, 2018, pp. 648–653.
8. **Якубович В. А.** Метод матричных неравенств в теории устойчивости нелинейных регулируемых систем. I. Абсолютная устойчивость вынужденных колебаний // Автоматика и телемеханика. 1964. Т. 25. №7. С. 1017–1029.
9. S**. Boyd, L. El Ghaoui, E. Feron et al. Siam** Linear matrix inequalities in system and control theory. 1994. Vol. 15

I.A. Len (Saint Petersburg State University, Saint Petersburg). **System for optimizing the distribution of observers between signal sources**

Abstract. In this paper we study the task of developing a prototype system to optimize the distribution of observation objects between sensors. An algorithm for solving this problem is proposed using semi-defined programming methods.

УДК 004.02

А.Н. СЕРГЕЕНКО
(Санкт-Петербургский государственный университет)

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА, ОСНОВАННОГО НА ДЕЗОКСИРИБОНУКЛЕИНОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ, ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ

Рассматривается алгоритм решения задачи о коммивояжере, основанный на дезоксирибонуклеиновых-вычислениях (ДНК-вычислениях). Приводится сравнение его трудоемкости с трудоемкостью переборных алгоритмов.

Введение. Задача о коммивояжере является классической задачей комбинаторной оптимизации. Она относится к числу NP-полных (non-deterministic polynomial) и трансвычислительных задач, то есть она не может быть решена методом перебора для числа городов, больших 66, за время, меньшее возраста Вселенной [1]. На текущий момент существуют несколько путей ее решения, таких как простейший перебор, муравьиный алгоритм, генетический алгоритм, алгоритм динамического программирования и др., однако большинство из них имеют экспоненциально растущую сложность. В 1994 году [2] Эдлман показал, что существует еще один возможный алгоритм нахождения кратчайшего пути, основанный на ДНК-вычислениях, трудоемкость которого не растет экспоненциально в зависимости от объема входных данных. ДНК-вычисления – метод расчета, использующий молекулы ДНК, а также предполагающий выполнение работы в биофизической лаборатории. Основное преимущество ДНК-вычислений по сравнению с перечисленными выше алгоритмами состоит в том, что при решении задачи о коммивояжере всевозможные маршруты генерируются параллельно, а не последовательно.

Поиск новых способов решения задачи о коммивояжере и сравнение их трудоемкостей представляет собой как фундаментальный интерес, так как на основе этой задачи возможно построить принцип работы новых компьютеров [3, 4], так и практический: задачи о построении оптимальных схем движений, распознавании траекторий, образов решаются с помощью задачи о коммивояжере.

Постановка задачи. В настоящей работе теоретически исследуется метод решения задачи с помощью ДНК-вычислений, а также сравнивается его трудоемкость с трудоемкостью метода перебора.

Предположим, что требуется найти кратчайший маршрут из Санкт-Петербурга в Москву с учетом того, что необходимо побывать единожды во Владимире, Ярославле, Костроме, Суздале и Иванове, причем возможные варианты передвижения следующие: Санкт-Петербург–Москва, Санкт-Петербург–Ярославль, Санкт-Петербург–Кострома, Ярославль–Суздаль, Ярославль–Кострома, Суздаль–Иваново, Суздаль–Владимир, Владимир–Ярославль, Кострома–Ярославль, Кострома–Владимир, Иваново–Кострома, Иваново–Владимир, Иваново–Москва.

Ход решения. С помощью ДНК-вычислений можно построить следующее решение этой задачи: пусть каждому городу соответствует некоторая случайная последовательность 20 нуклеотидов. Напомним, что нуклеотид – это мономер ДНК [5]. Тогда для возможных путей передвижения запишем последовательности, построенные по следующему принципу: от города отправления берется соответствующая ему вторая половина нуклеотидов, от города прибытия – комплементарная ему первая половина.

Все последующие этапы проводятся в биофизической лаборатории. Сначала необходимо добавить все последовательности нуклеотидов, соответствующие городам и путям передвижения в одну пробирку. Благодаря комплементарности [5] образуются двухцепочечные ДНК, которые будут означать всевозможные варианты маршрутов. Стоит отметить, что все маршруты генерируются одновременно, причем время для образования маршрутов одинаково как для маленьких графов, так и для больших. Именно в этом шаге состоит основное преимущество

Научный руководитель д.ф.-м.н., профессор Граничин О.Н.

ДНК-вычислений – параллельность. Все остальные шаги направлены на выделение молекулы, соответствующей гамильтонову пути [5]. Далее, с помощью полимеразной цепной реакции (ПЦР) [5] необходимо увеличить количество ДНК-молекул с началом и концом в заданных городах (Санкт-Петербург, Москва). В ходе ПЦР помимо копирования нужных маршрутов будут также накапливаться маршруты, начинающиеся в Санкт-Петербурге, но не заканчивающиеся в Москве, а также наоборот. Стоит отметить, что скорость копирования таких молекул будет заметно ниже, так что после ПЦР мы получим преобладающее количество нужных нам ДНК-молекул. Потом необходимо отобрать молекулы, которым соответствует нужное нам количество городов, так как по условию задачи нужно посетить все города по одному разу. Для этого проводится электрофорез [5]. Электрофорез – это метод разделения ДНК по длине из-за движения отрицательно заряженных молекул ДНК между порами геля под действием электрического поля от катода к аноду. Чем короче молекула, тем быстрее она пройдет через поры геля. Размер участков ДНК возможно определить после электрофореза, сопоставляя их с молекулами известной длины. Таким образом, в пробирке преимущественно находятся маршруты длиной в 7 городов, начинающиеся в Санкт-Петербурге и заканчивающихся в Москве. После следует этап проверки посещения всех городов. Для этого используется метод аффинной хроматографии [5]: ДНК-молекулы проверяются на наличие городов поочередно [5]. На выходе мы получаем только те молекулы, которые содержат нужные нам. На последнем этапе остается только прочитать (секвенировать) ДНК-молекулы и сопоставить полученные последовательности нуклеотидов с возможными путями. Эти последовательности являются решением поставленной задачи.

Сравнение двух методов. Время, которое требуется на реализацию ДНК-вычислений, не зависит от количества городов N и является константой. Однако сложность алгоритма ДНК-вычислений растет как N+86400 в связи с необходимостью сопоставления последовательности нуклеотидов городам и путям передвижения. При этом время, требуемое на решение задачи методом перебора, в случае несимметричной задачи растет как (N–1)! Выбор константы для расчета трудоемкости алгоритма ДНК-вычислений является оценочным и обусловлен нормировкой на метод перебора, так как для проведения ПЦР, электрофореза, аффинной хроматографии и секвенирования ДНК требуется определенное постоянное количество времени.

На рис. 1 представлено сравнение трудоемкостей для алгоритма, основанного на ДНК-вычислениях, и алгоритма перебора. Наблюдается существенное увеличение сложности для решения при увеличении количества городов при переборе вариантов, в то время как время необходимое для ДНК-вычислений растет линейно и является возможным даже при больших N.

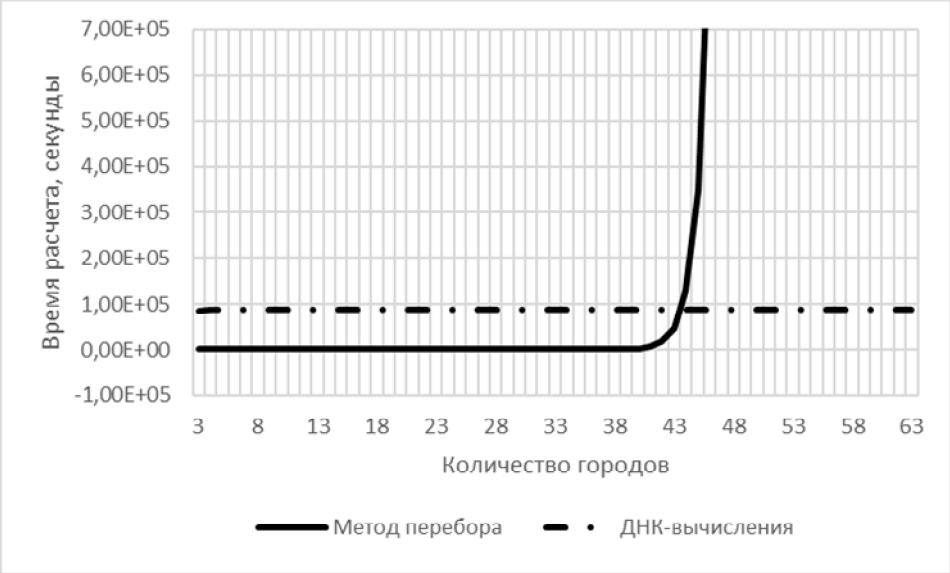


Рис 1. Сравнение трудоемкостей метода перебора и алгоритма, основанного на ДНК-вычислениях

Заключение. В настоящей работе рассмотрен процесс ДНК-вычислений и показано его применение в решении задачи о коммивояжере, а также приведен график сравнения трудоемкости ДНК-вычислений с трудоемкостью переборных алгоритмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Klir, George J.** Facets of systems science. Springer, 1991. P. 121–128
2. **Adleman, L.M.** Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems. Science, New Series, Vol. 266, No. 5187 (Nov. 11, 1994) pp. 1021–102
3. **Garg, S.; Shah, S.; Bui, H.; Song, T.; Mokhtar, R.; Reif, J.** Renewable Time-Responsive DNA Circuits. Small. 2018 Jul 18
4. **Eshra, A.; Shah, S.; Song, T.; Reif, J.** Renewable DNA hairpin-based logic circuits // IEEE Transactions on Nanotechnology, 2019
5. **Martyn A.** Theoretical and Experimental DNA Computation. Springer, 2005

A. N. Sergeenko (St. Petersburg State University). **Applications of the DNA-computing for solving a combinatorial problem.**

Abstract. In this paper we study the approach of solving the travelling salesman problem, based on DNA-computing. We also compare the laboriousness of this algorithm with the laboriousness of exhaustive method and give recommendations which one is better to use.

УДК 535-45

В.А. ШУЛЕПОВ, С.М. АКСАРИН, В.Е. СТРИГАЛЕВ
(Университет ИТМО)

СТАБИЛИЗАЦИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ VCSEL С ВНЕШНИМ РЕЗОНАТОРОМ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА

Работа посвящена стабилизации центральной длины волны излучения VCSEL путем создания внешнего резонатора на основе волоконных решеток Брэгга. Проведено исследование влияния длины и коэффициента отражения решетки на спектральные характеристики полупроводникового лазера с вертикальным резонатором. В результате получены значения среднего квадратичного отклонения вариации центральной длины волны излучения VCSEL для каждого рассматриваемого случая.

Введение. Vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) – полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором, который представляет интерес для работы с волоконной оптикой благодаря своим особенностям, к которым можно отнести, во-первых, низкий пороговый ток, порядка единиц миллиампер, что достигается благодаря высокому коэффициенту отражения зеркал, во-вторых, излучение в одночастотном режиме благодаря резонатору длиной порядка нескольких микрометров, в-третьих, высокая эффективность стыковки с оптическим волокном [1], по сравнению с полупроводниковыми лазерами с торцевым излучением, что достигается из-за диаграммы направленности излучения VCSEL круглой формы [2], в-четвертых, лазерный диод с вертикальным резонатором имеет линейно поляризованное излучения с коэффициентом поляризационной экстинкции порядка 30 дБ. Не смотря на наличие в структуре резонатора VCSEL второго зеркала с высоким коэффициентом отражения (около 99,5%), лазер сохраняет высокую чувствительность к коррелированным обратным отражениям, следовательно, необходимо в достаточной мере обеспечить их подавление или контроль для возможности практического применения лазеров в высокоточных приборах, то есть повысить стабильность излучения. С другой стороны, статическое или динамическое изменение колебаний мощности VCSEL из-за оптической обратной связи может быть использовано для оптического переключения, детектирования и управления.

На данный момент основной областью применения VCSEL являются телекоммуникации, однако наличие линейно поляризованного излучения позволяет его применять в волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиках, которые являются одними из наиболее точных волоконно-оптических устройств [3]. Авторами ранее уже проведено исследование [4] влияния длины внешнего резонатора с волоконной брэгговской решеткой на излучение VCSEL, благодаря которому удалось повысить стабильность излучения. Предлагаемый доклад посвящен исследованию влияния различных параметров брэгговских решеток, а именно длины решетки и коэффициента отражения, на параметры излучения VCSEL.

Стабилизация центральной длины волны излучения VCSEL с внешним резонатором на основе волоконных решеток Брэгга. На картине спектра излучения VCSEL наблюдаются две основные ортогональные моды, между которыми перекачивается мощность при воздействии обратных отражений, поэтому основная рабочая мода не стабильна во времени [5, 6]. Под стабилизацией центральной длины волны излучения VCSEL подразумевается снижение величины отклонения центральной длины волны во времени путем создания внешнего резонатора с использованием волоконной брэгговской решетки (ВБР). Таким образом, проведена работа по стабилизации с использованием решеток с различным коэффициентом отражения: 51%, 63% и 95% одинаковой длины 14 мм, а также с использованием решеток различной длины: 1 мм и 3 мм, но с одинаковым коэффициентом отражения 60%. Выбор таких параметров решеток обусловлен технологическими особенностями при записи ВБР, а также необходимостью иметь достаточно высокий коэффициент отражения для экспериментального воздействия.

Излучение из VCSEL вводилось с минимальным зазором в оптическое волокно, с записанной в него волоконной решеткой Брэгга, затем поступало на интеррогатор. Воздействие обратных отражений решетки может как улучшить, так и ухудшить чистоту спектра излучения, по-

этому для подстройки необходимой длины волны брэгговского резонанса решетка размещалась на элементе Пельтье, рис. 1. Торец волокна выполнен со скосом 8° для уменьшения влияния обратных отражений на лазерный диод.

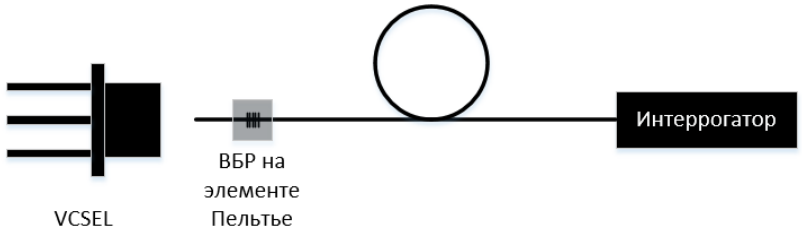


Рис. 1. Схема исследования

Затем для каждого случая получены значения центральной длины волны излучения лазера во времени, результаты представлены на рис. 2.

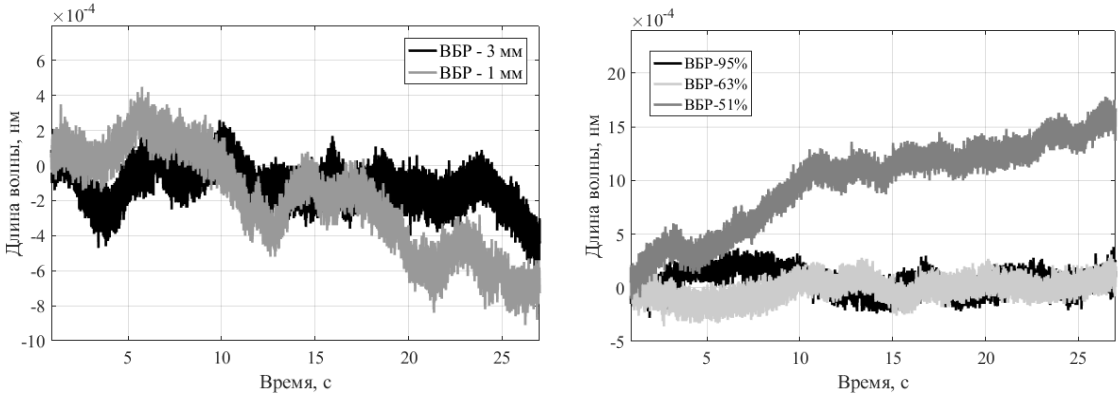


Рис. 2. Изменение центральной длины волны излучения VCSEL во времени. Слева: длина решетки 3 мм – черный, 1 мм – серый; справа: коэффициент отражения решетки 95% – черный, 63% – светло-серый, 51% – темно-серый

Из рис. 2 видно, что две ВБР с одинаковым коэффициентом отражения, но одна длиной 1 мм, а вторая – 3 мм, воздействуют на излучение лазера практически одинаково. Были получены значения среднего квадратичного отклонения (СКО) вариации центральной длины волны излучения по уровню 3σ, которые для обеих решеток составили 0,6 пм. Для второго исследования с различными коэффициентами отражения решеток были получены следующие значения:

Таблица

СКО вариации центральной длины волны излучения VCSEL при различных коэффициентах отражения ВБР

Коэффициент отражения решетки	95%	63%	51%
СКО вариации центральной длины волны VCSEL по уровню 3σ, пм	0,31	0,41	0,56

Из данных таблицы можно сделать вывод, что наблюдается увеличение СКО вариации центральной длины волны излучения VCSEL при уменьшении коэффициента отражения решетки.

Заключение. Проведено исследование влияния на характер излучения VCSEL длины и коэффициента отражения брэгговских решеток в качестве внешнего резонатора. Получено, что при исследовании двух решеток с близким коэффициентом отражения, около 60%, но одна длиной 1 мм, а вторая – 3 мм, в обоих случаях величина среднего квадратичного отклонения вариации центральной длины волны излучения VCSEL по уровню 3σ составила 0,6 пм. Аналогичное исследование для решеток с другими коэффициентами отражения запланировано и будет проведено в дальнейшем. В результате исследования влияния коэффициента отражения решетки проведена работа с решетками одинаковой длины, но с коэффициентами отражения 51%, 63% и 95% и получено, что среднее квадратичное отклонение вариации центральной длины волны излучения VCSEL увеличивается при уменьшении коэффициента отражения решетки, и для случая с решеткой 95% оно составило 0,31 пм.

Таким образом, экспериментально получено, что наилучшими с точки зрения величины вариации центральной длины волны излучения параметрами волоконной брэгговской решетки для использования в качестве внешнего резонатора VCSEL является коэффициент отражения 95% при длине решетки 14 мм. Для решеток с коэффициентом отражения около 60% и длинами 1 мм и 3 мм величина вариации центральной длины волны излучения VCSEL отличается незначительно. В дальнейшем планируется продолжение работы с набором решеток с другими параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **T. Mizunami, T. Hamada и T. Yamamoto.** External-Fiber-Grating Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, т. 12, №11, 2000.
2. **Schwarz S.** Impact of Waveguide Input Coupling on Vertical Cavity Surface Emitting Laser Diodes, Wien, 2009
3. **Окоси Т., Окамото К., Оцу М.** Волоконно-оптические датчики. Ленинград: Энергоатомиздат, 1986.
4. **Шулепов В.А., Аксарин С.М., Стригалев В.Е.** Влияние длины внешнего резонатора с волоконной решеткой Брэгга на спектр излучения лазера с вертикально излучающим резонатором // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, т. 19. № 1. С. 15-20, 2019.
5. **Hashizume N. и Nasu H.** Mode Hopping Control and Lasing Wavelength Stabilization of Fiber Grating Lasers, № 20, 2001.
6. **Law J. Y. и Agrawal G. P.** Effects of Optical Feedback on Static and Dynamic Characteristics of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, т. 3, № 2, 1997.

V.A. Shulepov, S.M. Aksarin, V.E. Strigalev (ITMO University, Saint-Petersburg). **Stabilization of the central wavelength of a VCSEL with an external resonator based on fiber Bragg grating**

Abstract. This work is dedicated to stabilizing the VCSEL central wavelength by creating an external resonator based on Bragg fiber gratings. The influence of the length and reflection coefficient of the grating on the VCSEL spectral characteristics has been studied. As a result, the values of the mean square deviation of the variation of the VCSEL central wavelength radiation were obtained for each case considered.

УДК 681.51

М.М. СИНЕТОВА, А.А. ВЕДЯКОВ, А.А. ПЫРКИН
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

СИНТЕЗ НАБЛЮДАТЕЛЕЙ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ МОДЕЛИ

Предлагается адаптивный наблюдатель состояния, который позволяет параметризовать нелинейную модель как линейное уравнение регрессора. Линейная регрессия включает неизвестные параметры и неизмеримые состояния. Используется подход динамического расширения и смешивания регрессоров, позволяющий генерировать из N-мерной линейной векторной регрессии N моделей скалярной регрессии.

Введение. Проектирование наблюдателей состояния систем является одной из центральных проблем в теории управления и теории систем, которая в течение нескольких лет привлекала внимание многих исследователей [1, 2]. Проблема особенно сложна, если система нелинейная и некоторые ее параметры неизвестны. Построение наблюдателей рассматривается на примере построения наблюдателя потока в синхронном двигателе с постоянными магнитами (СДПМ), который является, с одной стороны, робастным относительно смещений в измерениях, и с другой стороны, обеспечивает сходимость всех ошибок оценивания к нулю с такими характеристиками качества, как монотонность оценок и возможность регулирования скорости сходимости.

Постановка задачи. Рассмотрим классическую двухфазную αβ модель ненасыщенного неявнополюсного СДПМ, описанную в [1, 3]

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} &= v - Ri, \\ j\dot{\omega} &= -f\omega + \tau_e - \tau_L, \\ \dot{\theta} &= \omega, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\lambda \in \mathbb{R}^2$ – общий магнитный поток, $i \in \mathbb{R}^2$ – токи, $v \in \mathbb{R}^2$ – напряжения, $R > 0$ – сопротивление обмоток статора, $j > 0$ – момент инерции ротора, $\theta \in \mathbb{S} := [0,\ 2\pi]$ – фаза ротора, ω – механическая угловая скорость, $f > 0$ – коэффициент вязкого трения, $\tau_L \in \mathbb{R}$ – возможный меняющийся во времени крутящий момент нагрузки, τ_e – крутящий момент электрического происхождения, является нелинейной функцией потока и имеет вид:

$$\tau_e = n_p i^{\mathsf{T}} J \lambda$$

при $n_p \in \mathbb{N}$ – число пар полюсов и $J \in \mathbb{R}^{2\times 2}$ – матрица вращения, $J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$.

Для поверхностного монтажа СДПМ общий поток удовлетворяет следующему условию [1]:

$$\lambda = Li + \lambda_m C(\theta), \tag{2}$$

где $L > 0$ – индуктивность статора, λ_m – магнитный поток от постоянных магнитов и $C(\theta) := col(\cos(n_p\theta), \sin(n_p\theta))$. Единственными доступными для измерений сигналами являются токи i и напряжения v, которые искажены неизвестными постоянными ошибками измерения (смещениями) $\delta_i \in \mathbb{R}^2$ и $\delta_v \in \mathbb{R}^2$ соответственно, то есть

$$i_m = i + \delta_i, \qquad v_m = v + \delta_v, \tag{3}$$

где i_m и v_m – фактически измеренные сигналы. Сопротивление R и индуктивность L предполагаются известными. Цель состоит в том, чтобы оценить общий магнитный поток λ с асимптотической сходимостью ошибок оценивания к 0.

Построение адаптивного наблюдателя. Адаптивный наблюдатель потока СДПМ был предложен в [2] и основан на уравнении

$$\left|\lambda - Li\right|^2 - \lambda_m^2 = 0\,, \tag{4}$$

которое следует из (2). Подход [2] требует только измерения напряжения v и тока i, однако предполагает, что электрические сигналы измеряются без ошибок. Однако даже если шум отсутствует, смещение сигнала всегда возможно, что следует учитывать, чтобы гарантировать робастность адаптивного наблюдателя.

Работа [4] посвящена случаю, когда измеренные сигналы v и i содержат неизвестные смещения $\delta_i \in \mathbb{R}^2$ и $\delta_v \in \mathbb{R}^2$, предполагаемые постоянными. Учитывая результаты [4], выражение (4) может быть переписано как

$$\lambda^{\mathsf{T}}\lambda - 2L\lambda^{\mathsf{T}} i_m - 2L\lambda^{\mathsf{T}}\eta_1 + i_m\eta_2 + \eta_3 = 0\,, \tag{5}$$

где $\eta_1 = 2L\delta_i$, $\eta_2 = -2L^2\delta_i$, $\eta_3 = L^2\delta_i{}^{\mathsf{T}}\delta_i - \lambda_m^2$ – неизвестные константы.

Подход [4] был расширен в [5], что позволило находить линейное уравнение регрессора относительно неопределенного потока λ и набора неизвестных параметров и измеримых сигналов.

Утверждение 1. Рассмотрим модель СДПМ (1) с измеримыми сигналами (3), искаженными неопределенными смещениями. Модель регрессии, учитывая результаты [5], может быть представлена как

$$\lambda = -Ri_m + v_m + \eta_m\,, \qquad y = \Phi^{\mathsf{T}}\lambda + \Psi^{\mathsf{T}}\eta + \varepsilon_t\,, \tag{6}$$

где y, Φ, Ψ – известные функции, которые могут быть вычислены на основе измеренных сигналов и неизвестных постоянных векторов

$$\eta_m = R\delta_i - \delta_v\,, \quad \eta = [\eta_1 \;\; \eta_2 \;\; \eta_m \;\; \eta_m^{\mathsf{T}}\eta_m]^{\mathsf{T}}\,,$$

ε_t – экспоненциальный член, возникающий после применения фильтров.

Предлагается применить процедуру динамического расширения и смешивания регрессора (DREM – dynamic regressor extension and mixing) [6], чтобы повысить характеристики наблюдателя (6) по сравнению с [4]. Непосредственно, процедура DREM не применима к модели (6), так как λ является функцией времени, поэтому, пренебрегая экспоненциальным членом ε_t, применим линейный стационарный фильтр с некоторым коэффициентом адаптации $\alpha > 0$ ко второму уравнению (6)

$$\begin{aligned}\frac{\alpha}{p+\alpha}y &= \frac{\alpha}{p+\alpha}\Phi^{\mathsf{T}}\lambda + \frac{\alpha}{p+\alpha}\Psi^{\mathsf{T}}\eta = \lambda^{\mathsf{T}}\frac{\alpha}{p+\alpha}\Phi - \frac{1}{p+\alpha}\left(\dot{\lambda}^{\mathsf{T}}\frac{\alpha}{p+\alpha}\Phi\right) + \eta^{\mathsf{T}}\frac{\alpha}{p+\alpha}\Psi = \\ &= \lambda^{\mathsf{T}}\frac{\alpha}{p+\alpha}\Phi - \frac{1}{p+\alpha}\left(\left(-Ri_m + v_m + \eta_m\right)^{\mathsf{T}}\frac{\alpha}{p+\alpha}\Phi\right) + \eta^{\mathsf{T}}\frac{\alpha}{p+\alpha}\Psi,\end{aligned} \tag{8}$$

и перепишем как

$$z_\alpha = \lambda^{\mathsf{T}}\bar{\Phi}_\alpha + \eta^{\mathsf{T}}\bar{\Psi}_\alpha\,, \tag{9}$$

где $z_\alpha = \frac{\alpha}{p+\alpha}y + \frac{1}{p+\alpha}\left(\left(-Ri_m + v_m\right)^{\mathsf{T}}\frac{\alpha}{p+\alpha}\Phi\right)$, $\bar{\Phi}_\alpha = \frac{\alpha}{p+\alpha}\Phi$, $\bar{\Psi}_\alpha = \frac{\alpha}{p+\alpha}\Psi - \begin{bmatrix}0\\0\\1\\0\end{bmatrix}\frac{\alpha^2}{(p+\alpha)^2}\Phi$.

В матричной форме (9) выглядит как

$$Z(t) = M(t)\begin{bmatrix}\lambda(t)\\ \eta\end{bmatrix},$$

где $Z(t) := \begin{bmatrix} z_1(t) \\ \vdots \\ z_N(t) \end{bmatrix}$, $M(t) := \begin{bmatrix} \overline{\Phi}_1^{\mathsf{T}} & \overline{\Psi}_1^{\mathsf{T}} \\ \vdots & \vdots \\ \overline{\Phi}_N^{\mathsf{T}} & \overline{\Psi}_N^{\mathsf{T}} \end{bmatrix}$, $N = \dim\lambda + \dim\eta = 9$.

«Смешение» регрессора выполнено с целью получения набора N скалярных уравнений:

$$adj\left(M(t)\right)Z(t) = adj\left(M(t)\right)M(t)\begin{bmatrix}\lambda(t)\\ \eta\end{bmatrix} = \det\left(M(t)\right)\begin{bmatrix}\lambda(t)\\ \eta\end{bmatrix}$$

или

$$Y_\lambda(t) = \Delta(t)\lambda(t)\,, \tag{10}$$

$$Y_\eta(t) = \Delta(t)\eta\,, \tag{11}$$

где $Y(t) := \begin{bmatrix} Y_\lambda(t) \\ Y_\eta(t) \end{bmatrix} = adj\left(M(t)\right)Z(t)$ и $\Delta(t) = \det\left(M(t)\right)$.

Задача синтеза наблюдателя потока может быть решена при использовании скалярных уравнений (10) и (11), что показано в следующем Утверждении.

Утверждение 2. Рассмотрим параметризированную модель СДПМ (6). Покажем, что закон

$$\dot{\hat{\eta}} = \gamma_\eta\Delta(Y_\eta - \Delta\hat{\eta})\,, \tag{12}$$

$$\dot{\hat{\lambda}} = -Ri_m + v_m + \hat{\eta}_m + \gamma_\lambda\Delta(Y_\lambda - \Delta\hat{\lambda})\,, \tag{13}$$

обеспечивает асимптотическую сходимость $\tilde{\lambda} = \lambda - \hat{\lambda}$ и $\tilde{\eta} = \eta - \hat{\eta}$ к 0 для $\gamma_\eta, \gamma_\lambda > 0$.

Доказательство. Вычислим производные ошибок $\tilde{\eta}$ и $\tilde{\lambda}$

$$\dot{\tilde{\eta}}(t) = -\gamma_\eta\Delta^2(t)\tilde{\eta}\,, \quad \dot{\tilde{\lambda}}(t) = -\gamma_\lambda\Delta^2(t)\tilde{\lambda} + \tilde{\eta}_m\,,$$

что дает $\tilde{\eta}(t) = e^{-\gamma_\eta\int_0^t\Delta^2(s)ds}\tilde{\eta}(0)$. Сходимость $\tilde{\eta}$ зависит от свойств $\Delta(t)$ и коэффициента усиления γ_η. Если $\Delta(t)$ удовлетворяет условию незатухающего возбуждения, то $\tilde{\eta}$ экспоненциально сходится к 0, что гарантирует сходимость $\tilde{\lambda}$ к 0, как доказано в [7, Лемма1]. Если возбуждение отсутствует, но $\Delta(t) \notin L_2$, то $\tilde{\lambda}$ стремится к 0 асимптотически. В противном случае $\tilde{\lambda}$ сходится к ограниченному множеству вблизи 0.

Заключение. Предлагается новый алгоритм построения адаптивного наблюдателя, который позволяет параметризовать модель СДПМ, как линейное уравнение регрессора относительно наблюдаемого потока и некоторых констант в зависимости от ошибок измерения. Используя процедуру DREM, векторное регрессорное уравнение может быть разбито на набор скалярных регрессорных уравнений с общим измеримым регрессором и неизвестными переменными или параметрами. Такое разложение позволяет гарантировать монотонность сходимости ошибок оценивания к нулю и регулировать скорость сходимости с помощью коэффициентов адаптации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Nam K.** AC motor control and electric vehicle applications // CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010. P. 435.
2. **Bobtsov A.A., Pyrkin A.A., Ortega R., Vukosavic S.N., Stankovic A.M., Panteley E.V.** A robust globally convergent position observer for the permanent magnet synchronous motor. *Automatica*. 2015. Vol. 61, pp. 47-54.
3. **Krause P.C.** Analysis of electric machinery // New York : McGraw Hill, 1986. P. 564.
4. **Pyrkin A.A., Vedyakov A.A., Ortega R., Bobtsov A.A.** A robust adaptive flux observer for a class of electromechanical systems. *International Journal of Control*. 2018.
5. **Bernard P., Praly L.** Robustness of rotor position observer for permanent magnet synchronous motors with unknown magnet flux. *Automatica*. 2018. Vol. 94, pp. 88-93.

6. **Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A.** Parameters estimation via dynamic regressor extension and mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2017. Vol. 62. I. 7, pp. 3546-3550.
7. **Aranovskiy S., Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Ortega R., Chaillet A.** Flux and position observer of permanent magnet synchronous motors with relaxed persistency of excitation conditions. *IFAC-PapersOnLine*. 2015. Vol. 48, no. 11, pp. 301—306

M.M.Sinetova, A.A.Vedyakov, A.A.Pyrkin, (ITMO University, St. Petersburg) . **Synthesis of observers for nonlinear systems based on dynamic regressor extension and mixing**

Abstract. In this paper we propose and adaptive state observer for a class of uncertain nonlinear systems. A linear regression involving unknown parameters and unmeasurable states is established. We use the recently proposed dynamic regressor extension and mixing approach, whose main feature is that it allows to generate, out of an N-dimensional, linear vector regression, N scalar regression models. Moreover, under a weak interval excitation assumption, it ensures nitetime parameter convergence.

УДК 621.391.13

О.В. ЗАЙЦЕВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ПРОГНОЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ПОПРАВОК ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ОГРАНИЧЕНИЙ

Разработаны экономичные алгоритмы прогнозирования дифференциальных поправок глобальных навигационных спутниковых систем. Алгоритмы позволяют учесть известные ограничения на величину поправок и их производные. Путем обработки натурных реализаций поправок к кодовым измерениям глобальных навигационных спутниковых систем в камеральном режиме проведен сопоставительный анализ точности алгоритмов их прогноза на интервалах до 1000 с.

Введение. С помощью дифференциальных поправок, поставляемых базовой станцией, потребители навигационной информации глобальных навигационных спутниковых систем имеют возможность компенсировать значительную часть погрешностей «сырых» спутниковых измерений и благодаря этому определять свое местоположение с более высокой точностью. При использовании ДП к кодовым измерениям среднеквадратическая ошибка (СКО) координат составляет порядка 0,5 м. При автономной обработке данных ГНСС СКО координат даже в благоприятных условиях приема сигналов находятся на уровне нескольких метров, а при неблагоприятных может насчитывать десятки метров. При очевидных достоинствах использования ДП получение их актуальных значений на практике сталкивается со следующими трудностями: 1) возникают перерывы в поступлении поправок из-за сбоев в радиоканале их передачи и сбоях на базовой станции [1]; 2) с увеличением возраста поправок (времени от ее формирования до ее использования) их точность деградирует; 3) стандартный способ экстраполяции ДП по коэффициентам их линейного тренда, предусмотренного в формате *RTCM*, не эффективен из-за низкой точности этих коэффициентов, которая определяется лишь по последним значениям поправки [2].

Ввиду трудномоделируемого поведения ДП при обработке следует обратить внимание на класс подходов, работающих в условиях неопределенности стохастических моделей. Адаптивные многоальтернативные методы позволяют подобрать наиболее адекватную модель за счет перебора большого числа возможных гипотез о характере процесса [3, 4]. С ростом числа гипотез шансы удачно подобрать модель увеличиваются, но вместе с тем значительно возрастают требования к вычислительным ресурсам, что исключает возможность применения таких алгоритмов в бортовых условиях. Существенное сокращение вычислительной сложности многоальтернативных методов возможно лишь при выполнении специальных условий [5, 6]. Робастные гарантирующие методы позволяют жестко не привязываться к стохастическому описанию динамики сигнала, а указать лишь пределы его изменения: ограничения на уровень сигнала, величину или дисперсии их производных [7, 8]. При этом всегда гарантируется определенная точность оценок. В работах [7, 8] вводятся ограничения на уровень сигнала, величину или дисперсии их производных, однако допускается только стационарное поведение процесса. Это ограничение снимается в подходе, предложенном в [9, 10].

Другим известным методам прогнозирования процессов во временной области, не использующих стохастический подход, свойственны определенные недостатки: трудоемкость (метод главных компонент [11]), эмпирический характер некоторых предположений, влияющих на точность (метод авторегрессии [12]), низкая скорость обучения алгоритмов и значительное время сходимости (нейросети [13]).

В настоящей работе рассматривается задача прогноза низкочастотной составляющей ДП. Она решается на основе метода [14], использующего полиномиальную модель оцениваемого сигнала. Его преимуществом является возможность учета априорной информации в виде ограничений на сигнал и его производную без необходимых при классическом стохастическом подходе уравнений формирующего фильтра.

Научный руководитель д.т.н. Кошаев Д.А.

На основе разработанного алгоритма может быть создано эффективное программное обеспечение для приемников ГНСС и инерциально-спутниковых систем, предусматривающее работу в дифференциальном режиме в условиях неустойчивого приема поправок.

Постановка задачи. Пусть для дискретных моментов времени $t_k = t_0 + k\Delta t$, $k = \overline{-m,0}$, $m > 0$ с интервалом дискретности Δt имеются значения ДП к измерениям одного и того же спутника, которые имеют вид

$$d_k = g(t_k) + v_k, \tag{1}$$

где v_k – дискретный белый шум с центрированным гауссовским распределением при известной дисперсии, $g(t)$ – низкочастотная составляющая ДП. Представим $g(t)$ на интервале $[t_{-m}; t_n]$ с положительным целым n как

$$g(t) = c\rho(t), \tag{2}$$

где

$$\rho(t) = b_0 + b_2(t - t_{-m})/T + (b_1 - b_0 - b_2)(t - t_{-m})^2/T^2 = B(t)b, \tag{3}$$

$$|\rho(t)| \le 1, \qquad |\dot{\rho}(t)| \le \bar{\dot{\rho}}, \tag{4}$$

b_0, b_1, b_2 – постоянные коэффициенты, $T = (m+n)\Delta t$, $b = (b_0, b_1, b_2)^T$, $B(t)$ – матрица-строка, c и $\bar{\dot{\rho}}$ – заданные параметры. Требуется спрогнозировать $g(t_n)$, используя в качестве измерений ДП (1), предусмотрев применение полученных при этом промежуточных результатов для прогноза $g(t_{n+1})$. Хотя речь здесь идет только о прогнозе низкочастотной составляющей ДП $g(t)$, далее для краткости будем иногда говорить о задаче прогноза ДП, понимая, что шумовая составляющая v_k, являясь случайной последовательностью, не поддается прогнозированию.

Алгоритмы прогноза. В работе рассматриваются следующие 4 алгоритма прогноза ДП:

1) Алгоритм квадратичного прогноза с учетом ограничений (КПО), который предполагает решение сформулированной выше задачи с учетом выражений (2), (3) и неравенств (4), ограничивающих величину $g(t)$ и ее производную.
2) Алгоритм квадратичного прогноза (КП), подразумевающий параболическую аппроксимацию $g(t)$ на интервале $[t_{-m}; t_n]$ без учета ограничений.
3) Алгоритм линейного прогноза с ограничениями (ЛПО), который выполняет прогноз g на момент t_n по формуле

$$g(t_n) = g(t_0) + \dot{g}(t_0)(t_n - t_0), \; n=1,2,\ldots \tag{5}$$

в предположении, что для $g(t)$ на интервале $[t_{-m}; t_0]$ справедливы (2) – (4).

4) Алгоритм линейного прогноза (ЛП) аналогичен ЛПО в предположении, что $g(t)$ на интервале $[t_{-m}; t_0]$ представляется в виде неограниченной параболы.

Кроме того, как простейший вариант прогноза рассматривается фиксация последней ДП (ФП), т.е. $g(t_n) = d_0$, $n=1,2,\ldots$

Результаты обработки экспериментальных данных. Путем обработки натурных данных проведено сопоставление алгоритмов КП, ЛП, КПО, ЛПО, а также ФП. Для эксперимента использованы ДП к кодовым измерениям в формате RTCM – сообщения RTCM21 [2], полученные с помощью приемника NovAtel DL-V3 с дискретностью Δt=1с. Эффективность алгоритмов оценивалась по значениям СКО, которые рассчитывались по множеству реализаций ДП от 30 различных спутников. Реализации ДП, соответствующие участкам прогноза, применялись в качестве эталонных значений при формировании ошибки оценки. Количество обрабатываемых в алгоритмах ДП принималось равным числу шагов прогноза, т.е. m+1=n.

Были использованы две выборки реализаций ДП, полученные на суточных интервалах в разное время года, что исключало одинаковое состояние ионосферы и уменьшало сходство поведения ДП в двух выборках. Каждая выборка включает 55 непрерывных реализаций ДП. В обоих выборках присутствуют реализации ДП различного характера – монотонно изменяющихся в течение продолжительного времени и колебательные. Первая выборка использована в качестве обучающей для алгоритмов КПО и ЛПО, а вторая – тестовой. На основе решений, полученных по обучающей выборке, определены такие c из (2) и $\bar{\dot{\rho}}$ из второго неравенства (4), которые обеспечивают минимум СКО. При этом $\bar{\dot{\rho}}$ зависит от длительности прогноза, а c можно считать константой. Далее алгоритмы КПО, ЛПО, настроенные на установленные по обучающим решениям c и $\bar{\dot{\rho}}$, проходили апробацию по тестовой выборке реализаций ДП.

Информация об СКО сравниваемых алгоритмов для двух точек прогноза (500 с и 1000 с), сведена в таблицу.

Таблица

СКО (м) по ансамблю реализаций для множеств 1 и 2

	Обучение		Тестирование	
Алгоритм прогноза	Длительность прогноза, с			
	500	1000	500	1000
КП	3,75	3,6	2,7	2,8
ЛП	2,3	2,2	1,4	1,9
ФП	0,81	1,78	0,86	2
КПО	0,85	1,64	0,88	2,1
ЛПО	0,78	1,42	0,8	1,8

Заключение. Предложены и апробированы на натурных данных экономичные в вычислительном плане алгоритмы прогноза ДП с полиномиальной моделью и ограничениями, которые могут быть использованы в реальном времени. Проведен сравнительный анализ точности алгоритмов КПО и ЛПО с алгоритмами КП, ЛП и ФП. Мерой точности алгоритмов являлось СКО по множеству реализаций ДП к кодовым измерениям, что соответствует информации от 30 различных спутников.

Результаты показали, что ЛПО наиболее эффективен для прогноза ДП смешанного типа при длительности измерений, равной длительности прогноза. На 1000 с прогноза ЛПО обеспечивает 10-15% выигрыш по точности по отношению к КПО и ФП. Эффект от КПО менее заметен, но он тем не менее превосходит ФКП и ЛП, а алгоритму ФП не проигрывает. Таким образом, КПО и ЛПО можно рекомендовать для прогнозирования ДП различного характера на длительности до 1000 с.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ № 18-08-01101А

ЛИТЕРАТУРА

1. **Комаровский Ю. А.** Сбои приёма дифференциальных поправок // Вестник морского государственного университета. 2011. №34. С. 39–44.
2. RTCM recommended standards for differential GNSS (global navigation satellite systems) service.
3. Version 2.3 developed by RTCM special committee no. 104 august 20, 2001
4. **Дмитриев С.П., Степанов О.А.** Многоальтернативная фильтрация в задачах обработки навигационной информации. Радиотехника. 2004. №7. С. 11–17.
5. **Дмитриев С.П., Кошаев Д.А., Степанов О.А.** Многоканальная фильтрация и ее применение для исключения неоднозначности при позиционировании объектов с помощью GPS // Изв. РАН. Теория и системы управления. 1997. № 1. С. 65–70.
6. **Кошаев Д.А.** Многоальтернативный метод обнаружения и оценки нарушений на основе расширенного фильтра Калмана // АиТ. 2010. №5. С. 70–83.
7. **Кошаев Д.А.** Метод фиктивных измерений для многоальтернативного оценивания процессов в линейной стохастической системе // АиТ. 2016. №6. С.81–108
8. **Кулакова В. И., Небылов А. В.** Гарантированное оценивание сигналов с ограниченными дисперсиями производных //Автоматика и телемеханика. 2008. № 1. С. 83–96

9. **Лопарев А.В., Степанов О.А., Кулакова В.И.** Приближенное решение задачи робастной фильтрации с использованием метода локальных аппроксимаций спектральных плотностей. Гироскопия и навигация, 2013. №3(82). С. 85–90.
10. **Куржанский А.Б.** Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: Наука, 1977.
11. **Матасов А.И.** Метод гарантирующего оценивания. М.: Изд-во МГУ, 2009.
12. **Голяндина Н.Э.** Метод «Гусеница»-SSA: анализ временных рядов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 87 с.
13. **Козионов А. П., Пяйт А. Л., Мохов И. И., Иванов Ю. П.** Исследование алгоритмов восстановления пропусков в измеряемых сигналах для системы мониторинга состояния дамб // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление, 2015, выпуск 2-3(217-222), 93–104
14. **Рефан М. Х. Дамешги А. Камарзаррин М.** Использование рекуррентных нейронных сетей и генетического алгоритма для предсказания дифференциальных поправок к псевдодальностям GPS // Гироскопия и навигация. 2015.№ 2 (89). С.92–105.
15. **Дмитриев С. П., Кошаев Д. А.** Оценивание непрерывно дифференцируемого сигнала с учетом ограничений // Автоматика и телемеханика. 2011. № 7. С. 7–14.
16. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб: ГНЦ РФ «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 370 с.
17. **Гольдштейн А.Л.** Оптимизация в среде Matlab // Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. 192 с.

O.V. Zaitsev (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg). **Prediction of GNSS differential corrections taking into account constraints**

Abstract. Cost-effective algorithms for predicting differential corrections (DC) of global navigation satellite systems (GNSS) are developed. The algorithms allow to take into account the known limitations on the value of DC and their derivatives. By processing the full-scale implementations of DC to the code measurements of GNSS in the off-site mode, a comparative analysis of the accuracy of the DC prediction algorithms at intervals up to 1000 s is carried out.

B. AHI, S. ADELIPOUR, M. HAERI
(Sharif University of Technology, Tehran)

A DUAL MODE CONTROL SCHEME FOR GLOBAL STABILIZATION OF MULTIPLE INTEGRATORS SUBJECTED TO DISTURBANCE AND BOUNDED INPUT

Nested saturated feedback is an effective tool to achieve global stabilization of integrator chain systems with bounded input. In order to improve performance, a novel dual control scheme is suggested in the present work. The main idea is utilizing a nested saturated law to bring states to an offline calculated robust invariant set where a linear matrix inequality-based state feedback is applied thereafter. In both modes an extended state observer is employed for observing and suppressing the effects of external disturbances. The effectiveness of proposed law in terms of faster convergence rate is illustrated by comparative simulation analyses.

Introduction. In real applications, input saturation is an inevitable challenge which typically causes the main nonlinearity. Specifically, control of integrator chains subjected to saturated control has been attracted much interest due to their applicability from the various aspects. It is well known that a chain of integrators of length $n \geq 3$ cannot be globally stabilized by saturating a linear feedback [1]. The most popular solution for high order integrator chains is employing nested saturation functions which firstly was proposed by Teel, where coordinate transformed states were along saturation functions were utilized to achieve global stability [2]. However, Teel's method suffers from poor transient performance for high order systems and larger initial conditions [3]. Thereafter, various works devoted to performance enhancement in integrator chain systems [4, 5]. Nested saturated feedback (NSF) as the basis idea in the majority of indicated solutions, encounters drastic inherent limitation. In NSF, the states are driven step by step from saturated regions to unsaturated one around the origin where a pure state feedback is applied thereafter which yields slow convergence, especially for high dimensional systems [3]. The problem would be more critical at the presence of external disturbance [4]. To solve this inevitable problem at presence of input disturbance, we suggest a dual control scheme by augmentinga recently proposed NSF [5] with a linear matrix inequality (LMI) based optimization approach to achieve a faster convergence rate. When the state trajectory of the system enters the robust positively invariant (RPI) set, state feedback law obtained by solving the LMIs of a model predictive controller (MPC) is applied to the system. This helps to achieve better performance while robust stability is preserved using the notion of invariant sets. We have also taken the advantages of extended state observer (ESO) in proposed LMI-based method to improve quality of disturbance rejection.

Problem Formulation. Consider a chain of integrators as follows

$$\dot{x}_1 = x_2,\ \dot{x}_2 = x_3,\ \ldots.\dot{x}_n = u + d \tag{1}$$

where $|u| \leq u_m$, $|d| \leq d_m$. One of the most inspiring solutions to achieve tracking for a desired trajectory y_d, was reported by [2]

$$u = y_d^{(n)} - \sigma_{\varepsilon_n}\left(y_n + \sigma_{\varepsilon_{n-1}}\left(\ldots y_2 + \sigma_{\varepsilon_1}\left(y_1\right)\ldots\right)\right) \tag{2}$$

where $y = Tx$, T is coordinate transform, which yields a transformation characterized by $y_{n-i} = \sum_{j=0}^{i} \frac{i!}{j!(i-j)!} x_{n-j}$, $i = 1\ldots n$ and $y_d^{(n)}$ denotes the n^{th} derivative of desired trajectory. The saturation function $\sigma_{\varepsilon_i}(y)$ for $\forall \varepsilon_i > 0$ is defined as $\sigma_{\varepsilon_i}(y) = y$ if $|y| \leq \varepsilon_i$ and $\sigma_{\varepsilon_i}(y) = \varepsilon_i \operatorname{sign}(y)$ otherwise, in which $\varepsilon_i > 2\varepsilon_{i-1}$ and $\varepsilon_n = u_m$. The bounds u_m and corresponding ε_i are usually defined by system constrains. As another effective scheme, an accumulative saturation design is introduced in [3]

$$u = \frac{u_m}{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon^i} \sum_{i=1}^{n} \varepsilon^{n-i+1} \sigma_{M_i}\left(y_i\right) \tag{3}$$

where y_i denotes the i^{th} element of $y=\left(\sum_{i=1}^{n}\varepsilon^{n-i+1}u_m\right)T$. Considering presence of external disturbance, the next prominent step was taken in [4] taking the advantages of a back-stepping based approach for stability analysis. Here, actual states are employed to construct control law instead of transformed ones

$$u=y_d^{(n)}-\sigma_n\left(x_n-y_d^{(n-1)}+\sigma_{n-1}\left(\ldots+x_2-y_d^{(1)}+\sigma_1\left(x_1-y_d\right)\ldots\right)\right) \tag{4}$$

with the permissible range of input equals to $u_m>d_m+\lambda_m$ in which $\left|y_d^{(n)}\right|\le\lambda_m$. In this work, the non-decreasing saturation function $\sigma_i(.)$, holds the subsequent conditions

$$\begin{aligned}
&1.\quad x\sigma_i(x)\ge 0, \qquad 0\le\frac{\partial\sigma_i}{\partial x}\le k_i, && \forall x,\\
&2.\quad \sigma_i(x)=k_i x, && \forall|x|\le l_i,\\
&3.\quad \sigma_i(x)=M_i sign(x), && \forall|x|\ge L_i,
\end{aligned} \tag{5}$$

where the positive parameters k_i, l_i, L_i, and M_i satisfy $l_i=L_i\beta_i$ with $\beta_i\le 1$ and $M_i=k_i l_i(1+\gamma_i)$. An improved approach to cope with disturbance is proposed in [5], utilizing ESO disturbance observer

$$u_{NSF}=-sat_{d_m}\left(\hat{x}_{n+1}\right)-\sigma_n\left(x_n+\sigma_{n-1}\left(\ldots+x_2+\sigma_1\left(x_1\right)\ldots\right)\right), \tag{6}$$

where $\hat{x}_{n+1}$ represents disturbance estimation provided by a linear ESO. Assuming (5) with $\beta_i=1$, $\gamma_i=0$ and $M_i=k_iL_i$, for $i=1,\cdots,n$, design parameters are chosen to satisfy following constraints

$$\mathbf{A}1.\quad k_nL_n\le u_m-d_m,\quad \mathbf{A}2.\quad M_n>2d_m+f_n,\quad \mathbf{A}3.\quad M_i>L_{i+1}+f_i,\quad \text{for } i=1,\cdots,n-1, \tag{7}$$

where $f_i=\sum_{j=1}^{i-1}\left(L_{i-j+1}+M_{i-j}\right)\prod_{r=1}^{j}k_{i-r}$.

Global Stabilization with Dual Control. The proposed law has two parts, in first part where states are outside the invariant set Ω_p, a control law similar to (6) is employed taking the advantages of following ESO:

$$\begin{cases}
\dot{\hat{x}}_i=\hat{x}_{i+1}+g_i\left(x_1-\hat{x}_1\right),\ i=1,\ \cdots,\ n-1\\
\dot{\hat{x}}_n=u+\hat{x}_{n+1}+g_n\left(x_1-\hat{x}_1\right),\ \dot{\hat{x}}_{n+1}=g_{n+1}\left(x_1-\hat{x}_1\right),
\end{cases} \tag{8}$$

where $\hat{x}_i$ aims to track x_i and $g_i>0, i=1,\ldots,n+1$ are the observer gains tuned by $g_i=\frac{n!}{i!(n-i)!}\omega_o^i$.

Theorem 1. Assume A,B denote the state space form of system (1) and the feedback law is defined as $u_{MPC}=Kx$. If there exist positive definite matrices M and Y such as $K=YM^{-1}$ and positive scalars $\mu>0$ and $\gamma>0$, the corresponding RPI set $\Omega(P)=\left\{x\in R^n\,|\,x^TPx\le\frac{\mu d_m^2}{\lambda}\right\}$ where $P=\gamma M^{-1}$, can be obtained by solving the constrained minimization problem (9):

$$\min_{M,Y,\mu}\gamma \tag{9a}$$

while holds:

$$\begin{bmatrix} I & \bar{x}^T(k) \\ \bar{x}(k) & M \end{bmatrix} \geq 0\,, \tag{9b}$$

$$\begin{bmatrix} (AM+BY)^T + AM + BY & * & * \\ Q^{1/2}M & -\gamma I_n & * \\ R^{1/2}Y & 0 & -\gamma I_m \end{bmatrix} \leq 0, \tag{9c}$$

$$\begin{bmatrix} (AM+BY)^T + AM + BY + \lambda M & B_d \\ * & -\mu I \end{bmatrix} \leq 0, \tag{9d}$$

$$\begin{bmatrix} W & Y \\ Y^T & M \end{bmatrix} \geq 0,\ W \leq u_m^2, \tag{9e}$$

where $\bar{x}$ denotes the predicted trajectory of the system with the nominal model.

Theorem 2. The following control law globally stabilize system (1)

$$\begin{cases} u = u_{MPC}, & if\ x \in \Omega(P), \\ u = u_{NSF}, & \text{otherwise}, \end{cases} \tag{10}$$

where $\Omega(P)$ can be computed off-line by solving minimization problem.

Simulation Analyses. Comparative numerical simulation analysis is depicted in Fig.1 on a chain of triple integrators which shows the superiority of the proposed scheme's performance. The switch time between control laws is shown by dashed line.

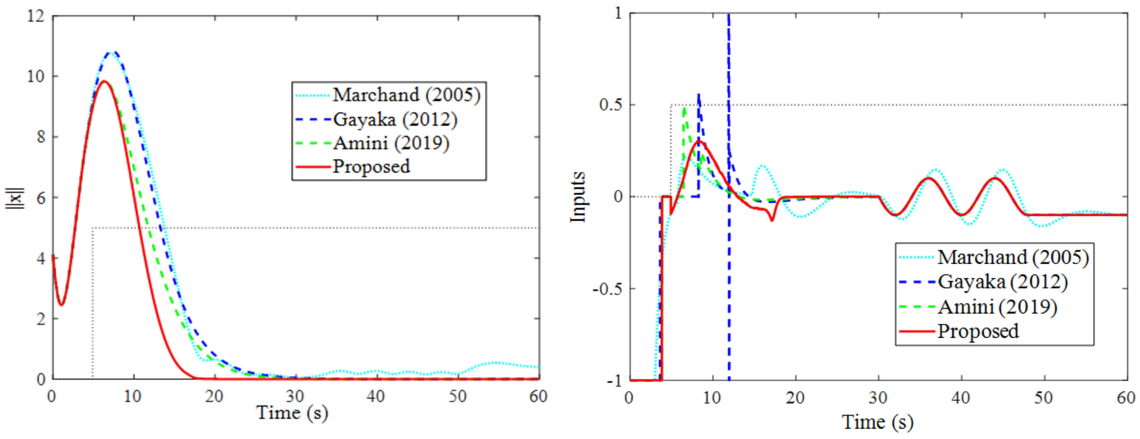


Fig.1 ||x|| and control input for various approaches

Conclusions. A dual control law constructed from combination of NSF with an LMI-based state feedback law is proposed to achieve global stability besides the improved performance for an arbitrary order integrator chain system subjected to disturbance and saturated control.

REFERENCES

1. **H. Sussmann,., E. Sontag, and Y Yang**, *"A general result on stabilization of linear systems using bounded controls,"* IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, pp. 2411-2425, 1994.
2. **A. Teel,** *"Global stabilization and restricted tracking for multiple integrators with bounded controls"*, Systems & Control Letters, vol. 18, pp. 165-171, 1992.
3. **N. Marchand, and A. Hably,** "*Global stabilization of multiple integrators with bounded controls,*" Automatica, vol. 41, pp. 2147-2152, 2005.
4. **S. Gayaka, L. Lu and B. Yao,** *"Global stabilization of a chain of integrators with input saturation and disturbances: A new approach,"* Automatica, vol. 48, pp. 1389-1396, 2012.
5. **S. Amini, B. Ahi and M. Haeri**, *"Control of high order integrator chain systems subjected to disturbance and saturated control: A new adaptive scheme,"* Automatica, vol. 100, pp. 108-113, 2019.

M. FENNEL
(Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe)

DESIGN OF A MODULAR BUS SYSTEM FOR SELF-DRIVING MINIATURE VEHICLES

A new modular system for the self-driving miniature vehicle "KITcar" is proposed. The paper provides general overview of the system architecture, that consist of three main components which are interconnected via controller area network bus. A short evaluation of the proposed system based on field testing is presented by demonstrating the integration of new functions as well as the performance during "Carolo Cup 2019".

Introduction. The fields of advanced driver assistance systems and autonomous driving have gained increased attention during the past few years due to rapid development of high-performance and low-cost hardware in combination with sophisticated algorithms. This trend is not only reflected in state-of-the-art research but also in a lot of student projects.

"KITcar" is one of these projects, whose goal is to participate at the "Carolo Cup Braunschweig", an international competition for self-driving miniature vehicles [1–3]. Therefore a miniature vehicle with scale 1:10 is developed by a group of students with different specializations, including control systems, perception, navigation and hardware design.

The hardware platform is crucial to remain competitive, since it provides the base for all further algorithmic developments as well as the main testing platform. During the first years of the "KITcar" project, a simple Arduino-based embedded system was developed for collecting low-level-sensor data and controlling actuators from a general purpose computer. This system included a dedicated processor for manually overriding the actuator commands in case of system failure. However, as the project and the requirements evolved, the system limitations became apparent.

For this reason a new modular system, which is presented in this conference contribution, was developed. First the requirements are presented. These include high real-time requirements, a small footprint, high robustness, flexibility in function configuration as well as the availability of high speed data transfer. This is followed by a general overview of the system architecture, that consist of three main components which are interconnected via CAN (controller area network) bus [4–7].

Design of a modular bus system. The first component takes care of the communication with the general purpose computer and the collection of sensor data; the second component is responsible for failure-safe control of the actuators including emergency stop capabilities and the third component can be deployed as a universal-bus extender for various tasks. The use cases and features of the components, each a separate PCB, are described in depth.

Due to the demanding requirements and a rough environment, the key aspects of the electrical design are explained in detail. This includes concepts for standardization and reusability, protection circuits and their drawbacks, analog circuit design, and PCB (printed circuit board) design with respect to EMI (electromagnetic interference).

This is followed by a presentation of the software design: The RTOS (real time operating system) concept as well as the general software structure built on top of C/C++ is presented. Special focus is put on the completely self-developed CAN protocol, which focusses on low-overhead data transfer, cross-platform compatibility and ease of use. Furthermore, the communication interface to the general purpose computer is explained.

A short evaluation of the proposed system based on field testing is presented by demonstrating the integration of new functions as well as the performance during "Carolo Cup 2019".

Conclusions. The proposed modular system meets the requirements of high real-time data processing, small footprint, high robustness, flexibility in function configuration. The availability of high speed data transfer persists as well. System shown fair performance on field testing and during "Carolo Cup 2019". Furthermore, possible drawbacks are discussed and future extensions as well as possible improvements are outlined.

REFERENCES

1. **Technische Universität Braunschweig**, *Carolo-Cup*, https://wiki.ifr.ing.tu-bs.de/carolocup/en/carolo-cup, accessed 10.02.2018.
2. **KiCad Developers Team**, *Kicad EDA*, http://kicad-pcb.org, accessed 10.02.2018.
3. **KITcar Team**, *Die Fahrzeuge des KITcar Teams*, http://kitcar-team.de, accessed 10.02.2018.
4. **Google Developers**, *Protocol buffers*, https://developers.google.com/protocol-buffers, accessed 10.02.2018.
5. **Di Sirio, G.**, *ChibiOS/RT 3.0: The Ultimate Guide*, 2014.
6. **Schwab, A. J.**, *Elektromagnetische Verträglichkeit*, Berlin, 2011.
7. **Zimmermann, W. and Schmidgall, R.**, *Bussysteme in der Fahrzeugtechnik: Protokolle, Standards und Softwarearchitektur*, Wiesbaden, 2014.

УДК 629.05

А.С. НОСОВ, В.А. ВАСИЛЬЕВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМА КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕНИЙ В ЗАДАЧЕ УТОЧНЕНИЯ КООРДИНАТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКА И КАРТЫ ПОЛЯ

Проводится анализ эффективности алгоритма коррекции показаний навигационной системы по данным гравиметра, эхолота и соответствующих карт полей. Сопоставляются характеристики точности, полученные при раздельном и комплексном использовании измерений.

Введение. Навигационные системы со средствами коррекции по естественным или искусственным полям Земли применяются для широкого класса подвижных объектов. При проведении коррекции таких систем может быть использована информация о поле рельефа, аномалии силы тяжести (АСТ), магнитном и других полях, которая обычно представляется в виде цифровой карты. Уточнение координат осуществляется на основе сопоставления измеренных и вычисленных с использованием карты значений одного или нескольких полей [1–3]. Известно, что одновременное использование двух и более полей при этом нередко позволяет повысить точность коррекции и сократить время обсервации, что особенно актуально в случае скалярных измерений поля (например, при измерении поля силы тяжести гравиметром или использовании однолучевого эхолота/высотомера) [4–7].

Целью работы является анализ эффективности комплексирования измерений гравиметра и эхолота при коррекции показаний морской навигационной системы на заданных участках карты. Критерием эффективности при этом служит ожидаемая точность навигационного решения, выраженная через параметры среднеквадратического эллипса погрешностей.

Постановка задачи. Будем полагать, что решается задача определения координат морского подвижного объекта на плоскости. При этом имеются показания навигационной системы (НС) $\mathbf{y}_i^{HC} = \mathbf{X}_i + \mathbf{\Delta}$, ошибки которой $\mathbf{\Delta} = \begin{bmatrix}\Delta_1 & \Delta_2\end{bmatrix}^T$ считаются неизменными за время проведения обсервации; $\mathbf{X}_i = \begin{bmatrix}X_1 & X_2\end{bmatrix}_i^T$ – истинные координаты объекта. При сделанных предположениях задачу навигации с использованием карт геофизических полей можно свести к задаче оценивания неизвестного векторного параметра $\mathbf{\Delta}$ по n векторным измерениям

$$\mathbf{y}_i = \phi\left(\mathbf{y}_i^{HC} - \mathbf{\Delta}\right) + \boldsymbol{\varepsilon}_i \equiv \phi_i\left(\mathbf{\Delta}\right) + \boldsymbol{\varepsilon}_i, \tag{1}$$

где $\mathbf{y}_i^{HC} = \left[\begin{matrix} y_1^{HC} & y_2^{HC} \end{matrix}\right]_i^T$ – фиксированные известные показания НС в дискретные моменты времени; $i = \overline{1\ldots n}$; $\phi(\bullet)$ – известная нелинейная вектор-функция, описывающая зависимости полей от координат $\mathbf{X}_i$ и построенная, например, по результатам предварительной съемки; $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ – вектор неизвестных значений суммарных ошибок карт и измерителей. Будем считать, что неизвестный вектор $\mathbf{\Delta}$ и ошибки измерений $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ являются случайными с известными статистическими свойствами. При этом вектор $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ зададим в виде: $\boldsymbol{\varepsilon}_i = \mathbf{c} + \mathbf{v}_i$, где вектор $\mathbf{c}$ описывает систематические суммарные ошибки, а $\mathbf{v}_i$ соответствует белошумной составляющей. В указанной постановке задача оценивания вектора $\begin{bmatrix}\mathbf{\Delta} & \mathbf{c}\end{bmatrix}^T$ может решаться в рамках байесовского подхода с использованием оптимальных нелинейных алгоритмов, основанных на методе сеток или методе Монте-Карло [1; 2].

Отметим, что эффективность решения поставленной задачи в основном зависит от матрицы Якоби функции $\phi(\bullet)$ и СКО суммарных ошибок $\boldsymbol{\varepsilon}_i$. В частности, соотношение $\sigma_\varepsilon / \overline{h}$ СКО

Научный руководитель д.т.н., проф. Степанов О.А.

суммарной ошибки к среднему модулю градиента поля в пределах области неопределенности $\mathbf{\Delta}$ приближенно характеризует точность навигационного решения для одного поля, а разность направления градиента θ для используемых полей определяет эффективность комплексирования их измерений. Известно, что при использовании измерений двух полей наилучшая точность достигается при максимизации соотношения $\sigma_\varepsilon / \overline{h}$ для каждого поля и θ, близкому к 90°.

Пример. Конкретизируем задачу оценивания вектора $[\mathbf{\Delta} \quad \mathbf{c}]^T$ по измерениям (1) для случая раздельного и комплексного использования измерений гравиметра, эхолота и соответствующих карт полей. Для этого зададим априорные статистические свойства введенных выше переменных: СКО погрешностей НС (σ_{Δ_1} –1000 м, σ_{Δ_2} –1000 м); СКО систематической и белошумной ошибок гравиметра (σ_{gr} –0,5 мГал, $\sigma_{w_{gr}}$ –0,5 мГал); СКО систематической и белошумной ошибок эхолота (σ_{df} –5 м, $\sigma_{w_{df}}$ –5 м). Используемые карты геофизических полей и две рассмотренные траектории представлены на рис. 1. Средний модуль градиента поля АСТ составил: 0,72 мГал/км, поля глубин: 4,05 м/км.

Для решения поставленной задачи использовался метод Монте-Карло с количеством частиц 3000 и частичным аналитическим интегрированием по вектору $\mathbf{c}$ [2; 8]. Интервал получения измерений составлял 500 м.

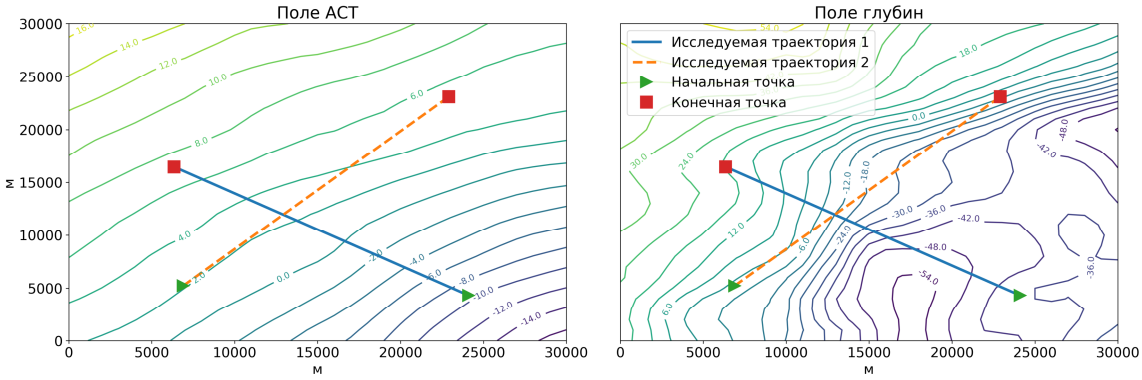


Рис. 1. Карты геофизических полей и исследуемые траектории

На рис. 2 представлены расчетные эллипсы погрешностей оценивания ошибок НС.

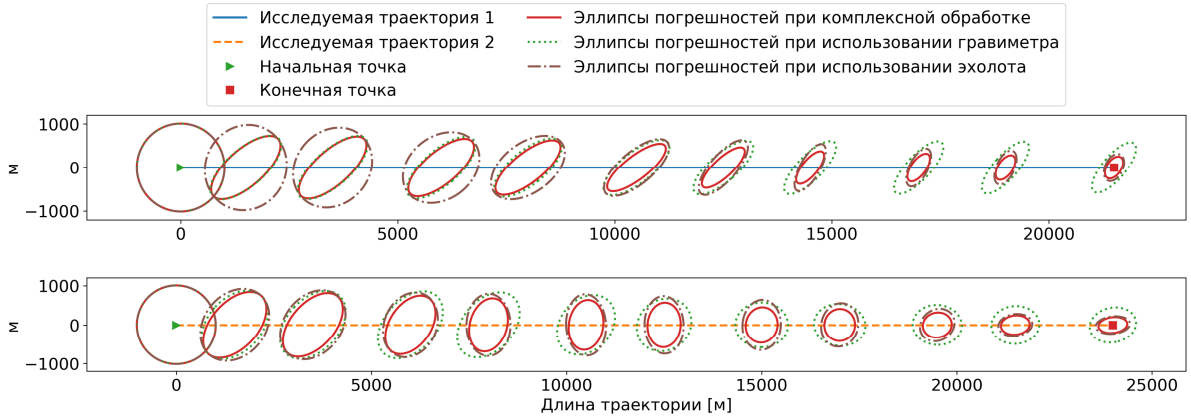


Рис. 2. Эллипсы погрешностей решения задачи навигации. Ориентация эллипсов соответствует рис. 1

Для первой траектории эффект от использования комплексной обработки измерений проявляется более явно, чем для второй. Это объясняется различными направлениями градиента используемых полей на траектории: на первой ее половине основной вклад в уточнение координат вносят измерений гравиметра; на второй оценка уточняется в основном за счет измерений эхолота. Площадь апостериорного среднеквадратического эллипса погрешностей при исполь-

зовании комплексной обработки ниже на 33,8% по сравнению и использованием только эхолота и на 76,3% по сравнению с использованием только гравиметра. Средняя радиальная погрешность ниже на 17,2% и 57,9% соответственно.

На второй траектории угол между направлениями градиента для двух полей меньше, однако повышение точности при использовании комплексной обработки также проявляется. Площадь апостериорного среднеквадратического эллипса погрешностей при использовании комплексной обработки ниже на 29,4% по сравнению и использованием только эхолота и на 73,4% по сравнению с использованием только гравиметра. Средняя радиальная погрешность ниже на 19,2% и 45,5% соответственно.

Отметим, что параметры эллипсов были подтверждены действительными значениями, полученными методом статистических испытаний [4].

Заключение. На частном примере проведен анализ эффективности применения комплексной обработки измерений от двух геофизических полей в задаче коррекции показаний навигационной системы. Сопоставлены характеристики точности, полученные при их раздельном и совместном использовании. Проиллюстрировано, что наибольший выигрыш в точности достигается на участках с разными направлениями градиентов используемых полей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-08-01101 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / ред. В.Г. Пешехонов, О.А. Степанов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
2. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1. Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация. 2015. Т. 23. № 3. С. 102–125.
3. **Торопов А.Б.** Алгоритмы фильтрации в задачах коррекции показаний морской навигационной системы с использованием нелинейных измерений: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: ОАО "Концерн "ЦНИИ «Электроприбор», 2013. 147 с.
4. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 509 с.
5. **Августов Л.И.** и др. Навигация летательных аппаратов в околоземном пространстве. Научтехлитиздат, 2015. 592 с.
6. **Сазонова Т.В.** Сравнительные исследования методов экстремальной коррекции навигационных параметров по магнитному и гравитационному полям Земли для воздушных судов и необитаемых подводных аппаратов // Материалы XXX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов НН Острякова. 2016. С. 403–411.
7. **Бердышев В.И.**, **Костоусов В.Б.** Экстремальные задачи и модели навигации по геофизическим полям. Екатеринбург: ИММ, 2007. 270 с.
8. **Bergman N.** Recursive Bayesian estimation: Navigation and tracking application. Sweden: Linkoping University, 1999. 219 p.

A.S. Nosov (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, Saint-Petersburg), **V.A. Vasilyev** (Concern CSRI Elektropribor, JSC). **Efficiency analysis of the data fusion algorithm in map-aided navigation**

Abstract. Efficiency analysis of the map-aided navigation algorithm based on the gravimeter, depth finder and corresponding field maps is carried out. The accuracy obtained by separate and complex use of measurements are compared.

УДК 629.05

А.С. НОСОВ, А.В. МОТОРИН
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ОЦЕНИВАНИЕ АНОМАЛИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ В МОРСКИХ УСЛОВИЯХ С ОТБРАКОВКОЙ ИЗМЕРЕНИЙ

Предложен алгоритм комплексной обработки измерений гравиметра и спутникового приемника в задаче оценивания аномалии силы тяжести в морских условиях. Алгоритм позволяет обнаруживать и отбраковывать аномальные измерения, а также интерполировать оценку на основе оставшихся измерений.

Эффективность алгоритма подтверждается результатами обработки реальных данных.

Введение. Вследствие сложного характера поверхности Земли и ее внутреннего строения вектор ускорения действительной силы тяжести $\vec{g}$ (отвесной линии) в точках физической поверхности Земли не совпадает с вектором $\vec{n}$ ускорения нормальной силы тяжести, рассчитанным для принятой модели геоида. Модуль разности между ними называется аномалией силы тяжести (АСТ). Результаты ее измерения могут быть использованы в геологоразведке для поиска полезных ископаемых, в задачах навигации и т. п. [1].

В процессе измерений АСТ в морских условиях нередко возникают вариации курса или скорости движения носителя гравиметрической аппаратуры. Зачастую они не учитываются алгоритмами оценивания, что может порождать дополнительные погрешности. Один из путей их компенсации состоит в использовании адаптивных алгоритмов [2]. Другой состоит в исключении измерений, соответствующих аномальным участкам движения. На практике аномальные участки исключаются из обработки вручную, что повышает трудоемкость работ и вероятность возникновения ошибок.

Целью работы является создание алгоритма оценивания АСТ с отбраковкой измерений, который позволяет автоматически определять и исключать из обработки участки со значительными вариациями параметров движения и интерполировать оценку на основе оставшихся измерений.

Постановка задачи. Задача оценивания АСТ по измерениям гравиметра, установленного на надводном подвижном объекте, может быть описана следующим образом. Будем полагать, что упрощенную модель измерений гравиметра можно представить в виде: $y = \tilde{g} + a_в + v_{гр}$, где $\tilde{g}$ – АСТ, $a_в$ – ускорения, обусловленные вертикальными перемещениями объекта, $v_{гр}$ – инструментальная ошибка измерений. Здесь и далее измерения полагаются дискретными; зависимость от времени опущена. Для простоты будем полагать, что $v_{гр}$ – белошумная погрешность. Более подробные модели измерений можно найти, например, в [1].

Для описания АСТ $\tilde{g}$ нередко используется модель Джордана, формирующий фильтр которой представлен компонентами x_1-x_3 в выражении (1) [3–5]. Ускорения $a_в$, могут быть описаны в виде компонент марковского процесса третьего порядка x_4-x_6 [6]. С учетом сделанных предположений можно записать следующую модель для оцениваемого вектора:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\beta x_1 + x_2, \\ \dot{x}_2 = -\beta x_2 + x_3, \\ \dot{x}_3 = -\beta x_3 + q_{га} w_{га}, \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{x}_4 = x_5, \\ \dot{x}_5 = x_6, \\ \dot{x}_6 = -a_3 x_4 - a_2 x_5 - a_1 x_6 + C w_в, \end{cases} \quad (1)$$

$$\tilde{g} = -\beta\zeta x_1 + x_2, \qquad a_в = x_6.$$

Научный руководитель д.т.н., проф. Степанов О.А.

Здесь $\beta = V\sigma_{\partial\tilde{g}/\partial\rho} / \sqrt{2}\sigma_{\tilde{g}}$; V – скорость носителя (морского судна); $\sigma_{\partial\tilde{g}/\partial\rho}$ – параметр, определяющий пространственную изменчивость АСТ; $q_{га}w_{га}$ – порождающий белый шум интенсивности $q_{га}^2 = 10\beta^3\sigma_{\tilde{g}}^2$; $\sigma_{\tilde{g}}^2$ – дисперсия АСТ; $\zeta = \left(\sqrt{5}-1\right)/\sqrt{5}$ – безразмерный коэффициент; $a_3 = \left(\lambda^2 + \mu^2\right)\gamma$; $a_2 = \lambda^2 + \mu^2 + 2\mu\gamma$; $a_1 = 2\mu + \gamma$; $C = \sigma_в\sqrt{2a_3\left(a_1a_2 - a_3\right)/a_1}$, $w_в$ – порождающий белый шум единичной интенсивности; $\sigma_в$ – среднеквадратическое значение вертикальных перемещений x_4, λ – преобладающая частота качки, μ – коэффициент нерегулярности волнения, γ – безразмерный коэффициент.

С учетом введенных моделей, измерения гравиметра могут быть переписаны в виде:

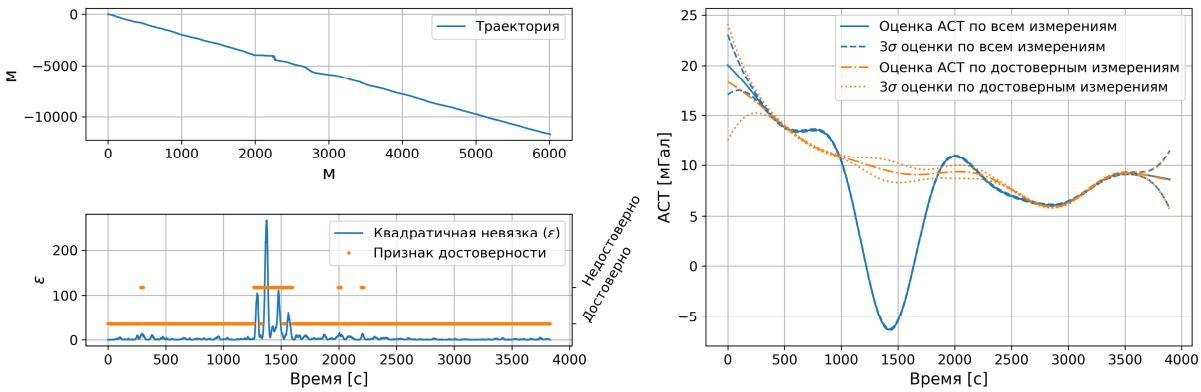
$$y = \tilde{g} + a_в + v_{гр} = -\beta\zeta x_1 + x_2 + x_6 + v_{гр}. \quad (2)$$

Таким образом, при нормальном режиме движения задача определения АСТ может быть сведена к линейному оцениванию вектора состояния $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \end{bmatrix}^T$, описываемого моделью (1), по измерениям (2). Оно может быть осуществлено с использованием фильтра Калмана или оптимального алгоритма сглаживания (RTS) [7].

Отбраковка измерений. При отклонении параметров движения носителя от равномерного и прямолинейного в измерениях гравиметра появляются дополнительные погрешности, т. е. модель (2) перестает быть справедливой. Как правило, измерения с такими погрешностями вручную исключаются при обработке съемки, а соответствующие им значения формируются при помощи интерполяции. Вместе с тем существуют предпосылки для автоматизации такой процедуры. Один из возможных путей автоматизации состоит в детектировании и отбраковке участков неравномерного движения на основе высоких значений невязок между прогнозными и поступающими измерениями [8]. При этом калмановские алгоритмы фильтрации и сглаживания, соответствующие модели (1), позволяют формировать оценки для таких участков, работая в режиме прогноза и интерполяции соответственно. Анализ натурных данных показал, что отбраковку измерений более эффективно проводить не на основе измерений гравиметра (2), а на основе получаемых от спутника координат и скоростей, которые используются для географической привязки значений поля. Для получения и анализа таких невязок введем модель движения в декартовых координатах в виде [8]:

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = v_1, \\ \dot{v}_1 = a_1, \\ \dot{a}_1 = w_1, \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{X}_2 = v_2, \\ \dot{v}_2 = a_2, \\ \dot{a}_n = w_2; \end{cases} \quad z_{t_k} = \begin{bmatrix} X_1, & v_1, & X_2, & v_2 \end{bmatrix}^T + v_{снс}. \quad (3)$$

Здесь X_1, X_2 – координаты объекта; v_1, a_1, v_2, a_2 – соответствующие им скорости и ускорения; w_1, w_2 – порождающие шумы малой интенсивности; z_{t_k} – дискретные измерения спутникового приемника в момент времени t_k, погрешности которого $\left(v_{снс}\right)$ принимаются гауссовскими, белошумными с известной матрицей ковариаций. Для модели (3) с использованием фильтра Калмана нетрудно получить значения взвешенной квадратичной невязки, согласно выражению $\varepsilon = \mu^T S^{-1}\mu$, где μ – вектор невязок, S – соответствующая ему матрица ковариаций невязок [7–9]. В условиях, когда модель (3) справедлива, μ представляет собой вектор гауссовских белых шумов [7]. Когда это не так, значения μ соответствуют случайному процессу со свойствами, определяемыми рассогласованием моделей. Известно, что взвешенная квадратичная невязка ε при нормальном движении должна подчиняться распределению χ^2 с $n = 4$ степенями свободы [9]. Для такого распределения квантиль уровня $\alpha = 0{,}99$, определяющий порог для значения невязки, приближенно равен 13,28. С помощью выбранного порога удается выделить достоверные и недостоверные участки измерений, показанные на рисунке.



Левый столбец: траектория судна; квадратичная невязка и признак достоверности измерений.
Правый столбец: исходная и модифицированная оценки.

Результаты исключения аномальных измерений для реальных данных одного гравиметрического галса показаны справа на рисунке. Можно заметить, что, помимо оценки, предложенный алгоритм вырабатывает корректную оценку среднеквадратической погрешности (σ) для участка с пропущенными измерениями. По результатам расчета ошибок съемки по пересечениям галсов среднеквадратическая погрешность для рассматриваемого галса снизилась с 3,38 мГал до 0,78 мГал. При обработке гравиметрической съемки, содержащей 22 галса, использование предложенного алгоритма позволило уменьшить среднеквадратическую погрешность по пересечениям галсов с 1,48 мГал до 0,81 мГал.

Заключение. В докладе предложен алгоритм отбраковки измерений при комплексной обработке данных гравиметра и спутникового приемника в задаче оценивания АСТ в морских условиях. Алгоритм позволяет обнаруживать и исключать аномальные измерения, а также интерполировать оценку на основе оставшихся измерений, что придает ему адаптивный характер. Представлены результаты обработки реальных данных, иллюстрирующие достоинства алгоритма.

Исследование выполнено при поддержке гранта РФФИ № 18-08-01101 А

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / ред. В.Г. Пешехонов, О.А. Степанов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
2. **Stepanov O.A.** et al. Comparison of Stationary and Nonstationary Adaptive Filtering and Smoothing Algorithms for Gravity Anomaly Estimation on Board the Aircraft // Proceedings of 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2016). Saint-Petersburg, Russia, 2016. P. 53–60.
3. **Jordan S.K.** Self-consistent Statistical Models for Gravity Anomaly and Undulation of the Geoid / S.K. Jordan // Journal of Geophysical Research. 1972. Vol. 77. № 20. P. 2156-2202.
4. **Степанов О.А., Блажнов Б.А., Кошаев Д.А.** Исследование эффективности использования спутниковых измерений при определении ускорения силы тяжести на летательном аппарате // Гироскопия и навигация. 2002. Т. 38. № 3. С. 217–225.
5. **Koshaev D.A., Stepanov O.A.** Analysis of filtering and smoothing techniques as applied to aerogravimetry // Gyroscopy and Navigation. 2010. Vol. 1. № 1. P. 19–25.
6. **Ривкин С.С.** Определение линейных скоростей и ускорений качки корабля инерциальным методом. Ленинград, 1980. 113 с.
7. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 509 с.
8. **Bar-Shalom Y., X.-R. Li, T. Kirubarajan.** Estimation with Applications to Tracking and Navigation. New York, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001. 579 p.
9. **Чернодаров А.В.** Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов. Москва: ООО «Научтехлитиздат», 2017. 300 с.

A.S. Nosov, A.V. Motorin (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, Saint-Petersburg). **Gravity anomaly estimation in marine conditions with measurement acceptance sampling**

Abstract. An algorithm for complex processing of gravimeter and satellite receiver measurements for estimating the gravity anomaly in marine conditions is proposed. The algorithm allows to detect and exclude anomalous measurements, as well as interpolate the estimate based on the remaining measurements. The effectiveness of the algorithm is confirmed by the results of processing real data.

УДК 629.05

Р.У. ТИТОВ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

А.В. МОТОРИН
(Университет ИТМО, ГНЦ РФ АО Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КАРТЫ И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРТ ГРАВИТАЦИОННОГО ПОЛЯ

Приводятся основные этапы и методы решения задачи одновременной навигации и картографирования для мобильных роботов внутри помещений. Рассматриваются возможности реализации алгоритмов решения обобщенной задачи построения и использования карты гравитационного поля. Выявляется взаимосвязь таких задач.

Ключевые слова: одновременная навигация и картографирование, лазерный дальномер, навигация роботов, аномалия гравитационного поля.

Введение. Задачу одновременной локализации и построения карты можно определить как пошаговую оценку координат объектов окружающего пространства – ориентиров, образующих карту, и, в то же время, определение положения объекта-наблюдателя относительно них. Для решения этой задачи, как правило, используются измерения дальностей до ориентиров и пеленгов на них. Такие измерения могут быть получены с использованием различных измерителей и средств наблюдения, таких как сканирующие лазерные дальномеры и видеокамеры [1–5]. Традиционно решение совместной задачи навигации и картографирования (SLAM – Simultaneous localization and mapping) востребовано при навигации автономных роботов в условиях закрытых помещений, когда сигналы спутниковых систем недоступны [1–5]. Вместе с тем возрастает актуальность решения задачи навигации с использованием карт геофизических полей [6], в частности для автономных подводных объектов. Задача SLAM в этих условиях обладает своими особенностями, в первую очередь это касается используемых измерений и карты, в качестве которых могут выступать измеритель глубины и карта рельефа дна, дальномер и карта береговой линии, гравиметр и карта аномалий силы тяжести, магнетометр и карта магнитных аномалий [7–13].

В настоящей работе рассмотрены основные методы решения задачи SLAM для роботов, и проведено моделирование решения задачи SLAM. Эти методы в дальнейшем проецируются для получения решения задачи одновременной навигации и картографирования с использованием геофизических полей.

Основные этапы решения задачи SLAM. Несмотря на разнообразие существующих методов, в решении задачи SLAM можно выделить два этапа: предварительную обработку данных измерителя (называемую в западной литературе front-end) и задачу комплексной обработки (называемую также back-end) [5]. Первая задача (front-end) заключается в выделении ориентиров на карте, слежении за ними, измерении соответствующих дальностей и пеленгов. Пример того, как это может быть осуществлено с использованием лазерного дальномера, приведен далее в работе. Вторая задача (back-end) в такой постановке является задачей комплексной обработки, где по дальностям и пеленгам оцениваются как координаты объекта, так и координаты точечных ориентиров. Решение такой задачи и доказательство ее сходимости приведено в работе [1]. Методы, применяемые для решения задачи, как правило, относятся к методам нелинейной фильтрации, включая обобщенный фильтр Калмана, ансцентный фильтр, фильтр частиц. Это породило в литературе соответствующие названия EKF-SLAM, UKF-SLAM, Particle-SLAM [4, 5].

Пример решения задачи выделения и слежения за ориентирами с использованием лазерного дальномера. Сканирующий лазерный дальномер предоставляет массив дальностей и пеленгов до препятствий в радиусе своего сканирования. В полученном массиве выделяются локальные минимумы, соответствующие отдельным ориентирам. Направления и дальности до этих минимумов считаются соответственно направлениями и дальностями до ориентиров, при-

мер моделирования и реализации такого метода с использованием ROS и MATLAB можно найти также в [14, 15]. Так как один и тот же ориентир, как правило, встречается в различных сканах, возникает проблема ассоциации данных. Для ориентиров создается база данных, содержащая их координаты и количество наблюдений. Ассоциация точечных ориентиров осуществляется по их координатам. Если новый ориентир имеет координаты близкие к тем, что уже есть в базе, он ассоциируется с уже имеющимся. Если дистанция больше заданного порога, то в базу добавляется новый ориентир. Порог выбирается эмпирически, исходя из точности измерений лазерного дальномера, однако с использованием данных о точности определения собственного положения, вырабатываемых в фильтре back-end, возможно сделать порог адаптивным. После нескольких наблюдений ориентира он записывается как надежный и используется для уточнения местоположения объекта [1–5].

Пример решения задачи оценивания координат точечных ориентиров и положения подвижного объекта (back-end). Постановка задачи оценивания в SLAM во многом совпадает с задачей определения координат по измеренным до ориентиров дальностям и пеленгам, с той разницей что в вектор состояния включены координаты самих ориентиров. Это накладывает ряд особенностей, так вектор состояния в этом случае динамически увеличивает свою размерность.

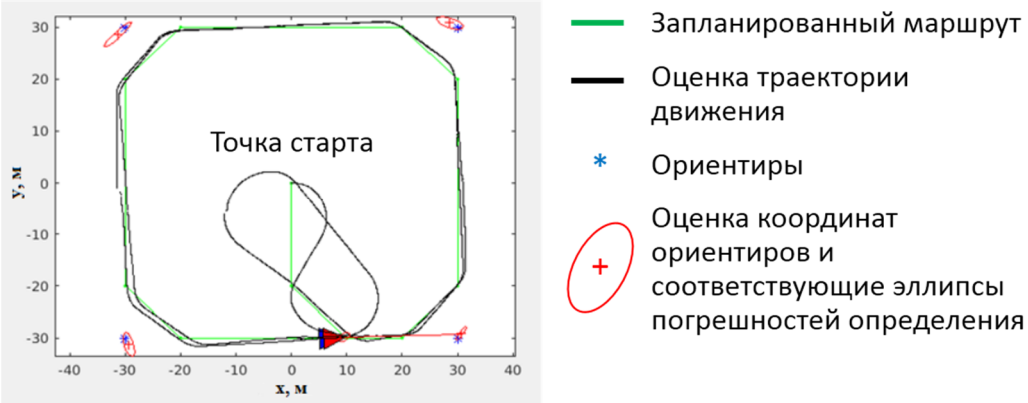


Рис. 1. Моделирование алгоритма EKF-SLAM в среде с четырьмя ориентирами

Для анализа точности алгоритма SLAM было проведено моделирование алгоритма EKF-SLAM для двух следующих вариантов движения робота по замкнутой траектории при наличии четырех ориентиров (рис. 1). В первом варианте робот проезжает два круга в одном направлении (пунктирная линия), во втором – разворачивается после первого круга и проезжает его в обратном направлении (сплошная линия). На рис. 2 показана погрешность определения его местоположения по оси X и пороги его среднеквадратического отклонения (СКО).

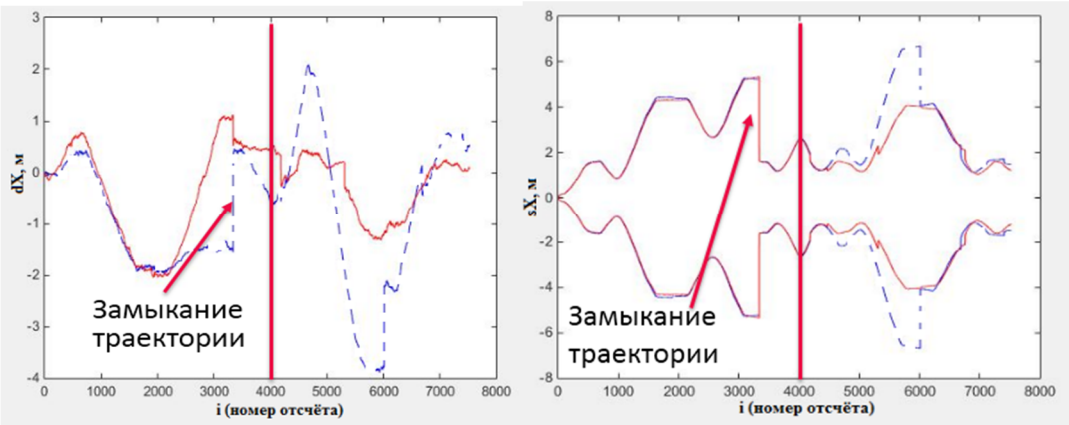


Рис. 2. Погрешность определения местоположения робота по оси X и пороги его СКО

Из рис. 2 видно, что погрешность определения роботом своего местоположения, а также местоположения ориентиров существенно уменьшается после замыкания траектории, так как

наблюдается первый ориентир, координаты которого были определены с большой точностью. Также заметно и улучшение точности при обратном проезде.

Рассмотренные здесь методы могут быть обобщены и на задачи совместной навигации и получения карт геофизических полей, в том числе задачи совместного построения и использования карты гравитационного поля. В литературе представлены методы решения задачи SLAM по измерениям градиента аномалии гравитационного поля Земли [7–9], где в качестве ориентиров выступают возмущающие точечные массы. При решении задачи по рельефу дна в качестве первичной информации служат изображения поверхности дна, полученные с использованием эхолотов [11–13]. Большинство работ, проводимых в этом направлении, связано с навигацией автономных подводных аппаратов.

Заключение. В работе рассмотрены основные методы решения задачи SLAM для роботов и проведено моделирование решения задачи SLAM. С использованием моделирования было оценено СКО погрешности определения роботом своего местоположения при движении по замкнутой траектории в различных направлениях. Выявлена взаимосвязь задачи совместного построения и использования карт геофизических полей с задачей одновременной навигации и картографирования.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 18-19-00627

ЛИТЕРАТУРА

1. **G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H. F. Durrant-Whyte, M. Csorba** A Solution to the Simultaneous Localization and Map Building (SLAM) Problem / IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 17, no. 3, 2001 pp. 229-241
2. **H. F. Durrant-Whyte and T. Bailey**, “Simultaneous localisation and mapping (SLAM): Part I” IEEE Robot. Autom. Mag., vol. 13, no. 2, pp. 99–110, 2006.
3. **T. Bailey and H. F. Durrant-Whyte**, “Simultaneous localisation and mapping (SLAM): Part II” Robot. Auton. Syst., vol. 13, no. 3, pp. 108–117, 2006.
4. **G. Dissanayake, S. Huang, Z. Wang, and R. Ranasinghe**, “A review of recent developments in simultaneous localization and mapping” in Proc. Int. Conf. Ind. Inform. Syst., 2011, pp. 477–482.
5. **C. Cadena, L. Carlone, H. Carrillo, Y. Latif, D. Scaramuzza, J. Neira, I. Reid, J.J. Leonard** Past, Present, and Future of Simultaneous Localization and Mapping: Toward the Robust-Perception Age // IEEE Transactions on Robotics. 2016 .vol. 32, iss. 6. P. 1309–1332.
6. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / под ред. Пешехонова В.Г., Степанова О.А. СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 р.
7. **Wu M., Weng Y.** UKF-SLAM Based Gravity Gradient Aided Navigation // Zhang X., Liu H., Chen Z., Wang N. (eds) Intelligent Robotics and Applications. ICIRA 2014. Lecture Notes in Computer Science, vol 8917. Springer, Cham. pp.77-88
8. **I. Vallivaara, J. Haverinen, A. Kemppainen, and J. Röning**. Simultaneous localization and mapping using ambient magnetic field. In Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), IEEE Conf., p. 14–19. IEEE, 2010.
9. **Parth Pasnani, Mae L. Seto**, Terrain-Based Localization and Mapping for Autonomous Underwater Vehicles using Particle Filters with Marine Gravity Anomalies , IFAC PapersOnLine 51-29 (2018) 354–359.
10. **I. Vallivaara, J. Haverinen, A. Kemppainen, and J. Roning**. Simultaneous localization and mapping using ambient magnetic field. In Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI), IEEE Conf., p. 14–19. IEEE, 2010.
11. **Himri K.** et al. Semantic SLAM for an AUV using object recognition from point clouds // IFAC-PapersOnLine. 2018. Vol. 51, № 29. P. 360–365.
12. **Stuckey R.A.** Navigational error reduction of underwater vehicles with selective bathymetric SLAM // IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline). 2012. Vol. 3, № PART 1. P. 118–125.
13. **Barkby, S., Williams, S.B., Pizarro, O., and Jakuba, M.V.** A featureless approach to efficient bathymetric SLAM using distributed particle mapping. Journal of Field Robotics, 2011, 28(1), 19–39.
14. **Давыдов О.И., Платонов А.К.** Метод определения позиции и ориентации мобильного робота с лазерным сканером // ИПМ им. М.В.Келдыша. 2015. № 45. 20 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2015-45
15. **Титов Р.У., Моторин А.В.** «Определение препятствий и дальностей до них в алгоритмах одновременной навигации и картографирования». Альманах научных работ молодых ученых университета ИТМО, 2019 (в печати).

R.U. Titov (ITMO University, St. Petersburg, Russia), **A.V. Motorin** (ITMO University; State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia). **Map plotting and application methods and their possible implementations using the gravity field maps**

Abstract. The paper presents the main stages and methodological solutions for simultanous navigation and mapping by indoor mobile robots. Possible implementations of algorithms for combined tasks of plotting and using a gravitation field map are studied. Interrelation of such tasks is identified.

УДК 681.51

А.В. ГОЛУБКОВ
Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова

ОБ ОЦЕНКЕ ОБЪЕМА БАНКА КОНКУРИРУЮЩИХ ФИЛЬТРОВ КАЛМАНА В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЖИМА ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Представлен алгоритм оценки объема банка конкурирующих фильтров Калмана в задаче определения режима движения объекта по сложной траектории, описываемой с помощью гибридной стохастической модели. Алгоритм реализован на языке MATLAB. Полученный результат применим как для исследования свойств гибридной стохастической модели, так и для решения задачи скорейшего обнаружения изменения режима движения.

Введение. Решение задачи определения режима движения объекта, рассматриваемое в докладе, основано на представлении процесса движения объекта по сложной траектории с помощью гибридной стохастической модели. При этом отдельные участки движения описываются одной из возможных дискретных линейных стохастических моделей, каждая из которых задает либо равномерное прямолинейное движение, либо круговое равномерное движение при повороте вправо или влево с заданным радиусом [1, 2]. Задача определения режима движения объекта заключается в скорейшем обнаружении изменения режима движения и определении его типа на каждом участке траектории с целью вычисления оптимальных оценок параметров движения объекта в режиме реального времени. Для решения указанной задачи применимы методы скорейшего обнаружения изменений [3–6]. Указанный класс методов, развитый в теории обнаружения изменений свойств случайных процессов, обладает наибольшим быстродействием в решении задач обнаружения изменений. В настоящее время задачи скорейшего обнаружения изменений остаются актуальными [7–11]. При решении практических задач обнаружения одной из важных подзадач является априорная оценка объема банка конкурирующих фильтров Калмана [12].

Доклад посвящен вопросу построения алгоритма вычисления оценки объема банка фильтров применительно к задаче определения режима движения объекта по сложной траектории на основе гибридной стохастической модели.

Метод и алгоритм определения режима движения. Математическое основание предложенного алгоритма составляет теоретическая оценка среднего объема выборки, необходимого для принятия решения о выборе из двух гипотез в соответствии с последовательным критерием Вальда [3]. Под выборкой здесь понимаются измерения, полученные с момента начала теста, до момента определения режима движения. Поскольку с каждым новым измерением в банк добавляются новые фильтры, соответствующие гипотезам о смене режима движения на текущем шаге, средний объем банка будет пропорционален среднему объему выборки. Таким образом, следует организовать банк в виде очереди, в которой находятся только те фильтры, для которых период принятия решения еще не завершен. Алгоритм определения длины такой очереди представлен ниже.

Алгоритм оценки объема банка конкурирующих фильтров. Рассмотрим две гипотезы: основная H_0 и альтернативная H_1, соответствующие разным режимам движения. Требуется по данным измерений определить, была ли смена режима движения на заданном участке. Последовательный критерий Вальда заключается в вычислении отношения правдоподобия λ_k и его сравнении с верхним $A = \ln((1-\beta)/\alpha)$ и нижним $B = \ln(\beta/(1-\alpha))$ порогами решающего правила, где α и β – вероятности ошибок первого и второго рода.

Пусть α и β заданы. Предположим, что гипотезе H_0 соответствует режим движения, представленный моделью M_0, а гипотезе H_1 – режим движения, представленный моделью M_1. Априорную оценку объема банка конкурирующих фильтров будем вычислять по формуле:

Научный руководитель к.ф.-м.н., доцент Цыганов А.В.

$$N = \max\,(N_A, N_B), \tag{1}$$

где N_A – средний объем выборки, необходимый для перемещения от нижнего порога B к верхнему порогу A, когда истинной становится гипотеза H_1; N_B – средний объем выборки, необходимый для достижения любого из порогов с момента начала теста в предположении, что верна гипотеза H_0. Величины N_A и N_B вычисляются по формулам

$$N_A = (A–B)/\mu_1 \quad \text{и} \quad N_B = (\alpha A+(1–\alpha)B)/\mu_0, \tag{2}$$

где μ_0 и μ_1 – средние значения величин изменения отношения правдоподобия λ_k после очередного шага теста, соответствующие гипотезам H_0 и H_1. Значения μ_0 и μ_1 вычисляют согласно уравнениям чувствительности фильтра Калмана в предположении, что модель режима движения объекта соответствует основной гипотезе, а модель, заданная в фильтре Калмана, – альтернативной гипотезе [10]:

$$\mu_0 = \ln\left|\Sigma_0\right|^{1/2} - \ln\left|\Sigma_1\right|^{1/2} + \frac{1}{2}\left\{\sum_{i,j=1}^{m}\left(\bar{\sigma}_{ij}^{0}\sigma_{ij}^{0}\right) - m\right\}, \tag{3}$$

$$\mu_1 = \ln\left|\Sigma_0\right|^{1/2} - \ln\left|\Sigma_1\right|^{1/2} + \frac{1}{2}\left\{m - \sum_{i,j=1}^{m}\left(\bar{\sigma}_{ij}^{1}\sigma_{ij}^{1}\right)\right\}, \tag{4}$$

где m – размер вектора измерений, Σ_0 и Σ_1 – установившиеся значения ковариационных матриц невязок измерений в фильтрах Калмана, соответствующих гипотезам H_0 и H_1; σ_{ij}^{0}, σ_{ij}^{1} – элементы матриц Σ_0^{-1} и Σ_1^{-1}; $\bar{\sigma}_{ij}^{0}$, $\bar{\sigma}_{ij}^{1}$ – элементы матриц $\bar{\Sigma}_0$ и $\bar{\Sigma}_1$, вычисленных как установившиеся значения фактических корреляционных матриц невязок измерений.

В докладе представлена строгая формулировка алгоритма оценивания размера банка конкурирующих фильтров.

Программная реализация алгоритма. Алгоритм реализован на языке MATLAB. Входными данными являются матрицы–параметры гибридной стохастической модели, соответствующие основной H_0 и альтернативной H_1 гипотезам, начальное значение вектора состояния x, вероятности ошибок первого и второго рода. Выходные данные – оценка N объема банка конкурирующих фильтров Калмана. На рисунке показаны результаты работы алгоритма в виде графика зависимости N от величины радиуса поворота r в случае, когда основной гипотезой является круговое движение при повороте влево, а альтернативной – поворот вправо с радиусом r.

Рис. 1. Результаты работы алгоритма

Значения входных данных для тестового примера следующие: $x_{start} = [1, 0.5, 1, 0.5]^T$, $r \in [1, 20]$, матрица ковариаций порождающего шума в модели объекта $Q = \mathrm{diag}[0.001, 0.001]$, матрица ковариаций шума измерений $R = \mathrm{diag}[0.1, 0.1]$, $\alpha = \beta = 0.001$. По рисунку видно, что при увеличении радиуса поворота средний объем выборки (и, соответственно, объем банка фильтров), необходимый для принятия решения, возрастает, что связано с ухудшающейся различимостью гипотез.

Заключение. В докладе представлен алгоритм оценки объема банка конкурирующих фильтров Калмана. Математическое основание предложенного алгоритма составляет теоретическая оценка среднего объема выборки, необходимого для принятия решения о выборе из двух гипотез в соответствии с последовательным критерием Вальда. Результаты работы будут использованы как для исследования свойств гибридной стохастической модели, так и для решения задачи скорейшего обнаружения изменения режима движения объекта по сложной траектории на основе гибридной стохастической модели.

Работа проводилась при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научных проектов № 18-37-00220 мол_а и № 18-41-732003 р_мк.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Семушин И.В., Цыганов А.В., Цыганова Ю.В., Голубков А.В.** Моделирование и оценивание траектории движущегося объекта // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия : Математическое моделирование и программирование. 2017. Т. 10. № 3. С. 108–119.
2. **Golubkov A.V., Tsyganov A.V., Tsyganova Yu.V.** Adaptive estimation of an object motion parameters based on the hybrid stochastic model // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1096, No. 1. P. 012166.
3. **Wald A.** Sequential Analysis. New York : John Wiley and Sons, 1947. 212 p.
4. **Ширяев А.Н.** Статистический последовательный анализ. М. : Наука, 1976. 272 с.
5. **Basseville M., Benveniste A.** Detection of abrupt changes in signals and dynamical systems. Springer, 1986. 373 p.
6. **Tse L.L.** Sequential Analisys : Some Classical Problems and New Challenges // Statistica Sinica. 2001. Vol. 11. No. 1. P. 303–408.
7. **Захаров К.В.** Динамическая настройка обнаружения маневра морской цели // Автоматизация процессов управления. 2011. №. 4(26). С. 23–30.
8. **Коновалов А.А.** Основы траекторной обработки радиолокационной информации. СПб. : Изд-во СПбГУ “ЛЭТИ”, 2013. 164 с.
9. **Эхеа-Рока Д., Секо-Гранадос Г., Лопес-Салседо Х.А.** Обзор теории скорейшего обнаружения и ее применение для выявления угроз ГНСС // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. № 4(95). С. 76–97.
10. **Semoushin I.V., Tsyganova J.V., Kulikova M.V.** Fault Point Detection with the Bank of Competitive Kalman Filters // Computational Science – ICCS2003, International Conference, Melbourne, Australia and St.Petersburg, Russia, (June 2-4 2003) P.M.A. Sloot et al. (Eds.): ICCS 2003. LNCS 2658. P. 417–426, 2003. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003.
11. **Kalmuk A., Granichin O., Granichina O., Ding M.** Detection of Abrupt Changes in Autonomous System Fault Analysis Using Spatial Adaptive Estimation of Nonparametric Regression // Proceedings of the American Control Conference (ACC), Boston Marriott Copley Place, July 6-8, 2016. P. 6839–6844.
12. **Bar-Shalom Y. Li X.R., Kirubarajan T.** Estimation with Applications to Tracking and Navigation : Theory, Algorithms and Software. New Jersey : John Wiley & Sons, Inc., 2001. 580 p.

A.V. Golubkov *(*Ulyanovsk State Pedagogical University named after I.N. Ulyanov). **On estimation of the size of the bank of competitive Kalman filters in the problem of detection of the object motion mode based on a hybrid stochastic model**

Abstract. The paper presents a computational algorithm for estimating the volume of a bank of competitive Kalman filters in the problem of the detection the motion mode of an object moving along a complex trajectory modeling with the use of a hybrid stochastic model. The algorithm has been implemented in MATLAB. The result obtained is applicable both to the hybrid stochastic model study and to solve the problem of early detection of changes in the motion mode.

УДК 681.518.54

И.Ю. МЕРКУЛОВА
(Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ, ОСОБЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДЛЯ СЛУЧАЯ ДВИЖЕНИЯ ПЕШЕХОДОВ

Проводится обзор применения систем технического зрения в задачах прогнозирования движения объектов. Отдельное внимание уделяется прогнозированию движения пешеходов, так как в этом случае на последнем этапе прогноза техническое зрение может дополнительно выделять детали движения, свойственные только человеку.

Введение. Камеры уже на протяжении многих лет входят в промышленное производство систем содействия водителю. Приборы монокулярного ночного зрения, системы помощи при парковке, контроля дорожной разметки, распознавания дорожных знаков, защиты пешеходов – вот небольшой перечень систем содействия водителю, основанных на техническом зрении, уже успевших закрепиться на автомобильном рынке [1, 2]. Несмотря на последние достижения в сфере разработки беспилотных автомобилей, от полностью автоматизированного транспорта нас отделяют еще десятки лет. Есть несколько тому причин: во-первых, необходимы системы искусственного интеллекта, которые своевременно перестраивались бы в зависимости от непредсказуемых ситуаций, возникающих на дороге, а также системы, способные предсказывать движение участников дорожного движения [3]. Во-вторых, существующие системы технического (компьютерного) зрения все еще допускают ошибки с частотой, неприемлемой для автономной навигации.

Работа посвящена исследованию возможности и перспектив применения систем технического зрения в задаче прогнозирования движения объектов, а также выделению особенностей решения этой задачи для прогнозирования движения пешеходов.

Задача прогнозирования движения объектов. Прогнозирование движения объектов по данным систем технического зрения традиционно включает в себя три этапа: этап обнаружения объектов, этап слежения за объектами и этап прогноза динамики полученных траекторий движения.

Обнаружение объектов. Традиционно обнаружение объектов на изображении включает в себя предобработку, нацеленную на улучшение качества изображения, выделение областей интереса, обнаружение и классификацию объектов. На завершающем этапе часто проводится верификация полученных результатов.

Идентификация и классификация объектов может выполняться с помощью детерминированных алгоритмов, например, с помощью метода скользящего окна, однако на практике это оказывается ресурсозатратно [4]. В 2003 году было предложено привлекать для классификации алгоритмы машинного обучения AdaBoost [5]. Вслед за этим в исследованиях стал применяться линейный классификатор методом опорных векторов. В паре с гистограммой направленных градиентов он стал распространенным инструментом в задаче классификации. Однако скорость обработки изображений в таком подходе все еще не удовлетворяла требованиям систем, работающих в режиме реального времени. Значительное улучшение результатов методов классификации произошло вследствие внедрения сверточных нейронных сетей (Convolutional Neural Networks, CNN). Изначально CNN были внедрены в методы скользящего окна [6], анализирующего всю плоскость изображения на различных масштабах. Производительность первых подходов была невелика, и появилась идея вводить сети региональных предположений, которые имели бы общие сверточные функции с сетью детектирования, что позволило бы уменьшить вычислительные затраты. То есть идея сети региональных предположений основана на понимании того, что детектор (Faster R-CNN [7]) требует предположения по окнам-кандидатам только после первых сверточных слоев, а карты признаков, которые получаются после этих первых слоев, могут быть использованы для генерации окон-кандидатов. Таким образом,

Научный руководитель к.т.н., доцент Шаветов С.В.

большое количество вычислений может быть сокращено, если внести этап поиска регионов в нейросеть. Один из лучших существующих подходов предлагает для изображений на основе контекстных и семантических моделей создавать специфичные для разных классов трехмерные объекты-предположения (Monocular 3D) [8]. Авторы идеи Monocular 3D предлагают помещать объекты-кандидаты в трехмерные боксы (ограничительные параллелограммы), уменьшая тем самым ресурсозатратность алгоритма. Экспериментально подтверждено, что такой метод генерации объектного предложения значительно превосходит все монокулярные подходы.

Слежение за объектами. Зачастую задача слежения формулируется с помощью байесовского подхода: необходимо оценить апостериорную плотность вероятности вектора состояния, включающего текущее и предыдущие местоположения точек интереса. Существуют и другие пути решения задачи слежения: за последнее десятилетие было разработано немало методик слежения объектов с применением алгоритмов глубокого обучения. Особенно эффективно задача слежения решается с применением результатов CNN, полученных на этапе детектирования [9]. К примеру, существует подход, основанный на том факте, что последние слои CNN этапа детектирования кодируют семантическую абстракцию объектов интереса, и, следовательно, выходные данные этих слоев устойчивы к изменениям внешнего вида объектов. С другой стороны, первые слои CNN достаточно точно локализуют объекты на изображениях [10]. Синтезируя данные начальных и конечных слоев CNN, можно успешно решить задачу трекинга объектов интереса.

Особенности задачи обнаружения и слежения за пешеходами. Особенность прогнозирования движения пешеходов заключается в том, что можно привлекать различные дополнительные сведения, полученные методами технического зрения [11, 12]. Сюда можно отнести информацию о социальном взаимодействии, о положении и движении тела и отдельных его частей, о динамике движения и о ситуационной осведомленности пешехода [13]. Наконец, распознавание сцены может значительно улучшить прогноз. Такими объектами интереса сцены являются, например, дорожная разметка и знаки, указывающие на наличие пешеходного перехода. Разработка алгоритмов технического зрения, способных по изображению получить такую информацию, а также использовать ее для улучшения прогноза является на сегодняшний день наиболее актуальной задачей [14].

Заключение. Проведен обзор методов технического зрения, используемых для задач прогнозирования движения объектов. Зрительные сенсоры являются основными источниками информации на первых двух этапах прогнозирования, заключающихся в детектировании и отслеживании объектов. Не менее полезным оказываются алгоритмы технического зрения и на этапе прогноза в случае рассмотрения движения пешеходов. Множество характеристик этого движения можно вынести из различных семантических особенностей. Следующим толчком в развитии методов прогнозирования движения пешеходов должна стать реализация всестороннего комплексного подхода, который учитывал бы индивидуальные особенности человека и окружающей его обстановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **K. Bengler, K. Dietmayer, B. Färber, M. Maurer, C. Stiller, H. Winner**. Three decades of driver assistance systems - review and future perspectives, IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 6, no. 4, pp. 6–22, 2014.
2. **M. Maurer.** Forward collision warning and avoidance, in Handbook of Intelligent Vehicles, Ed. London: Springer, pages 657–687, 2012.
3. **S. Lefevre, D. Vasquez, C. Laugier.** A survey on motion prediction and risk assessment for intelligent vehicles, ROBOMECH Journal, vol. 1, no. 1, 2014.
4. **J. Hosang, R. Benenson, B. Schiele.** How good are detection proposals, really? in BMVC, 2014.
5. **P. Viola, M.J. Jones, D. Snow.** Detecting pedestrians using patterns of motion and appearance, in: International Conference on Computer Vision, Nice, France, Oct 13–16, 2003.
6. **P. Sermanet, K. Kavukcuoglu, S. Chintala, and Y. LeCun.** Pedestrian detection with unsupervised multi-stage feature learning. In CVPR, 2013.
7. **S. Ren, K. He, R. Girshick, and J. Sun.** Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks. arXiv preprint arXiv:1506.01497, 2015.

8. **X. Chen, K. Kundu, Z. Zhang, H. Ma, S. Fidler, and R. Urtasun.** Monocular 3d object detection for autonomous driving // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 2147–2156, 2016.
9. **H. Li, Y. Li, F. Porikli.** Deeptrack: Learning discriminative feature representations by convolutional neural networks for visual tracking, in BMVC, 2014.
10. **C. Ma, J.-B. Huang, X. Yang, and M.-H. Yang.** Hierarchical convolutional features for visual tracking. In ICCV, pages 3074–3082, 2015.
11. **M. S. Shirazi, B. Morris.** Observing Behaviors at Intersections: A Review of Recent Studies & Developments. In 2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pages 1258–1263, 2015.
12. **D. Ridel, E. Rehder, M. Lauer, C. Stiller, D. Wolf.** A Literature Review on the Prediction of Pedestrian Behavior in Urban Scenarios. In 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems, pages 3105–3112, 2018.
13. **N. Brouwer, H. Kloeden, C. Stiller.** Comparison and Evaluation of Pedestrian Motion Models for Vehicle Safety Systems. 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Windsor Oceanico Hotel, Rio de Janeiro, Brazil, November 1-4, 2016.
14. **T. Hirakawa , T. Yamashita, T. Tamaki, H. Fujiyoshi.** Survey on vision-based path prediction // Distributed, Ambient and Pervasive Interactions: Technologies and Contexts. Springer International Publishing, pages 48–64, 2018.

I.Yu. M[illegible]ulova (ITMO University, St Petersburg)**. Computer vision use in the field of the objects movement prediction purposes. Prediction problem solution for the case of pedestrian movements.**

Abstract. The article provides a review of application of computer vision systems in the objects movement prediction area. Special attention is paid to the prediction of pedestrian traffic, as in this case, at the last stage of the forecast, computer vision can further highlight the details of the movement peculiar only to a human.

УДК 004.932

М.В. ТЕСТОВ
(Университет ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ ПАНОРАМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕСКОЛЬКИХ ЗАФИКСИРОВАННЫХ КАМЕР

Представлен алгоритм формирования панорамных изображений при помощи нескольких размещенных по кругу камер с частично перекрывающимися полями зрения. Проведена апробация алгоритма на созданном макете панорамного модуля, как в помещении (наблюдение за близкими объектами), так и на открытом пространстве (наблюдение за удаленными объектами). Визуальная оценка результатов работы панорамного модуля показала его работоспособность, а также корректность разработанного алгоритма.

Введение. В настоящее время системы, осуществляющие панорамную съемку, обрели большую популярность [1]. Возможными областями применения таких систем являются обеспечение безопасности судовождения, контроль всплытия подводных аппаратов и контроль пограничных вод. Решение указанных задач должно осуществляться в реальном времени [2].

В литературе широко рассмотрены методы формирования панорам из серии кадров, полученных одной камерой в заранее неизвестных положениях [3; 4], однако практически отсутствуют материалы о тех случаях, когда камер несколько и они расположены на стационарных позициях друг относительно друга [5].

В докладе представлено решение задачи формирования панорамы при помощи 6 камер, расположенных по кругу в заданных положениях с частично перекрывающимися полями зрения, при наблюдении за удаленными объектами.

Алгоритм формирования панорамы. В результате анализа существующих подходов получен алгоритм формирования панорамы, состоящий из 4 этапов [6].

Калибровка камер. На этапе оцениваются оптические характеристики камер, определяющие параметры проецирования трехмерной сцены на плоскость матрицы камеры [7]. Отметим, что оценка этих параметров требуется однократно для каждой камеры.

Получение серии изображений. На вход алгоритма одновременно поступают изображения с 6 откалиброванных камер.

Проекция и совмещение изображений. Для формирования панорамы необходимо спроецировать все полученные изображения на одну поверхность и совместить их. Для отображения окружающего пространства с углом обзора 360° по горизонтали и ограниченным углом обзора по вертикали использовалась вспомогательная поверхность в виде цилиндра. Алгоритм формирования панорамы сводится к перепроецированию кадров на цилиндр со сдвигом по его поверхности на величину, равную углу поворота камер θ друг относительно друга.

Для представления панорамы использовалась развертка цилиндра на плоскость, тогда сдвиг кадров выражается величиной *x*, пропорциональной θ:

$$x = s \cdot \theta, \quad (1)$$

где θ – угол поворота камеры относительно вертикальной оси, *s* – масштабный коэффициент.

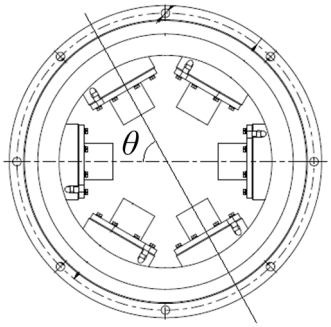
Постобработка. В результате наложения изображений на одну поверхность возникают области совмещения с различными уровнями яркости. Для обработки этих областей было выбрано альфа сглаживание, при котором «вес» пикселей изображения при формировании панорамы пропорционален расстоянию до границы изображения [8].

Панорама.

Научный руководитель к.т.н., доцент Лопарев А.В.

Реализация алгоритма и его апробация. Алгоритм реализован на языке программирования Python с использованием библиотеки OpenCV. Программное обеспечение позволяет формировать панораму из 1920x1080 пикселей (фотопанорама), а также панорамное видео из потоков разрешением 640x480 пикселей с частотой кадров 25 Гц. Время создания одного кадра разрешением 3255 x 480 пикселей составило менее 200 мс.

Для апробации алгоритма разработан и изготовлен макет панорамного модуля с шестью камерами, расположенными по кругу в одном цилиндрическом корпусе. Для получения изображения использованы IP-камеры (см. рисунок).



Панорамный модуль

Отметим, что при использовании 6 камер появляются нестыковки изображений при формировании панорамы в помещении, что обусловлено присутствием объектов на близком расстоянии. При съемке удаленных объектов визуальная оценка панорамных изображений показала хорошие результаты, что подтверждает корректность реализации алгоритмов для решения задачи формирования панорамных изображений.

Заключение. Разработан алгоритм построения панорамы с учетом особенностей наблюдения за удаленными объектами с использованием нескольких камер размещенных по кругу с частично перекрывающимися полями зрения. Разработан и изготовлен макета панорамного модуля перископа. Испытания макета произведены как в помещении (наблюдение за близкими объектами), так и на открытом пространстве (наблюдение за удаленными объектами). Визуальная оценка результатов работы панорамного модуля показала его работоспособность и корректность разработанного алгоритма обеспечения в рамках поставленной задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Faugeras O.** Panoramic vision: sensors, theory, and applications. Springer Science & Business Media, 2013.
2. **Rose M.K.** Real-time 360° imaging system for situational awareness / M.K. Rose, J. Chamberlain, D. LaValley // Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense VIII Sensors, and Command, Control, Communications, and Intelligence (C3I) Technologies for Homeland Security and Homeland Defense VIII // International Society for Optics and Photonics, 2009. T. 7305. C. 73050D.
3. **Szeliski R.** Image alignment and stitching: A tutorial // Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision. 2006. Vol. 2. № 1. P. 1–104.
4. **Xiong Y., Pulli K.** Fast panorama stitching for high-quality panoramic images on mobile phones // IEEE Transactions on Consumer Electronics. 2010. T. 56. № 2.
5. **J.-H. Suk** [et al.]. Fixed Homography–Based Real-Time SW/HW Image Stitching Engine for Motor Vehicles // ETRI Journal. 2015. Vol. 37. № 6. P. 1143–1153.
6. **Тестов М.В.** Реализация алгоритмов обработки изображений в задаче панорамного наблюдения // XX Конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». 2018. С. 180–182.
7. **Zhang Z.** A flexible new technique for camera calibration // IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence. 2000. Vol. 22. № 11. P. 1330–1334.
8. **Prados R., Garcia R., Neumann L.** Image blending techniques and their application in underwater mosaicing. T. 13. Springer, 2014.

M.V. Testov (ITMO University, Concern CSRI Elektropribor JSC, Saint-Petersburg). **Panorama stitching algorithm using multiple fixed cameras**

Abstract. Panorama stitching algorithm using multiple cameras with partially overlapping fields of view placed in a circle is presented. The concept of panoramic module was created. With help of which the algorithm was tested, both indoors (observation of close objects) and in open space (observation of distant objects). A visual assessment of the performance of the panoramic module proved its operability and correctness of the developed algorithms.

УДК 681.51

А.С. ДОРОФЕЕВ
(Санкт-Петербургский государственный университет)

МЕТОД ГРАДИЕНТНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ В ЗАДАЧЕ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОСЕТЕЙ

Работа посвящена методу классификации динамических процессов по наблюдениям, сделанным в разные моменты времени с использованием однослойного перцептрона. В отличие от известных методов, корректировка вывода перцептрона достигается путем введения весов в виде аффинных функций, которые определяются методом градиентной обратной связи. Результатом работы является алгоритм, решающий поставленную задачу классификации.

Введение. В работе рассматривается задача классификации динамических процессов по наблюдениям, сделанным в разные моменты времени. Для решения такой задачи предлагается использовать однослойный перцептрон, коэффициенты которого изменяются во времени вместе с процессами [1].

Для классификации статических процессов с успехом могут применяться стандартные методы построения перцептронов и их обучения, например метод обратного распространения ошибки. Однако в случае динамических процессов такой подход никак не будет учитывать динамику, и качество классификации будет снижаться со временем. Предлагаемый в работе метод учитывает динамику процессов за счет введения динамически изменяющихся во времени весов. Предполагается, что с такой временной поправкой целевая функция $Q(t)$ будет дольше находиться в желаемой зоне, т.е. качество классификации будет снижаться медленнее.

Постановка задачи распознавания. Имеется N процессов $x_k(t)$, $k=\overline{1...N}$, каждый из которых принадлежит либо классу C_A, либо классу C_B. Для каждого процесса наблюдается M величин: $y_1(x_k(t)),\ldots,y_M(x_k(t))$. Требуется построить классификатор, который по вектору наблюдений $[y_1(x(t_0)),\ldots,y_M(x(t_0))]^{\mathrm{T}}$ будет относить процесс $x_k(t)$ к его классу. На практике подобные задачи могут возникать при мониторинге столкновения роев беспилотных летательных аппаратов или живых систем.

Пример решения задачи с использованием метода градиентной обратной связи. Приведем пример построения однослойного перцептрона с одним нейроном на выходе и весами, которые есть функции времени: $\omega(t)=[\omega_1(t),\ldots\omega_M(t)]$, который решает поставленную задачу классификации.

Выход перцептрона в этом случае определяется как:

$$z(x(t))=z(y(x(t)),\omega(t))=f(y_1\omega_1(t)+y_2\omega_2(t)+\ldots+y_M\omega_M(t))=\begin{cases}\geq 0\Rightarrow C_A\\ <0\Rightarrow C_B\end{cases}, \quad (1)$$

где $f(l)=\dfrac{2}{1+e^{-l}}-1$ – функция активации нейрона (сигмоида).

Пусть $x_1(t),\ldots x_S(t)$ – обучающая выборка. Тогда целевая функция ошибки:

$$Q(t)=Q(z(x_1(t)),\ldots,z(x_S(t)),t)=\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{S}[z(x_k(t))-z^*(x(\cdot))]^2, \quad (2)$$

где

Научный руководитель к. ф.-м. н., доцент Ананьевский М.С.

$$z(x(t)) = z(y(x(t)),\omega(t)) = f(y_1(x(t))\omega_1(t) + \cdots + y_M(x(t))\omega_M(t));\ z^* = \begin{cases} 1, & x(\cdot) \in C_A \\ -1, & x(\cdot) \in C_B \end{cases};$$

Функция времени $\omega(t)$ задается в аффинном виде:

$$\omega(t) = \omega^{BP} + \omega^{SG} t, \tag{3}$$

где: $\omega^{BP} = [\omega_1^{BP}, \ldots, \omega_M^{BP}]$ – весовые коэффициенты, найденные с использованием метода обратного распространения ошибки [2]; $\omega^{SG} = [\omega_1^{SG}, \ldots, \omega_M^{SG}]$ – весовые коэффициенты, которые рассчитываются согласно методу скоростного градиента [3] исходя из ограничений целевой функции ошибки $\dot{Q}(0) = \dot{Q}_{\max}$, где $\dot{Q}_{\max}$ – заранее заданная константа. Для получения этих коэффициентов необходимо решить задачу минимизации функционала:

$$J(\dot{Q}(0)) = \frac{1}{2}(\dot{Q}(0) - \dot{Q}_{\max})^2, \tag{4}$$

где $\dot{Q}(0) = \sum_{k=1}^{S}(z(x_k) - z^*(x_k(\cdot)))\frac{2e^{-L(x_k)}}{(1+e^{-L(x_k)})^2}\sum_{j=1}^{M}(\omega_j^{BP}\dot{y}_j(x_k) + y_j(x_k)\omega_j^{SG})$, $x_k(0) = x_k$.

Поиск осуществляется в направлении, противоположном градиенту целевой функции ошибки с использованием итерационной процедуры поиска с шагом:

$$\Delta\dot{\omega}_i(t) = \Delta\omega_i^{SG} = -\gamma\frac{\partial J(\dot{Q}(0))}{\partial\omega_i^{SG}} = -\gamma(\dot{Q}(0) - \dot{Q}_{\max})\frac{\partial\dot{Q}(0)}{\partial\omega_i^{SG}}, \tag{5}$$

где $0 < \gamma < 1$, $i = 1, \ldots, M$,

$$\frac{\partial\dot{Q}(0)}{\partial\omega_i^{SG}} = \sum_{p=1}^{S}(z(x_p) - z^*(x_p(\cdot)))\frac{2e^{-L(x_p)}}{(1+e^{-L(x_p)})^2}\sum_{j=1}^{M}(\omega_j^{BP}\dot{y}_j(x_p) + y_j(x_p)\omega_j^{SG}).$$

Порог $\dot{Q}_{\max}$ задается экспертом из общего представления о системе, его физический смысл – предельное значение скорости ухудшения классификатора, т.е. как быстро могут расти ошибки классификации с течением времени. Предположим, что с такой временной поправкой целевая функция ошибки $Q(t)$ будет дольше находиться в желаемой зоне, т.е. обеспечивает заданные вероятности ошибки идентификации.

Заключение. Предложен алгоритм построения однослойного перцептрона с динамически меняющимися коэффициентами для решения задачи классификации динамических процессов по наблюдениям, сделанным в разные моменты времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гелиг А.Х., Матвеев А.С.** Введение в математическую теорию обучаемых распознающих систем и нейронных сетей. СПб.: Издательство СПбГУ, 2014. 224 с.
2. **Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J.** Learning Internal Representations by Error Propagation. In: Parallel Distributed Processing, vol. 1, pp. 318—362. Cambridge, MA, MIT Press. 1986.
3. **Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.

A.S. Dorofeev (SPBU, Saint-Petersburg). **Gradient feedback method for training artificial neural network**

Abstract. The paper is concerned with the method of classifying dynamic processes by instant observations using a single-layered perceptron. The correction of the perceptron output is achieved by adding the weights as a form of the affinity functions. This affinity functions are defined by the gradient feedback method. Result of this work is an algorithm that solves the given classification task.

УДК 621.391.172

В.А. ВАСИЛЬЕВ, А.Б. ТОРОПОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ ПЕРЕВЫБОРКИ В ФИЛЬТРЕ ЧАСТИЦ ДЛЯ КОРРЕКЦИИ ПОКАЗАНИЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КАРТ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Рассматриваются две модификации алгоритма коррекции навигационной системы по информации о геофизическом поле на основе метода Монте-Карло. В одной из них предполагается использование так называемой последовательной перевыборки, а в другой такая перевыборка не применяется. Проводится оценка их вычислительной сложности и сопоставление по точности для случая использования геофизических полей с различной степенью изменчивости.

Введение. При решении широкого класса задач обработки навигационной информации используются методы нелинейной байесовской фильтрации [1–4]. Одним из наиболее универсальных алгоритмов, обеспечивающих высокую точность оценивания, является так называемый фильтр частиц (particle filter), или метод Монте-Карло, использующий последовательную существенную выборку [2–10]. Недостатками этого алгоритма являются высокая вычислительная сложность и снижение точности оценивания при увеличении числа измерений (так называемая проблема деградации весов [8–10]). Высокую вычислительную сложность можно до определенной степени компенсировать, используя процедуру частичного аналитического интегрирования. Деградация весов может быть компенсирована при помощи процедуры систематической повторной перевыборки с минимальными отклонениями [10].

Цель настоящей работы заключается в оценке эффективности применения процедуры перевыборки в задаче коррекции навигационной системы (НС) по данным измерителя и карты геофизического поля при различной изменчивости поля и при значительном числе измерений. Термин эффективность здесь рассматривается с позиций соотношения получаемых характеристик точности и вычислительной сложности.

Постановка задачи. Представим координаты подвижного объекта на плоскости, поступающие от навигационной системы $X_i^{HC} = \left(x_i^{HC} \quad y_i^{HC} \right)^T$ в дискретные моменты времени в виде суммы истинных координат $X_i^{true} = \left(x_i^{true} \quad y_i^{true} \right)^T$ и неизвестных погрешностей $\Delta X_i = (\Delta x_i \;\; \Delta y_i)^T$, которые, в свою очередь, могут быть записаны как:

$$\Delta x_i = \overline{\Delta x_i} + \delta x_i, \Delta y_i = \overline{\Delta y_i} + \delta y_i, \tag{1}$$

где $\overline{\Delta x_i}$, $\overline{\Delta y_i}$ (км) – постоянные составляющие погрешностей НС; $\delta x_i, \delta y_i$ (км) – составляющие, описывающие изменчивость погрешностей НС за время решения задачи. Постоянные составляющие Δx_i, Δy_i моделируются как случайные константы. Переменные составляющие $\delta x_i, \delta y_i$ вместе с погрешностями определения составляющих скорости $\delta V_i^x, \delta V_i^y$ описываются марковским процессом второго порядка.

Предполагается, что на борту объекта имеется карта и измеритель некоторого геофизического поля, например, поля аномалий силы тяжести (АСТ), измеряемое бортовым гравиметром [11]. Измерения поля записываются виде:

$$z_i = G_{ap}\left(X_i^{true} \right) + \varepsilon_i, \; i = 1, 2, ..., Nz, \tag{2}$$

Научный руководитель д.т.н., проф. Степанов О.А.

где N_Z – число измерений, $G_{ap}\left(X_i^{true}\right)$ – карта поля, задаваемая значениями поля в узлах сетки и правилом аппроксимация между ними, ε_i – суммарная погрешность карты и измерителя, представляемая в виде суммы случайной константы c_i=c_0 и дискретного белого шума v_i, Константу c_i=c_0 полагаем центрированной нормально распределенной случайной величиной, с известной дисперсией, независимой от белого шума v_i, дисперсия которого так же известна.

При построении алгоритма коррекции считается, что погрешности НС и систематическую компоненту ошибки измерения можно описать в виде векторной случайной последовательности $\Xi_i = \left[\overline{\Delta x_i}, \overline{\Delta y_i}, \delta x_i, \delta y_i, \delta V_i^x, \delta V_i^y, c_i\right]^T$ [8]. Начальная матрица ковариации P_0^{Ξ} составного вектора Ξ_i считается заданной.

Задача коррекции показаний НС по данным карты и измерителя поля сводится к фильтрации вектора состояния Ξ_i по измерениям вида

$$z_i = s_i\left(\Delta x_i, \Delta y_i\right) + \varepsilon_i,\ i = 1, 2, ..., Nz, \tag{3}$$

где $s_i\left(\Delta x_i, \Delta y_i\right) = G_{ap}\left(X_i^{HC} - \Delta X_i\right)$. Известно, что для определения оптимальной в среднеквадратическом смысле оценки в рамках байесовского подхода необходимо найти математическое ожидание, соответствующее апостериорной плотности для оцениваемого вектора Ξ_i [1, 3–4, 8]. Для его вычисления, как отмечено во введении, зачастую используется так называемый фильтр частиц [3–6].

Исследование алгоритмов коррекции навигационной системы. В работе приводится детальное описание алгоритма, основанного на фильтре частиц, использующего последовательную существенную выборку и частичное аналитическое интегрирование, применяемое при решении рассматриваемой задачи фильтрации, а также описывается процедура перевыборки для алгоритмов такого типа [6–8]. Трудоемкость, выраженная в количестве операций, производимых на каждом шаге, для двух модификаций рассматриваемого алгоритма приведена в таблице 1.

Таблица 1

Количество операций, необходимое на каждом шаге при работе particle filter, использующего L частиц

Тип алгоритма/Тип операции	Без перевыборки	С перевыборкой
Умножение	$49*L$	$48*L$
Сложение	$41*L$	
Аппроксимации значений поля с использованием карты АСТ	L	
Вычисления экспоненты	L	
Упорядочивание массива из L элементов	-	1
Генерирование гауссовской случайной величины с известной дисперсией	$4*L$	
Генерирование равномерно распределенной случайной величины на интервале $[0,1]$	-	L
Сравнение 2-х вещественных чисел	-	L

Генерирование равномерно распределенных случайных величин необходимо непосредственно при проведении перевыборки [10]. Из приведенных результатов видно, что использование процедуры перевыборки в общем случае увеличивает трудоемкость алгоритма коррекции. Вместе с тем следует отметить, что в случае, если в памяти хранится большой массив равномерно распределенных случайных величин, то время работы двух модификаций исследуемого алгоритма будет практически одинаковым.

В работе также проводится сопоставление точности, достигаемой при фиксированном количестве частиц для алгоритма без использования процедуры перевыборки и с ее применением для различных геофизических полей с разным уровнем изменчивости, данные приведены в таблице 2. При решении задачи оценивания начальное среднеквадратическое отклонение ошибки НС ΔX_0 составляло 1 км.

Таблица 2

Обобщенные результаты оценки эффективности алгоритмов на различных картах после 30 измерений при фиксированном количестве частиц L=10000

Номер карты	Средний градиент поля на карте вдоль оси $\overrightarrow{OX}$ (мГал/км)	Средний градиент поля на карте вдоль оси $\overrightarrow{OY}$ (мГал/км)	Итоговое среднеквадратическое отклонение погрешности определения координат, алгоритма без перевыборки (м)	Итоговое среднеквадратическое отклонение погрешности определения координат, алгоритма с перевыборкой (м)	Соотношение точности определения координат алгоритма без использования перевыборки и с ее применением
1	0.6	0.2	960	960	100 %
2	0.7	0.6	680	550	80 %
3	3.3	3.1	550	470	85 %

Заключение. Рассчитано количество операций, необходимое на каждом шаге при работе двух модификаций алгоритма нелинейной фильтрации на основе метода Монте-Карло для решения задачи коррекции показаний НС по данным карты и измерителя поля. Показано, что применение процедуры перевыборки позволяет при фиксированном количестве частиц повысить точность решения задачи в случае сильно изменчивого поля. При решении задачи коррекции на слабоизменчивом поле, при низком уровне суммарных ошибок карты и измерителя и малой изменчивости ошибок НС использование процедуры перевыборки не дает выигрыша в точности.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 18-08-01101а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2003, 369 с.
2. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания. СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 509 с.
3. **Bergman N.** Recursive Bayesian estimation. Navigation and tracking applications. Linkoping Studies in Science and Technology. Dissertations-No. 579. Department of Electrical Engineering Linkoping University, SE-581-83 Linkoping, Sweden, 1999, 204 p.
4. **Степанов О.А.**, **Торопов А.Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизических полям. Часть 2. Современные тенденции развития //Гироскопия и навигация. 2015. № 4, С.147–159.
5. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Применение последовательных методов Монте-Карло с использованием процедур аналитического интегрирования при обработке навигационной информации // В сборнике: XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014 Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014. С. 3324–3337.
6. **Doucet A., de Freitas N. and Gordon N.J.** Sequential Monte Carlo Methods in Practice, New York: Springer-Verlag, 2001. 581 p.
7. **Gustafsson, F.** Particle filter theory and practice with positioning applications // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol. 25, no. 7 PART 2, pp. 53–81, 2010.
8. **Торопов А.Б.** Алгоритмы фильтрации в задачах коррекции показаний морской навигационной системы с использованием нелинейных измерений: дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург: ОАО "Концерн "ЦНИИ «Электроприбор», 2013. 147 с.
9. **Торопов А.Б., Степанов О.А.** Использование последовательных методов Монте-Карло в задаче корреляционно-экстремальной навигации. Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53. № 10. С. 49–54.
10. **Chen Z.** Bayesian Filtering: From Kalman Filters to Particle Filters, and Beyond // Statistics: A Journal of Theoretical and Applied Statistics, vol. 182, no. 1, pp. 1–69, 2003.
11. **Пешехонов В.Г., Степанов О.А. и др.** Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2017.

V.A.Vasilev, A.B.Toropov (State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Electropribor, JSC, Saint Petersburg). **Application of the resampling procedure in nonlinear filtering algorithm based on the Monte-Carlo method to solve the problem of the inertial navigation system correction using the data of the gauge and geophysical field map**

Abstract. Two variants of the error estimation algorithm of the inertial navigation system based on the Monte-Carlo method using a Sequential Importance Sampling without using the resampling procedure and with its use are considered. Calculation of their computational complexity and comparison of their potential accuracy is made. The efficiency of the resampling procedure on maps with different values of the geophysical field variability is estimated.

УДК 53.088.7

А.О. КОСТРОМИТИН,
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», Санкт-Петербург)

Л.Б. ЛИОКУМОВИЧ, К.В. МУРАВЬЕВ
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИДРОФОНА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ФАЗОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОМУ СИГНАЛУ

Работа посвящена проблеме снижения ошибки, возникающей при изменениях амплитуды вспомогательной модуляции в волоконно-оптическом интерферометрическом гидрофоне. Рассмотрена возможность активной подстройки требуемого значения амплитуды модуляции на основе нахождения ее фактического значения по регистрируемому интерференционному сигналу и определены особенности применения алгоритма такой подстройки. Полученный результат может быть использован для построения системы автоматической подстройки амплитуды вспомогательной фазовой модуляции для волоконно-оптических интерферометрических гидрофонов.

Введение. Использование волоконно-оптических гидрофонов имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными пьезокерамическими преобразователями, а именно: возможность значительного удаления гидрофона от аппаратуры обработки, невосприимчивость к электромагнитным помехам, возможность объединения нескольких гидрофонов с использованием одного оптического волокна [1]. При этом большинство современных волоконно-оптических гидроакустических датчиков построено на основе интерферометров [2]. Внешнее воздействие на чувствительный волоконный элемент, так или иначе включенный в интерферометрическую схему, приводит к изменению разности фаз φ интерферирующих лучей, что приводит к колебанию интенсивности света на выходе интерферометра.

Однако применение волоконно-оптических интерферометров имеет ряд особенностей, в частности, требуется процедура демодуляции интерференционного сигнала $u(t)$, получаемого на выходе фотоприемника, для выделения колебаний измеряемого параметра φ, несущих информацию о воздействии акустического давления на волоконный чувствительный элемент. Реализация такой обработки требуется введения вспомогательной фазовой модуляции $\psi(t)$ в сигнал интерферометра. При этом часто используются гармоническая модуляция $\psi(t)$ и алгоритмы, исходно полученные для аналоговых методов обработки, основанные на анализе соотношений амплитуд гармоник сигнала $u(t)$ [3]. Но для современных устройств целесообразными представляются полностью цифровые методы [4, 5], которые исходно основаны на анализе наборов дискретных отсчетов интерференционного сигнала с решением систем уравнений, которые допускают разные формы сигнала вспомогательной модуляции и могут обеспечить лучший динамический диапазон.

Одной из существенных проблем при практической реализации подобных устройств является дрейф амплитуды вспомогательной модуляции Ψ_m вследствие дрейфа параметров модулятора и ее отклонение от требуемого оптимального значения. Это приводит к возникновению ошибок и искажений в ходе демодуляции и снижению точности определения параметров измеренного акустического сигнала. Поэтому актуален анализ алгоритмов демодуляции, подразумевающих возможность контролировать Ψ_m и поддерживать ее оптимальное значение. Такой подход к организации демодуляции с одновременным выделением колебаний измеряемого параметра φ и вычислением амплитуды Ψ_m, рассмотрен в представленной работе.

Алгоритм определения амплитуды фазовой модуляции. В работе рассмотрен современный, полностью цифровой подход к демодуляции на основе вспомогательной фазовой модуляции пилообразным сигналом с частотой f_M, когда анализируется поток дискретных отсчетов интерференционного сигнала

$$u_i = U_0 + U_m \cos(\varphi + \psi_i), \quad (1)$$

где i – номер отсчета в потоке, φ – искомая разность фаз, несущая информацию об измеряемой физической величине; U_0 – постоянная составляющая, U_m – амплитуда интерференционного сигнала; ψ_i – значения сигнала вспомогательной модуляции, формируемые модулятором в составе интерференционной схемы. Пилообразная форма вспомогательной модуляции подразумевает линейное изменение значений ψ_i в течение периода модуляции. Кроме того, частоту дискретизации f_d удобно выбирать кратной частоте f_M, так, что число отсчетов на одном периоде модуляции является целым $N = f_d/f_M$.

В случае полностью цифрового подхода расчет искомой фазы φ выполняется по интервалу из Q отсчетов u_i, на основе решения Q уравнений вида (1) (требуется $Q \geq 3$). Общие выражения для расчета фазы φ приведены в [4]. В представленной работе за основу взят случай $N = Q = 4$, когда интервал детектирования совпадает с периодом вспомогательной модуляции. Если ввести верхний индекс «*q*», соответствующий значениям сигнала вспомогательной модуляции на периоде модуляции, то сигнал вспомогательной модуляции с амплитудой Ψ_m задается набором $\psi^{(q)}=\{0, \beta, 2\beta, 3\beta\}$, где $\beta=\Psi_m/4$. Известно, что в таком случае оптимальным вариантом является выбор $\beta = \pi/2$ (или $\Psi_m=2\pi$), а решение для оценки φ_r искомой фазы φ на основе метода наименьших квадратов (МНК) для $\Psi_m = 2\pi$ имеет вид [5]

$$\varphi_r = \operatorname{atan2}\left(\frac{u^{(1)}-u^{(3)}}{u^{(2)}-u^{(0)}}\right), \qquad (2)$$

где $u^{(q)}$ – q-й отсчеты интерференционного сигнала в интервале детектирования; функция atan2 – расширенный арктангенс, позволяющий получить значения φ_r в диапазоне $(-\pi; \pi]$. Выражение (2) будет приводить к ошибкам, если амплитуда Ψ_m будет отклоняться от требуемого значения 2π. Однако поскольку $Q = 4$, фактически рассматриваются четыре уравнения вида (1), что дает возможность определить не три, а четыре неизвестных параметра, в частности и параметр β. Так, в работе [6] для $N = Q = 4$ и $\psi^{(q)}=\{0, \beta, 2\beta, 3\beta\}$ приведены следующие выражения:

$$\cos(\beta)=\frac{u^{(0)}-u^{(1)}+u^{(2)}-u^{(3)}}{2\left(u^{(1)}-u^{(2)}\right)},\ \operatorname{tg}(\varphi_r)=-\left(\frac{1-\cos(\beta)}{\sqrt{1-\cos^2(\beta)}}\frac{\left(u^{(0)}-u^{(2)}\right)-2\left(u^{(0)}-u^{(1)}\right)(1+\cos(\beta))}{\left(u^{(0)}-u^{(2)}\right)-2\left(u^{(0)}-u^{(1)}\right)\cos(\beta)}\right), \qquad (3)$$

позволяющие найти и β, и φ. Анализ выражений (3) показывает, что у них есть особенности в точках $\varphi = -3\beta/2 + \pi k$, где k – целое число (для $\beta = \pi/2$ это точки $\pi/4$ и $-3\pi/4$), когда выражения (3) становятся неработоспособными, а также то, что в этом случае требуется модификация алгоритма раскрутки фазы [4]. Кроме того, алгоритм (3) не является оптимальным с точки зрения влияния шумов даже при выполнении условия $\Psi_m = 2\pi$.

С учетом сказанного предлагается использовать для оценки целевого воздействия выражение (2) (при этом можно контролировать моменты, когда имеют место значения φ, связанные особенностями в (3)) с одновременным контролем значения β по выражению (3) и подстройкой амплитуды модуляции для соответствия оптимальному значению $\Psi_m = 2\pi$.

Заключение. Предложен принцип контроля и подстройки амплитуды фазовой модуляции в схеме волоконно-оптического интерферометрического гидрофона, который позволит повысить точность определения параметров детектируемого гидроакустического сигнала. Полученный результат важен не только при создании одиночных гидрофонов, но и при построении гидроакустических антенн на основе ВОД. В дальнейшем планируется практическая апробация результатов работы с выбором подходящего алгоритма автоподстройки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **James H. Cole**, **Clay Kirkendall**, **Anthony Dandridge**, **Gary Cogdell** and **T.G. Giallorenz** (“Twenty-five years of interferometric fiber optic acoustic sensors at the Neval Research laboratory”, Journal of the Washington Academy of Sciences, 2004, Vol. 90, No. 3, pp. 40-57.
2. **M. Eriksrud,** “Towards the optical seismic era in reservoir monitoring”, New spring for Geoscience, 2010, Vol.28, 108-111.

3. **Dandridge A.**, **Tveten A. B.**, **Gialloronzi T. G.** Homodyne demodulation scheme for fiber optic sensors using phase generated carrier, IEEE Journal of Quantum Electronics. - 1982. -Vol.18, Iss.10, 1647–1653.
4. **L. Liokumovich**, **A. Medvedev**, **K. Muravyov**, **P. Skliarov**, and **N. Ushakov**, "Signal detection algorithms for interferometric sensors with harmonic phase modulation: distortion analysis and suppression," Appl. Opt. 2017. Vol. 57 № 25, 7960–7968.
5. **D. Malacara-Hernandez** and **D. Malacara-Doblado**, "Optical testing and interferometry", Prog. Opt. 2017. Vol. 6 №2, 73–156.
6. **G. Stoilov** and **T. Dragostinov** "Phase-stepping Interferometry: Five-frame Algorithm with an Arbitrary Step", Optics and Lasers in Engineering, 1997 Vol. 28, 61-69.

A.O. Kostromitin, (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg), **L. B. Liokumovich, K.V. Muraviev** (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg). **Improving the accuracy of the fiber-optic hydrophone by using an algorithm for determining the amplitude of the phase modulation of the interference signal**

Abstract. This work is devoted to the problem of reducing the error in the fiber-optic interferometric hydrophone scheme that occurs when the amplitude of the auxiliary modulation changes. The possibility of active adjustment of the required value of the modulation amplitude on the basis of finding its actual value by the recorded interference signal is considered. The features of applicability of this algorithm are determined. The obtained result can be used to construct a system of automatic adjustment of the amplitude of the auxiliary phase modulation for fiber-optic interferometric scheme of hydrophones.

УДК 519.712

А.В. ЛЕОНОВА
(Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург)

РЕКОНСТРУКЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТОМОГРАФИИ

Рассматривается задача реконструкции изображения при ультразвуковой томографии. Предлагается рандомизированный алгоритм для сбора и обработки данных ультразвуковой томографии.

Введение. Ультразвуковые исследования (УЗИ) привлекли повышенный интерес вследствие существенного прогресса средств сканирования и обработки данных, в частности, в диагностических медицинских процедурах, а также при ультразвуковой дефектоскопии в металлургии [1…3]. Такой интерес к УЗИ обосновывается невысокой стоимостью исследования относительно других видов томографии. Другая причина заключается в полной безопасности и неинвазивности метода, а также относительной быстроте. Однако с течением времени архитектура аппаратных компонентов УЗИ-комплексов усложнялась, а требования к качеству изображения ужесточались. Это привело к увеличению вычислительной сложности вследствие роста количества обрабатываемых данных [4].

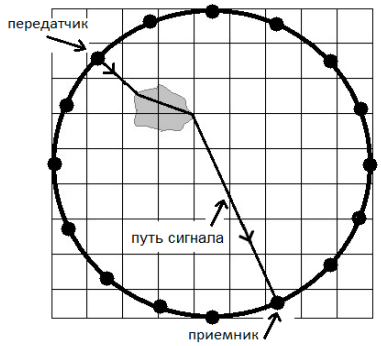


Рис. 1. Иллюстрация к постановке задачи: схема аппарата

Работа посвящена изучению влияния объема используемых данных на качество восстанавливаемого изображения УЗИ.

Постановка задачи. Рассмотрим модель, в которой есть круговой трандьюсер с N элементами (сенсорами–излучателями) (рис. 1). Каждый элемент представляет собой излучатель и приёмник ультразвукой волны. Рассматривается задача УЗИ по визуализации скорости звука: после детектирования сквозного сигнала получаем время его прохождения через рассматриваемую область – это исследуемые данные, которые используются для восстановления распределения скорости в интересующей области [5]. Время сигнала в пути от передатчика к приемнику вдоль траектории его распространения можно представить как

$$Y = \int_{\Gamma} \frac{1}{u(r)} ds, \tag{1}$$

где Y – время распространения сигнала; Γ – путь его распространения; $u(r)$ – скорость звука в точке r. Проходимый сигналом путь Γ зависит от распределения скорости звука в среде $u(r)$. Существует нелинейная зависимость скорости звука в среде от времени его распространения. После дискретизации интересующей области наложением сетки размера $N \times N$ уравнение (1) представимо в виде [5, с.1618]:

$$Y = A(F) \bullet F, \tag{2}$$

где F – $N^2 \times 1$ вектор распределения «медлительности» в с/м (представленная в виде вектора карта распределения величин, обратных к скоростям); $A(F)$ – $N^2 \times N^2$ матрица пути распространения сигнала, где в i-ой строке записана матрица, представленная в виде вектора и задающая расстояние, проходимое сигналом между ($i$mod$N$)-ым и (i/N)-ым датчиками; Y – $N^2 \times 1$ вектор времен распространения сигнала в секундах; $\bullet$ – матричное умножение.

Ставится задача нахождения такой оценки распределения скоростей, которая соответствует траекториям кратчайшего прохождения сигнала в (2) и выражается минимизацией следующего функционала:

$$\| A(F)F - Y \|_2^2 \xrightarrow[F]{} \min . \tag{3}$$

Научный руководитель д.ф.-м.н., проф. Граничин О.Н.

Такая задача слишком трудоемкая, так как получается N^2 уравнений с N^2 переменными. Чтобы облегчить задачу, нужно максимально сократить размерность данных без существенной потери качества восстанавливаемого снимка томографии. Для этого введем сжимающую матрицу $\hat{A}$ размерности m×N^2, где m – задаваемый параметр. Будем считать, что сжатые измерения $\hat{Y}$ связываются с исходными данными Y сжимающей матрицей $\hat{A}$: $\hat{Y} = \hat{A}Y$. Такой подход взят из методологии опознавания со сжатием [6]. Методология верна, когда исходные данные имеют в каком-то базисе разреженное представление, то есть существует такое преобразование Ψ, которое переводит F в его разреженное представление ΨF. Таким образом, решаемая задача минимизации сводится к минимизации функционала:

$$\| \hat{A}A(F)F - \hat{A}Y \|_2^2 + \lambda \| \Psi F \|_1 \xrightarrow[F]{} \min, \qquad (4)$$

где Ψ – преобразование, которое переводит F в его разреженное представление ΨF; λ – регуляризующий параметр; $\hat{A}$ – сжимающая матрица.

Необходимо реализовать прототип программного комплекса, который решает задачу (4), и изучить влияние объема используемых данных на точность восстанавливаемого изображения.

Описание решения. Для решения этой задачи был выбран алгоритм, основанный на методе сопряженных градиентов. В работе изучаются несколько способов проектирования сжимающей матрицы $\hat{A}$.

Первый способ: $\hat{A}_{i,j} = \begin{cases} +\sqrt{\frac{3}{m}} & с\ вероятностью\ \frac{1}{6} \\ 0 & с\ вероятностью\ \frac{2}{3} \\ -\sqrt{\frac{3}{m}} & с\ вероятностью\ \frac{1}{6} \end{cases}$, где $m << N^2$.

Это позволит уменьшить учитываемый объём данных для дальнейших вычислений, но эта матрица $\hat{A}$ применяется к полному объему сведений о времени прибытия сигналов. Следовательно, изменится сложность решаемой задачи (4), но время на предварительную обработку (получение времени распространения сигнала) не изменится.

Во втором способе, в отличие от первого, осуществляется равномерный отсев, то есть (N^2–m) случайных строк матрицы A, а не элементов, будут обнулены при применении $\hat{A}$. Благодаря этому возможно уменьшить сложность решаемой задачи и сократить время на обработку данных.

В третьем способе, в отличие от второго способа, отсев данных производится для группы строк, сформированных по какому-то признаку (например, измерения для каждого второго сенсора), будут обнуляться. Сокращение количества совершаемых измерений предоставляет возможность уменьшить сложность решаемой задачи, размер данных для обработки, а также уменьшить время на сканирование пациента.

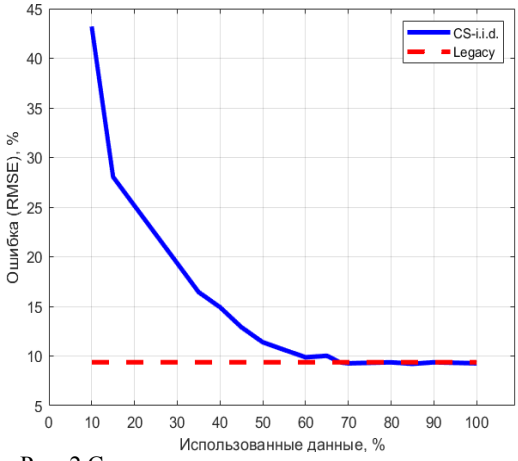


Рис. 2 Соотношение количества используемых данных для реконструкции снимка к ошибке восстановления изображения

Заключение. В работе предложены методы, позволяющие решить поставленную проблему при разработке ультразвукового томографа и внедрить в применяемые алгоритмы по сбору и обработке данных. Эксперименты, проведенные на компьютерных моделях, показали состоятельность метода. В частности, на графике (рис. 2) сплошной линией продемонстрирована зависимость ошибки реконструкции снимка в процентах от средней скорости звука в среде от объема использованных данных при использовании Compressive Sensing со сжимающей матрицей с

равновероятностным отсевом (CS-i.i.d). Для сравнения показан результат исходного алгоритма, использующий полный (100%) объем данных (Legacy) и обозначенный пунктирной линией. В этой маломасштабной модели оказалось возможным уменьшение используемых данных до 68% от общего их объема.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Miller D., Lippert C., Vollmer F., Bozinov O., Benes L., Schulte D.M., Sure U.** Comparison of different reconstruction algorithms for three-dimensional ultrasound imaging in a neurosurgical setting // The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery. 2012. V. 8. No. 3. P. 348–359.
2. **Matthews T.P., Wang K., Li C., Duric N., Anastasio M.A.** Regularized dual averaging image reconstruction for full-wave ultrasound computed tomography // IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 2017. V. 64. No. 5. P. 811–825.
3. **Базулин Е.Г., Соколов Д.М.** Восстановление изображения отражателей методом распознавания со сжатием по эхосигналам, измеренным антенной решеткой // Вестник МЭИ. 2018. №. 6. С. 128–135.
4. **Erofeeva V., Granichin O., Senin I.** Modifying the physical process of ultrasound tomography scanning through compressive sensing // Cybernetics and Physics. 2018. V. 7. No. 2. P. 66–71.
5. **Li C., Duric N., Littrup P., Huang L**. In vivo breast sound-speed imaging with ultrasound tomography // Ultrasound in medicine & biology. 2009. V. 35. No. 10. P. 1615–1628.
6. **Граничин О.Н., Павленко Д.В.** Рандомизация получения данных и l_1-оптимизация (опознание со сжатием) // Автоматика и телемеханика. 2010. №. 11. С. 3–28.

A.V. Leonova (Saint Petersburg State University, Saint Petersburg). **Image reconstruction of the ultrasound tomography**

Abstract. In this paper the problem of image reconstruction of the ultrasound tomography of the sound speed visualization is considered. A randomized algorithm is proposed for collecting and processing ultrasound tomography data.

УДК 519.712

E.-M.S. BANSBACH
(Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany)

OPTIMIZATION OF SHIP DETECTION IN SENTINEL-1 SAR IMAGES USING WAVELET BASED MULTISCALE ANALYSIS, A CFAR DETECTOR AND FEATURE ANALYSIS

The report is dedicated to the problem of detecting ships from data from the Sentinel Synthetic Aperture Radar. The text contains the results obtained in the framework of the work.

Introduction. The earth surface is covered with water by 71%. This huge area of open seas and oceans offers a great opportunity to transport goods. However, a huge area like this is hard to monitor and therefore it also offers an opportunity for illegal activities as illegal fishing, smuggling and other criminal activities. Instead of sending out patrol planes and vessels on a wing and prayer to monitor these areas and find ships, an automatic monitoring with large area coverage would make life way easier for Coast Guards and other maritime surveillance organizations. Synthetic Aperture Radar (SAR) fulfills all these requirements: SAR is either airborne or spaceborn and therefore covers large areas. After a SAR detector acquired data, they can be processed automatically and in real time to detect vessels. Since SAR is a radar system and works with electromagnetic waves it can illuminate scenes during both day and night, for a clear sky and for a cloudy sky. In addition the SAR community is growing like the Global Positioning System (GPS) community did 20-30 years ago. This grow already led to improved SAR detectors, a big variety of SAR detectors and therefore an huge coverage.

One of the big spaceborn SAR projects run by the European Space Agency is the Sentinel-1 mission. At the moment the Sentinel-1 mission covers every spot of the earth at least every sixth day, which makes this SAR mission to a powerful and reliable tool for maritime surveillance.

However, automatic detection of vessels in SAR datasets is a tough work, since noise and other disturbing factors lower the Signal-to-Noise ratio and therefore downgrade the signal. To overcome this downgrade the SAR dataset needs to be prepared for the ship detection. Noise has to be removed, the signal has to be amplified and afterwards a statistical decision has to be made whether the power of the investigated pixel results from the signal or from the background noise.

To do so many different approaches have already been proposed. This paper combines these methods in a way that an improvement of performance is obtained.

The proposed method is made up of three different stages. The prescreening uses two wavelet based multiscale analyses, namely Lipschitz Regularity and Wavelet Correlator (WCOR), to separate ship pixels from background pixels. Afterwards a Constant False Alarm Rate detector with a relaxed threshold finds the so called areas of interest. The second step, which is the main detection stage, applies the Wavelet Correlator to the original data to again separate ship pixels from background pixels. Afterwards a Constant False Alarm detector will further investigate the areas of interest. It will use the Wavelet Correlator processed data for the estimation of the background distribution. As a third step, the post processing, a clustering of single detected pixels to targets takes place and a feature analysis will remove obvious false alarms.

With help of real Sentinel-1 data the power of the proposed ship detection algorithm will be shown.

Results shown on next figures and tables.

Overview of methods for ship detection. As already mentioned there are different existing approaches for ship detection. One of the most common techniques for SAR ship detection is to find image values that are high with respect to the local image background. Therefore, a statistical approach is introduced where a single pixel is compared regarding the surrounding pixels. Assuming that the surrounding pixels affected by speckle noise and sea clutter are lognormal distributed the mean and variance of the background can be estimated. By applying a constant false alarm rate to the found distribution a value for a threshold can be obtained. A decision whether the single pixel is above or below the threshold indicates if it is likely to be a ship or not. The decision can be seen in figure 1.In Stagliano [1], Schwegmann [2] and Tello [3] additional information about the Constant False Alarm Rate Detector (CFAR-detector) can be obtained.

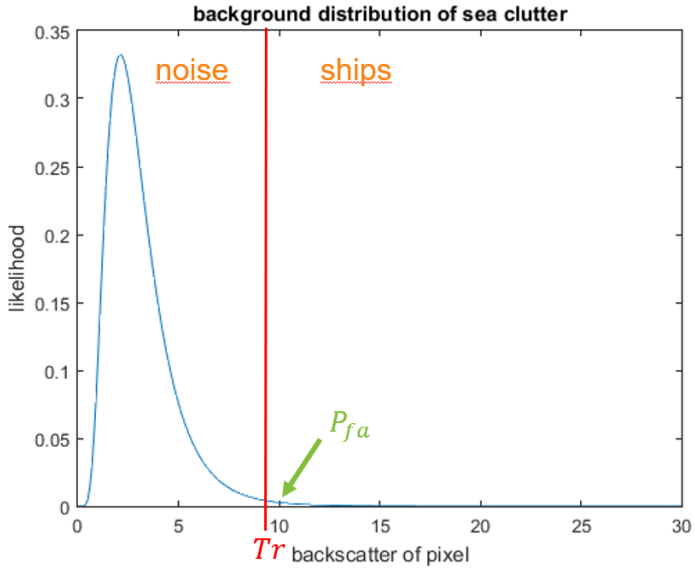


Figure 1. Lognormal distribution of a SAR image covering the ocean with the separation of ships and noise marked by the threshold line

However, if the CFAR detection is implemented and run with original SAR data the theoretical results won't fit the practical results as it can be seen in table 1:

Table 1

Comparison of the theoretical false alarm rate and the real one obtained by processing of real SAR data

$P_{fa,CFAR}$	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}	10^{-6}
$P_{fa,real}$	$9{,}76 * 10^{-5}$	$3{,}73 * 10^{-6}$	$8{,}21 * 10^{-6}$	$1{,}38 * 10^{-7}$	$5{,}28 * 10^{-4}$
	✗	=	=	✓	✗

✓ - reality better than theory

= - reality about theory

✗ - reality worse than theory

To achieve good results and robustness the CFAR-detector relies on a maximum separation of ship and background pixels. To do so two wavelet based multiscale analysis are introduced. In Stagliano [1] a Wavelet Correlator (WCOR) for ship detection is proposed. In Ajadi [4] a Lipschitz Regularity for oil spill detection is introduced. Both wavelet based methods amplify regular structures such as ships or oil spills and suppress irregular structures such as noise. It can be compared to a lowpass and highpass filtering of the SAR data where the lowpass filter will smoothen out the noise whereas the highpass filter will detect the significant change in pixel intensity displaying a ship. By changing the size of the wavelet different sized structures can be amplified while non-fitting structures get suppressed (figure 2). Exploiting this fact both wavelet based methods will have a nearly constant response for a ship over different scales while the response of noise will decrease with increasing size of the wavelet. When the results of the wavelet transform for different scales are combined it can be seen that regular structures will have a nearly constant response over different scales while noise will lose it's response over different scales. Compared to the use of plane waves the wavelet based approaches obtain information about the dataset in frequency domain (scaling of the wavelet) while preserving the spatial information of the data (translation of the wavelet). Based on this every pixel of a SAR dataset can be investigated.

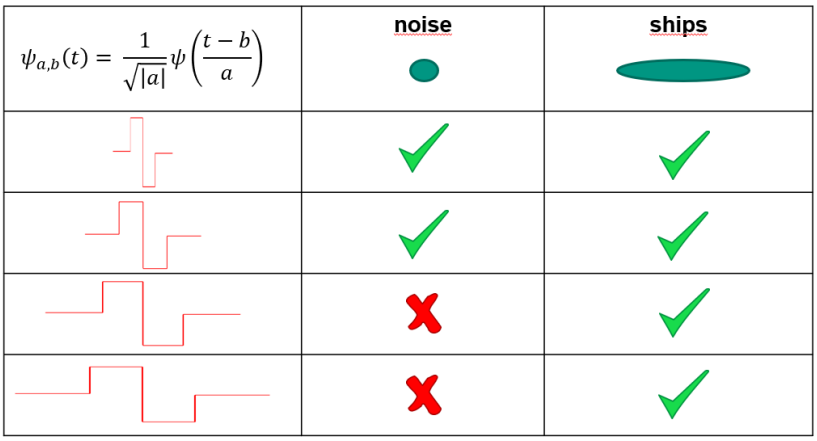


Figure 2. Responses of ships and noise over different scales of the wavelet

One intuitive way of checking detected pixels whether they could be part of a ship or not is a feature analysis proposed in Wang.[5]. After single pixels are detected they can be clustered into targets. These targets can be evaluated regarding their geometric structures. While ships will have a certain shape and a minimum and maximum number of pixels dependent of the resolution of the SAR system, beam seam and single false detected noise pixels won't fulfill these requirements. To do so two features are introduced: Length-Width-Ratio (LWR) and Ship Pixels (SP). It seems to be clear that LWR calculates an allowed range for the ratio of the length and width of detected targets whereas SP calculates allowed values for the number of pixels contained in a target.

Combination of methods for ship detection. The introduced methods should be combined in a way, that the results of a single CFAR detector are improved. Therefore, two main goals are set:

- A maximum separation of ship and background pixels should be obtained.
- The input for the CFAR detector should be reduced.

The first goal was already discussed since a maximum reparation leads to a more relaxed selection of the threshold for the CFAR detector. The second goal is motivated by the fact that the CFAR detector selects its threshold dependent on the relative false alarm rate P_{fa}. However, the absolute false alarm rate is important since this marks the number of false detected pixels. The absolute false alarm rate is calculated by $P_{abs} = input * P_{fa}$

As the relative false alarm rate is fixed the only improvement that can be done is the reduction of the input data for the CFAR detector. Those requirements lead to the following design of the ship detection algorithm shown in figure 3.

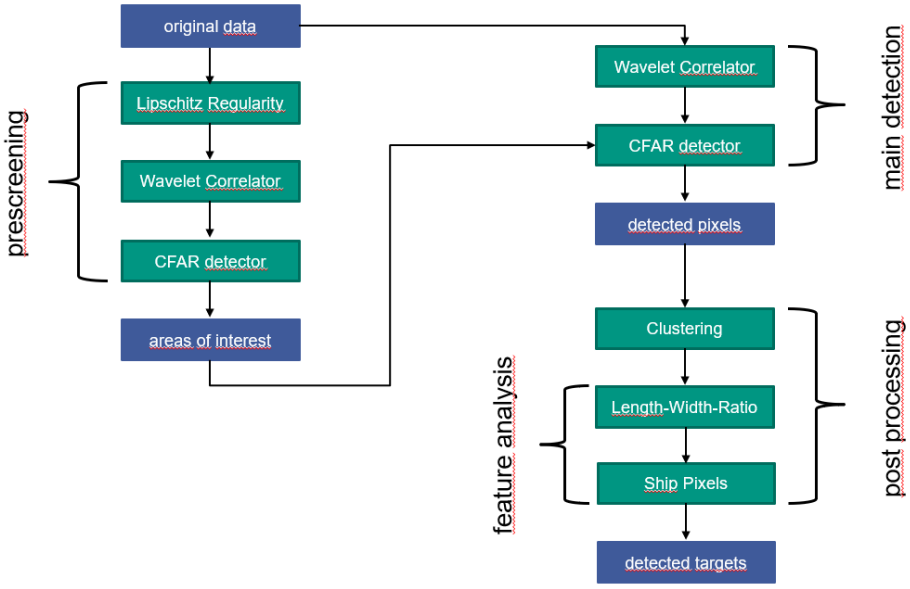


Figure 3: Final design of the estimation algorithm

A prescreening with a relaxed choice of threshold for the CFAR detector will result in areas of interest and therefore a reduction of input for another CFAR detector. Afterwards in the main detection step the original data is taken again and the main CFAR-detector investigates the areas of interest.Both of the CFAR detectors have wavelet based analysis as a preprocessing to achieve the mentioned separation of ship pixels and noise pixels. After the main detection step results in single detected pixels a clustering is done and the feature analysis is applied.

Results. Figure (name of figure) displays the preprocessing of the data with the wavelet based multiscale analysis. As it can be seen for the logarithmized distribution ships and noise seems to be very close. If the two wavelet analysis are applied ships and noise get separated and a more relaxed selection of threshold is possible.

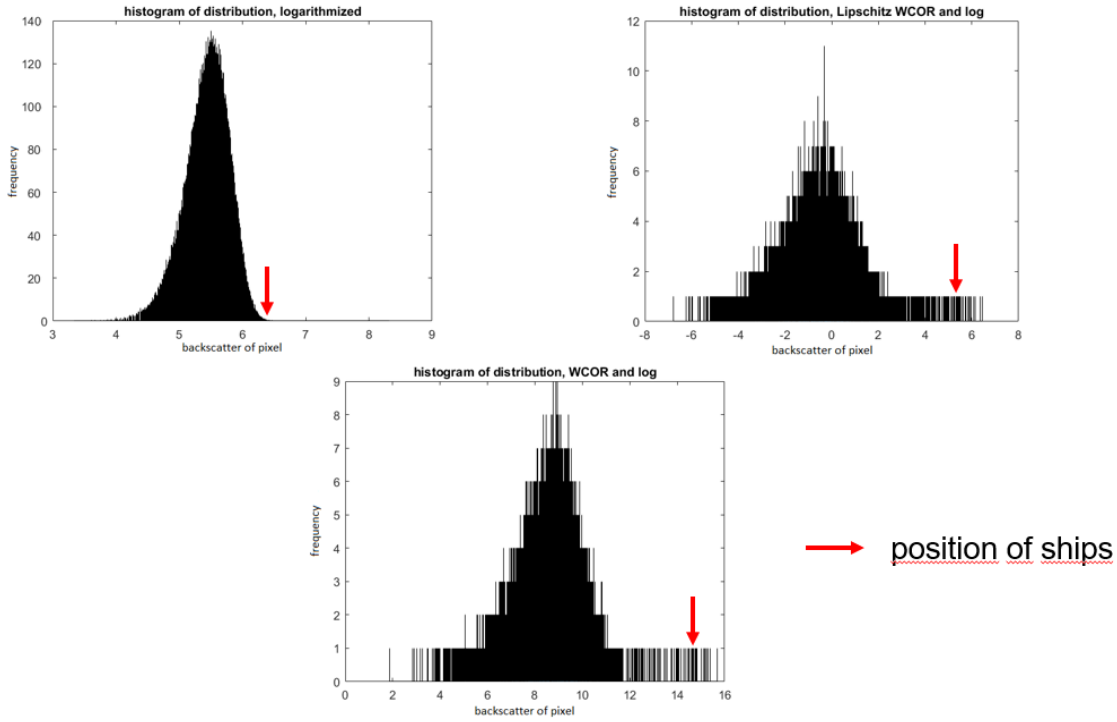


Figure 4. Separation of ship and noise pixels for different processing steps of SAR data

The unprocessed data is compared to the Lipschitz and WCOR processed and only WCOR processed data.

For evaluation of the different preprocessing approaches a new quantity is introduced which gives the separation of the first ship pixel as a function of the mean and standard deviation of the distribution (fig. 5):

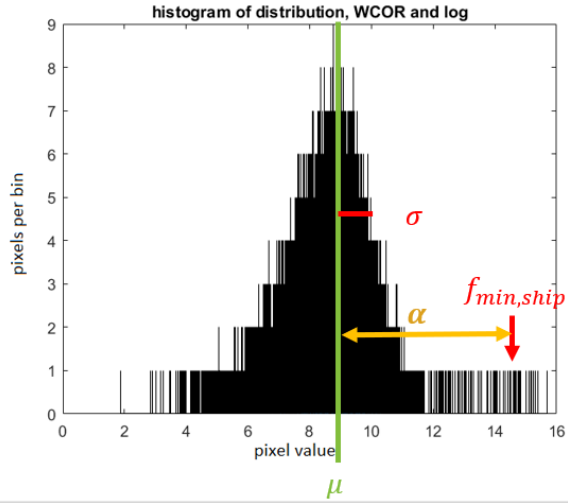


Figure 5. Representation of new quantity α for evaluation of ship and noise separation

$$efficiency: \quad \alpha = \frac{f_{min,ship} - \mu}{\sigma}$$

Table 2

Comparison of ship and noise separation for different processing steps and several sets of SAR data

α	sample 1	sample 2	sample 3	sample 4	sample 5
original	3,0924	3,2569	5,0710	3,2492	4,6678
Lipschitz & WCOR	5,4077	4,7569	6,1208	6,0803	4,9742
WCOR	5,8889	4,8855	5,9172	5,6315	5,1888
Lipschitz	5,7436	4,9721	5,9445	5,7846	5,2301

As table 2 shows the preprocessed data always leads to a better separation than the original data.

The second goal was the reduction of input for the CFAR detector of the main detection step. As it can be seen in table 3 and figure 6 the prescreening step reduces the input dramatically.

Table 3

Reduction of input for the main detection step by the postprocessing step

Pixel original image	Pixel *areas of interest*	Reduction
409 600	1037	$2{,}5 * 10^{-3}$

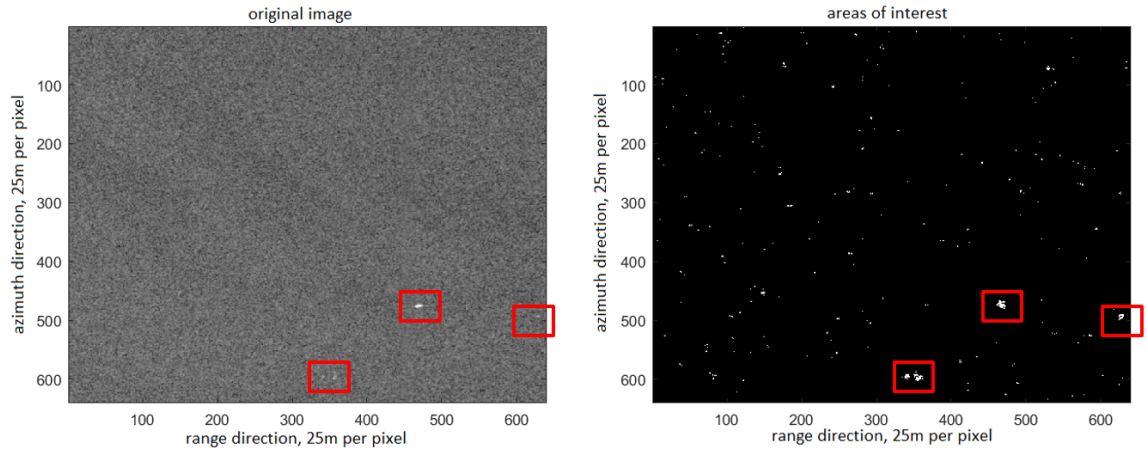


Figure 6. Obtained areas of interest after prescreening

As a last step the feature analysis is applied. As it can be seen in figure (7) the feature analysis successfully removes single detected pixels.

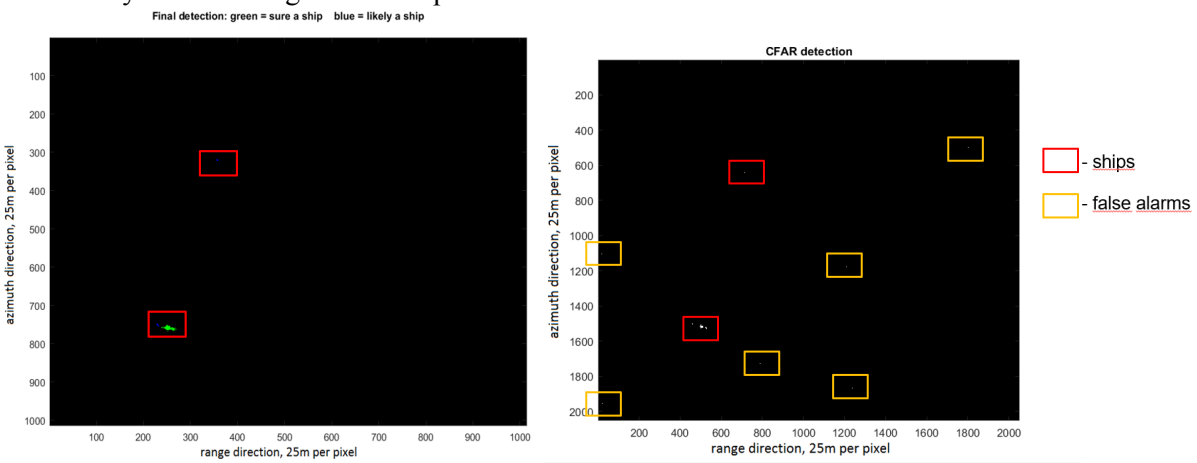


Figure7. Detected targets after the main detection step and remaining targets after the postprocessing

If all the introduced techniques are joint the overall results for processing of real SAR data covering the open sea north of Amsterdam harbor by 430km x 430km for fixed $P_{fa} = 10^{-6}$ can be seen in table 4. The relative false alarm probability is lower than the required one and calculation time was 896 seconds.

Table 4

Overall results of the introduced algorithm

overall pixels	interest pixels	interest drop	detected ships	missed ships	sure ships	Overall false alarms	$P_{fa,abs}$	$P_{fa,rel}$
115605504	101405	8,7716 * 10^{-4}	43	1	41	1	9	7,7851 * 10^{-8}

Conclusions. The introduced method of ship detection leads to an improvement compared to a conventional CFAR detector.

While the postprocessing reduces the input for the main detection step to obtain a smaller absolute false alarm rate the post processing removes some of the false detected pixels due to feature analysis.

Furthermore the wavelet based multiscale analysis offer the possibility for separation of ship and noise pixels to enable a more relaxed selection of threshold for CFAR detection.

The combination of the different methods and the different steps of the algorithm leads to the introduced powerful and real-time applicable method for ship detection.

REFERENCES

1. **F. B. D. Stagliano and A. Lupidi**, "Ship detection from SAR images based on CFAR and wavelet transform", in Proc. Tyrrhenian Workshop Adv. Radar Remote Sens. (TyWRRS), Sep. 2012, pp. 53-58
2. **C.P. Schwegmann, W. Kleynhans**, B.P. Salmon,"Ship detection in South African oceans using SAR, CFAR and a Haar-like feature classifier", in 2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 2014, pp. 557-560
3. **M. Tello, C. Lopez-Martinez, J. J. Mallorqui**,"A novel approach for the automatic detection of punctual isolated targets in a noisy background in SAR imagery", in European Radar Conference 2005 (EURAD), Oct. 2005, pp. 41-44
4. **O. A. Ajadi, F. J. Meyer, M. Tello, and G. Ruello**, "Application of Lipschitz Regularity and Multiscale Techniques for the Automatic Detection of Oil Spills in Synthetic Aperture Radar Imagery."
5. **C. Wang, S. Jiang, H. Zhang, F. Wu, B. Zhang**, "Ship Detection for High-Resolution SAR Images Based on Feature Analysis", in IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol.11, no. 1 Jan. 2014, pp. 119-123

УДК 621.396.96

А.С. СОЛОНАР, П.А. ХМАРСКИЙ
(Военная академия Республики Беларусь, г. Минск)

ТРАЕКТОРНАЯ ОБРАБОТКА В РАДИОЛОКАТОРАХ ОБЗОРА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ МЕЖОБЗОРНОЙ СЕЛЕКЦИЕЙ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ КАРТ ПОМЕХ

Рассмотрены особенности построения устройства траекторной обработки с предварительной межобзорной селекцией движущихся целей для радиолокаторов обзора. Устройство межобзорной селекции, реализованное на основе карт помех, является трехканальным и позволяет бороться с целеподобными сосредоточенными и интенсивными дискретными мешающими отражениями. Каждый канал характеризуется своей зоной действия и параметрами работы.

Введение. Важной проблемой, возникающей при реализации траекторной обработки в радиолокаторах обзора, является сложность выделения (селекции) радиолокационных отметок истинных объектов на фоне ложных, называемых дискретными мешающими отражениями (ДМО) [1, 2]. ДМО являются остатками компенсации мешающих отражений от объемно или поверхностно распределенных отражателей, сосредоточенных местных предметов или локальных неоднородностей атмосферы [2]. Такие остатки наблюдаются на радиолокационных индикаторах в виде целеподобных отметок и существенно снижают качество траекторной обработки [1, 3]. Для борьбы с ДМО используют различные алгоритмы предварительной межобзорной селекции движущихся целей (МСДЦ), в основе которых лежат либо карты помех, либо алгоритмы селекции с одновременным сопровождением ДМО и целей на этапе траекторной обработки [4]. Методы МСДЦ, в основе которых лежат карты помех, отличаются простотой практической реализации и применяются в большинстве существующих радиолокаторов обзора [5, 6]. Однако основным недостатком таких алгоритмов является невозможность использования предыстории перемещения дискретных мешающих отражений в пространстве. Методы МСДЦ, использующие селекцию с одновременным сопровождением ДМО и целей, напротив, лишены основного недостатка карт помех, но при этом требуют больших вычислительных ресурсов и сложны в своей реализации [7]. Сочетание обоих методов в комбинированных устройствах МСДЦ позволяет повысить качество межобзорной селекции [8].

В комбинированных устройствах МСДЦ для предварительной селекции ДМО применяется карта помех, в задачу которой входит принятие решения о классе отметки (истинная или ложная – ДМО). Класс выставляется каждой отметке в блоке установки класса отметки (истинная или ложная), после чего она выдается на устройство межобзорной селекции с одновременным сопровождением ДМО и целей [4]. По выявленным ДМО не создаются новые траектории, хотя все их отметки поступают на вход устройства траекторной обработки и учитываются на этапе отождествления (при реализации алгоритмов вероятностного объединения данных).

Целью настоящего доклада является рассмотрение предлагаемого способа построения устройства траекторной обработки с предварительной МСДЦ, которое позволяет бороться с интенсивными и сосредоточенными ДМО. Представленные в докладе решения являются развитием подходов, рассматриваемых в работах [4, 9].

Особенности траекторной обработки с предварительной межобзорной селекцией движущихся целей на основе карт помех в радиолокаторах обзора. Параметры ДМО существенно отличаются для различных типов радиолокаторов. Они зависят от позиции радиолокатора на местности, времени года и метеоусловий. Помимо этого, параметры ДМО определяются характером перемещения источников мешающих отражений. Для определения подобных зависимостей необходимо проведение различных экспериментальных исследований на радиолокаторах с отличающимися техническими характеристиками в различных условиях наблюдения. При обосновании структуры разрабатываемого устройства траекторной обработки с предварительной МСДЦ были проведены экспериментальные исследования характеристик некоторых видов ДМО (на примере радиолокатора системы управления воздушным движением

дециметрового диапазона длин волн). Для этого был собран банк записей радиолокационных отметок, представляющих собой остатки компенсации мешающих отражений от сосредоточенных местных предметов, объемно и поверхностно распределенных отражателей. Проведенные исследования показали, что диапазон возможных скоростей ДМО определяется средней скоростью ветра и его направлением, разбросом скоростей и направлений перемещения облаков, возможными турбулентностями атмосферы и разбросом направлений воздушных потоков по высотам. Для оптически ненаблюдаемых объектов (источников так называемых «ангел-эхо») скорости перемещения близки к скоростям облаков, а высота их появления находится в пределах от 100 до 3000 м. Поверхностно распределенные отражатели и сосредоточенные объекты неподвижны, а их высота определяется высотой местности и самого отражателя относительно фазового центра антенны радиолокатора. Дальности до ДМО также отличаются от их типов. Так, для ДМО, которые является остатками компенсации мешающих отражений от поверхностно распределенных отражателей, дальности составляют от 60 до 95 км, а для остатков компенсации МО от объемно распределенных отражателей – от 6 до 25 км.

Полученная априорная информация о возможном расположении и характере перемещения ДМО была учтена в структуре предлагаемого трехканального устройства предварительной селекции (рис. 1).

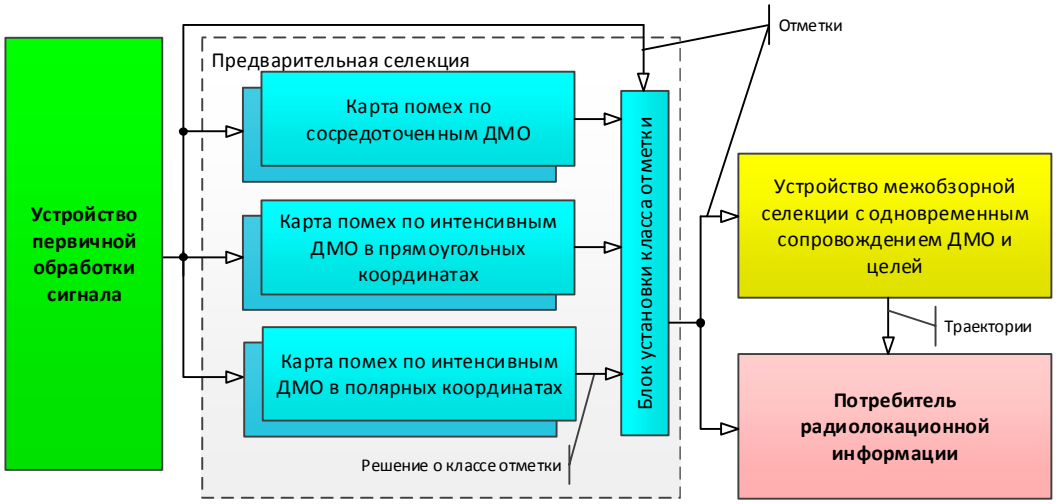


Рис. 1. Обобщенная структура устройства траекторной обработки в радиолокаторах обзора с предварительной межобзорной селекцией движущихся целей на основе карт помех

Особенностями предлагаемых решений являются (см. рис.1): работа карт помех не на максимальную дальность обнаружения радиолокатора, а на настраиваемый диапазон дальностей; помимо классической карты помех по средоточенным ДМО использование карт помех в полярной системе координат по интенсивным ДМО в ближней зоне РЛС; использование карт помех в прямоугольной системе координат по интенсивным ДМО с настраиваемым диапазоном дальностей. Во всех картах помех используются взаимно перекрывающиеся ячейки, что позволяет уменьшить переходные процессы при переходе ДМО из одной ячейки в другую под воздействием ветра или за счет взаимного перемещения носителя радиолокатора и мешающих отражателей [4]. Для карт помех по интенсивным ДМО используется признак «интенсивное ДМО» – одновременное попадание в ячейку более N_{max} (некоторое пороговое значение) отметок, которое приводит к немедленному принятию решения об обнаружении интенсивных ДМО в этой ячейке. Для ячейки, в которой ранее было обнаружение интенсивного ДМО, на каждом обзоре проверяется отсутствие помех в ней по критерию: невыполнение m обзоров подряд попадания отметок в ячейку карты помех (критерий сброса).

Заключение. Дискретные мешающие отражения существенно затрудняют автоматизацию процесса межобзорного сопровождения целей в РЛС кругового обзора. Для компенсации дискретных мешающих отражений используют различные алгоритмы межобзорной селекции движущихся целей на фоне дискретных мешающих отражений, в основе которых лежат либо кар-

ты помех, либо алгоритмы селекции с одновременным сопровождением дискретных мешающих отражений и целей на этапе вторичной обработки.

Рассмотрены особенности построения устройства межобзорной селекции движущихся целей на фоне дискретных мешающих отражений с формированием карты помех и с накоплением решений. Особенностью этого устройства является критерийное обнаружение факта наличия дискретных мешающих отражений в пределах ячейки карты помех. Отметки, попавшие в ячейку, в которой произошло обнаружение дискретных мешающих отражений, бланкируются, т.е. исключаются из обработки.

Для снижения времени обнаружения дискретных мешающих отражений при переходе помехи из одной ячейки карты помех в соседнюю предлагается использовать не одну, а две карты помех, смещенных друг относительно друга на половину размера одной ячейки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Плекин В.Я.** Цифровые устройства селекции движущихся целей. М.: Сайнс–Пресс, 2003. 81 с.
2. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. Справочник (под редакцией Я.Д. Ширмана). М.:«Радиотехника», 2007. 510 с.
3. **Жирнов В.В., Литвинов В.В.** Проблема «ангел-эхо» и цифровые картинные технологии обработки радиолокационных сигналов и информации. Сб. докладов Четвертой международной науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь»: В 3 ч. Ч.2. Воронеж, 1998. С. 795–800.
4. **Солонар А.С., Горшков С.А., Хмарский П.А., Вашкевич А.М.** Межобзорная компенсация дискретных мешающих отражений с формированием карты местных помех и накоплением решений. Докл. БГУИР. 2015. № 4 (90). С. 75–80.
5. Справочник по радиолокации под ред. М.И.Скольника. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. Книга 1. М.: Техносфера, 2014. 672 с.
6. **Musicki D., Evans R.** Clutter map information for data association and track initialization. *IEEE Transaction on A&ES*. 2004. Vol. 40. № 2. P. 387 – 398.
7. **Солонар А.С., П.А. Хмарский** Синтез устройства межобзорной селекции движущихся целей для радиолокаторов кругового обзора, учитывающего распределение принятого сигнала по пространству радиолокационного наблюдения. Вестн. Воен. Акад. Респ. Беларусь. 2015. № 2 (47). С. 134-150.
8. **Хмарский П.А., Солонар А.С.** Анализ показателей качества устройства межобзорной селекции движущихся целей, учитывающего распределение принятого сигнала по пространству радиолокационного наблюдения. Вестн. Воен. Акад. Респ. Беларусь. 2015. № 4 (49). С. 110-130.
9. **Солонар А.С., Горшков С.А.** Система вторичной обработки радиолокационной информации в мобильных РЛС кругового обзора. Сб. док. междунар. радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» в 2 ч. Харьков, 2008. Ч. 1. С. 160–162.

P.A. Khmarski, A.S. Solonar (Military academy of the Republic of Belarus, Minsk). **Trajectory processing in radar reviews with scan-to-scan selection of moving targets based on clutter maps**

Abstract. The features of the construction of a trajectory processing in radar reviews with scan-to-scan selection of moving targets based on clutter maps are considered. The device for scan-to-scan selection of moving targets is implemented on the basis of clutter maps is three-channel and allows you to deal with goal-oriented lumped and intense discrete interfering reflections. Each channel has its own area of operation and the criteria used.

УДК 621.396.96

П.А. ХМАРСКИЙ, А.С. ГОРБАТКО, А.Е. БОНДАРЕНКО
(Военная академия Республики Беларусь, Минск)

ТРАЕКТОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ДЛЯ ИНДИКАТОРНОГО КАНАЛА РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ НАВИГАЦИИ

Рассмотрен разработанный траекторный измеритель для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации (на примере отечественной системы РСБН-4). Показано, что при реализации предлагаемого траекторного измерителя необходимо учитывать скачкообразные измерения оценок азимута летательного аппарата устройством разового оценивания (кратные 2 градусам).

Введение. Радиотехнические системы ближней навигации (РСБН) являются важной частью радиотехнического обеспечения полетов авиации и предназначены для определения навигационных параметров, характеризующих положение летательного аппарата (ЛА) в полярной системе координат [1, 2]. Как правило, РСБН представляет собой азимутально-дальномерную однопозиционную радионавигационную систему, использующую наземные радиомаяки, выполняющие функции опорных станций и работающие в диапазоне дециметровых или метровых радиоволн. В настоящее время наиболее широкое применение получили российская система РСБН-4 (-8), а также стандартные зарубежные VOR/DME, TACAN и VORTAC [1, 2]. Любая система РСБН имеет в своем составе два независимых друг от друга канала: азимутальный и дальномерный, предназначенные, соответственно, для определения азимута и наклонной дальности на борту ЛА по отношению к точке стояния радиомаяка. Помимо этого, в состав систем РСБН-4 и TACAN включен индикаторный канал, обеспечивающий отображение на наземном индикаторе кругового обзора (ИКО) отметок ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН и находящихся в зоне действия радиомаяка. Индикаторный канал реализуется отдельно, использует часть аппаратуры азимутального и дальномерного каналов и обладает более низкой точностью, так как должен обеспечивать оперативную выдачу информации о местоположении большого количества ЛА (до 100), находящихся в зоне действия радиомаяка РСБН. Информация, выдаваемая на ИКО РСБН, используется для решения задач диспетчерской службы [1]: оценки воздушной обстановки; индивидуального опознавания; управления полетами в районе аэродрома и т.д. Стоит отметить, что точностные характеристики индикаторного канала РСБН существенно хуже, чем бортовой аппаратуры. Так, например, точность определения координат на борту ЛА, оборудованных аппаратурой РСБН-6С (7С), составляет: по азимуту – $\sigma_\theta = \pm 0{,}25^\circ$; по дальности – $\sigma_R = \pm 200$ м $\pm$ 0,33% R (где R – расстояние от ЛА до радиомаяка) [1]. Точность же определения координат ЛА с помощью индикаторного канала РСБН на ИКО составляет: по азимуту – $\sigma_\theta = \pm 1^\circ$; по дальности – $\sigma_R = \pm 3$ км (на масштабе развертки 100 км), $\sigma_R = \pm 5$ км (на масштабе развертки 400 км) [1]. Очевидно, что повышение точности измерения координат ЛА в индикаторном канале РСБН позволит улучшить радионавигационное обеспечение действий авиации и повысить безопасность полетов. Целью настоящего доклада является рассмотрение предлагаемого способа повышения точности измерения координат ЛА в индикаторном канале РСБН, основанного на внедрении траекторной обработки радионавигационной информации на примере отечественной системы РСБН-4.

Принципы построения траекторного измерителя для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации. Реализация траекторной обработки в индикаторном канале РСБН затрудняется рядом особенностей, негативно сказывающихся на ее качестве и требующих принятия специальных мер по их устранению или учету [3, 4]:

• наличия погрешности радионавигационных измерений наклонной дальности до ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН;

• скачкообразных измерений оценок азимута ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН (кратные 2 градусам);

• возможности пропуска отметки на этапе первичной обработки (при малом отношении «сигнал/шум» или выходе из зоны видимости радиомаяка РСБН);

• неизвестности закона движения ЛА, который может совершать непредвиденные маневры;

• возможность наблюдения групповой цели, под которой понимается совокупность нескольких неразрешаемых ЛА, совершающих совместный (групповой) полет на небольшом удалении друг от друга;

• наличия аномальных разовых оценок ЛА, обусловленных существованием внутрисистемных синхронных и несинхронных помех.

Так как система РСБН работает по принципам вторичной радиолокации (активный запрос – активный ответ), то для нее характерно отсутствие мешающих отражений, что позволяет значительно упростить алгоритмы обнаружения траекторий, алгоритмы отождествления разовых оценок с сопровождаемыми траекториями и отказаться от использования карт помех и алгоритмов межобзорной селекции движущихся целей. Таким образом, структура устройства траекторной обработки индикаторного канала РСБН в значительной мере повторяет структуры аналогичных устройств, используемых при обработке радиолокационной информации с учетом особенностей работы индикаторного канала.

В докладе описано разработанное устройство траекторной обработки индикаторного канала, которое включает в себя: устройство преобразования координат, устройство отождествления отметок и траекторий, устройство создания новой траектории, устройство удаления траектории, буфер траекторий. Все траектории хранятся в буфере, который обеспечивает хранение данных по всем траекториям и выдачу информации по ним потребителю. Если по траектории перестали поступать отметки (т.е. информация), то она подается на устройство удаления траекторий. Такая ситуация возможна при выходе цели из зоны видимости РСБН по различным причинам.

Процесс обработки одной траектории включает в себя задачи обнаружения траектории, выделения признаков, сброса (удаления) траектории, траекторное измерение координат и параметров движения целей. В первой части настоящей работы исследовался неадаптивный траекторный измеритель, настроенный на одну модель движения. Проведенное математическое моделирование показало, что на работу траекторных измерителей, построенных по калмановскому типу, существенное влияние оказывают скачкообразные измерения оценок азимута ЛА (кратные двум градусам), оборудованных бортовой аппаратурой РСБН. Для устранения указанного негативного эффекта предложено использовать в структуре траекторного измерителя метод наименьших квадратов на основе алгоритма Гаусса-Ньютона, учитывающий нелинейный характер задачи, с целью восстановления истинного значения азимута ЛА [5]. Главное достоинство алгоритма Гаусса-Ньютона применительно к решаемой задаче состоит в отсутствии требования вычисления частных производных второго порядка от целевой функции, что позволяет существенно снизить вычислительные затраты. Математическое моделирование показало, что использование метода наименьших квадратов, учитывающего нелинейный характер задачи, позволяет повысить качество оценки азимута ЛА и, как следствие, повысить точность оценки местоположения ЛА (до 30% в зависимости от условий наблюдений) относительно точки стояния радиомаяка РСБН. При этом на результат влияет число наблюдений (обзоров РСБН), учитываемых при работе метода наименьших квадратов.

Заключение. Радиотехнические системы ближней навигации играют важную роль в радиотехническом обеспечения полетов авиации и предназначены для определения навигационных параметров, характеризующих положение летательного аппарата в полярной системе координат (наклонная дальность и азимут). Навигационные параметры определяются как на борту ЛА (при помощи азимутального и дальномерного каналов РСБН), так и на земле (при помощи индикаторного канала РСБН). Существенным недостатком существующих индикаторных каналов является более низкая точность определения навигационных параметров (азимута и наклонной дальности летательного аппарата) по сравнению с бортовой аппаратурой.

В настоящем докладе предложен способ повышения точности измерения навигационных параметров ЛА в индикаторном канале – использование траекторной обработки радионавигационной информации. Использование данного подхода позволяет оценивать параметры движения ЛА, находящегося в зоне наблюдения РСБН, на основе измерений его мгновенного положения для определения траектории на интервале измерений и прогнозирования его последующего движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Иванюк В.С., Ткаченко А.С**. Наземное оборудование радиотехнической системы ближней навигации РСБН-4Н. Мн.: ВА РБ, 2009. 248 с.
2. **Бакулев П.А.** Радионавигационные системы. учеб. для вузов. Изд. 2-е, испр. и доп. М.: Радиотехника, 2011. 272 с.
3. **Blackman S., Popoli R.** Design and analysis of modern tracking systems. Boston, London: Artech House, 1999. 1230 p.
4. **Коновалов А.А.** Основы траекторной обработки радиолокационной информации: в 2 ч. Ч. 1. Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 164 с.
5. **Madsen K., Nielsen H.B., Tingleff O.** Methods for Non-Linear Least Squares Problems. 2nd Edition. *Informatics and Mathematical*. 2004. 58 p.

P.A. Khmarski, A.S. Gorbatko, A.E. Bondarenko (Military academy of the Republic of Belarus, Minsk). **Trajector measuring coordinates and parameters of movement of objects for the indicator channel of the near-navigation radio system**

Abstract. The trajector measuring coordinates and parameters of movement of objects for the indicator channel of the near-navigation radio engineering system (using the RSBN-4 system as an example) is considered. It is shown that when implementing the proposed trajectory gauge, it is necessary to take into account abrupt measurements of the estimates of the azimuth of the aircraft from the output of a one-time device (multiples of 2 degrees).

УДК 621.383.8 + 004.021

С.В. ЦУПРИК, А.С. СОЛОНАР, А.А. МИХАЛКОВСКИЙ
(Военная академия Республики Беларусь, Минск)

СТАТИСТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ УСТРОЙСТВА МЕЖКАДРОВОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ–ИЗМЕРЕНИЯ ОБЪЕКТОВ С АДАПТИВНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ЭТАЛОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Описан способ формирования эталонных изображений объектов, адаптивный к изменяющимся условиям наблюдения для корреляционных методов обнаружения–измерения и позволяющий формировать эталонные изображения как результат весового суммирования эталонов с учётом вероятностей перехода моделей движения совместно с принятием решения об обнаружении.

Введение. Обзор отечественных и зарубежных публикаций показывает, что для решения задачи обнаружения–измерения объектов на изображении разработан ряд методов [1]. Однако большинство из них получены либо для простейших моделей, либо имеют эвристическое происхождение и не обеспечивают надежного решения задачи обнаружения–измерения при наличии неоднородного фона и изменяющихся с течением времени параметров, характеризующих наблюдаемый объект [2]. Одним из таких методов является корреляционный. Он наиболее прост в реализации, при этом обладает высокой точностью обнаружения–измерения объектов в условиях стационарного фона и наблюдаемого объекта. Также корреляционные методы обнаружения–измерения требуют наличия априорной информации о наблюдаемом объекте, т.е. его заранее известного изображения (эталонного изображения).

Предлагаемый доклад посвящен статистическому синтезу устройства межкадрового обнаружения–измерения объектов, которое позволяет адаптировать эталонные изображения к условиям неоднородного фона и изменяющимся с течением времени параметрам, характеризующим наблюдаемый объект совместно с принятием решения об обнаружении.

Исходные данные. Будем считать, что задача байесовского обнаружения–измерения объектов на видеопоследовательности решается в условиях априорной неопределенности относительно модели наблюдения γ на k+1-м кадре, которая характеризуется возможными изменениями положения, ракурса и размеров изображения наблюдаемого объекта (в случае отдаления объекта от оптической системы) в процессе наблюдения. Априорная неопределенность относительно модели наблюдения γ индивидуальна и характерна для всех M возможных изображений объектов. Каждому объекту соответствует N_γ возможных моделей χ_g ($g = \overline{1, N_\gamma}$), характерных для него. Задана некоторая видеопоследовательность, представляющая собой совокупность дискретизированных изображений $\mathbf{L}'_{k+1} = \{\mathbf{L}_1, \mathbf{L}_2, ..., \mathbf{L}_{k+1}\}$, где $k = \overline{1, ..., K}$ – номер кадра видеопоследовательности, K – число кадров.

Модель дискретизированного изображения $\mathbf{L}_{k+1}$ представлена в виде матрицы [2]:

$$\mathbf{L}_{k+1} = \mathbf{R}_{k+1} \circ \mathbf{\Theta}_{k+1} + (\mathbf{I} - \mathbf{R}_{k+1}) \circ \mathbf{G}_{k+1} + \mathbf{\Xi}_{k+1}, \quad (1)$$

где $\mathbf{\Theta}_{k+1}$ – матрица изображения объекта, элементы которой соответствуют яркости пикселей; $\mathbf{G}_{k+1}$ – матрица изображения фона; $\mathbf{\Xi}_{k+1}$ – матрица шума; $\mathbf{R}_{k+1}$ – квадратная диагональная матрица, диагональные элементы которой {0,1}; $\mathbf{I}$ – единичная матрица; $[\circ]$ – операция поэлементного перемножения.

Введем ряд допущений и ограничений:

1. Число гипотез о модели наблюдения N_γ =2. Рассматриваемые гипотезы характерны для всех M возможных изображений объектов;
2. Модель входного воздействия считаем дискретным полумарковским процессом, который может переходить из одного состояния в другое скачкообразно с учётом вероятностей взаимного перехода $\|\pi_{12}\|$ из первой модели входного воздействия в вторую на k+1-м кадре.

3. Все элементы изображения объекта и эталона независимы и значения их яркостей некоррелированные.

Синтез устройства. В результате статистического синтеза [3, 4] получено двухфункциональное решающее правило совместного обнаружения–измерения яркостей пикселей *i*-го изображения наблюдаемого объекта $\mathbf{\Theta}_{k+1}$ на *k*+1-м кадре. Минимизация апостериорного риска осуществляется в соответствии с выражением (2):

$$\widehat{\mathbf{\Theta}}_{k+1}(\vartheta_i)=\sum_{l=1}^{N_\gamma} P\left(\gamma_l \left| \mathbf{L}'_{k+1}, \vartheta_i \right.\right)\widehat{\mathbf{\Theta}}_{k+1}(\vartheta_i,\gamma_l) \tag{2}$$

$$\hat{\vartheta}_1, \text{ если } \overline{Z}_* > \Lambda,\ \hat{\vartheta}_0 \text{ в противном случае,} \tag{3}$$

где: $\widehat{\mathbf{\Theta}}_{k+1}(\vartheta_i,\gamma_l)$ – условная оценка матрицы яркостей пикселей эталонного изображения объекта (условное математическое ожидание), вычисляемая в предположении справедливости гипотез об обнаружении ϑ_i $\left(i=\overline{0,1}\right)$ (ϑ_0 – объект на изображении отсутствует, ϑ_1 – объект на изображении присутствует) и γ_l ($l=\overline{1,N_\gamma-1}$),где N_γ – число гипотез о модели наблюдения γ_l; $\hat{\vartheta}$ – решение в пользу одной из гипотез об обнаружении; $\hat{\vartheta}_i$ – решение в пользу *i*-й гипотезы об обнаружении; $p\left(\gamma_l \left| \mathbf{L}'_{k+1}, \vartheta_i \right.\right)$ – апостериорная вероятность *l*-й гипотезы о модели входного воздействия, условная по входной реализации видеопоследовательности $\mathbf{L}'_{k+1}$ и *i*-й гипотезе об обнаружении ϑ_i; Λ – обобщенное отношение правдоподобия; $\overline{Z}_*$ – величина некоторого порога обнаружения.

С учётом введенных ограничений и в соответствии с двухфункциональным решающим правилом (2) представлена структура устройства совместного обнаружения–измерения [4], реализующего способ формированием эталонных изображений, адаптивных к изменяющимся условиям наблюдения (рис. 1).

Рассмотрим схему корреляционного обнаружителя–измерителя (КОИ) (рис. 1), позволяющего сформировать изображение объекта и получить разовую оценку его координат на очередном кадре видеопоследовательности по заданному эталону. На вход коррелятора поступает очередной кадр видеопоследовательности $\mathbf{L}_{k+1}$ и эталонное изображение $\widehat{\mathbf{\Theta}}_{k+1}(\vartheta_1)$. На выходе КОИ формируется изображение обнаруженного объекта $\mathbf{\Theta}_{k+1}(\vartheta_1)$, а также совокупность разовых оценок $\Delta\theta=\left\|\Delta x \quad \Delta y\right\|^{\mathrm{T}}$, где $\left\|\Delta x \quad \Delta y\right\|$ – координаты объекта (отклонения от центра оптической системы) относительно центра изображения в системе координат данного изображения.

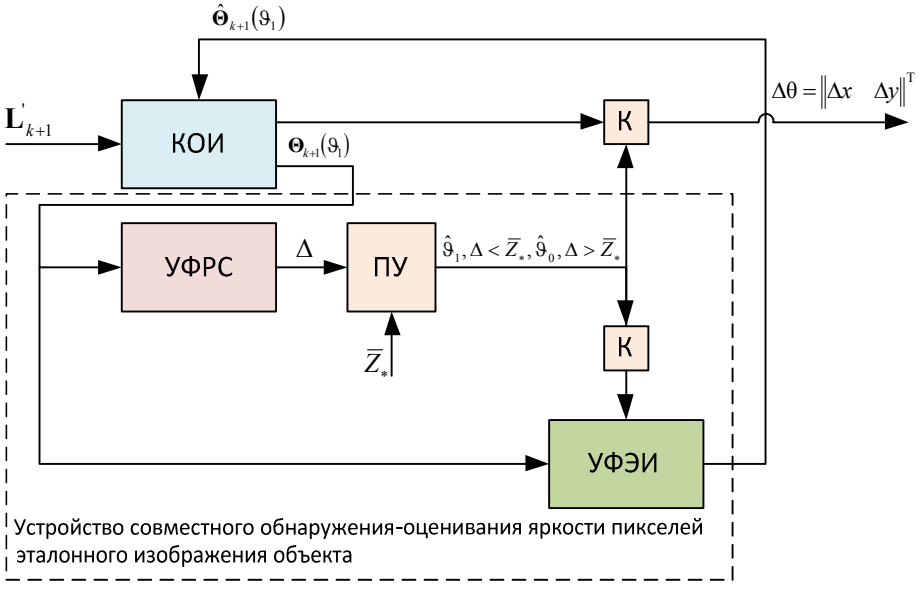


Рис. 1. Структурная схема устройства совместного обнаружения-измерения яркости пикселей эталонного изображения объекта

Сформированное изображение объекта $\mathbf{\Theta}_{k+1}(\vartheta_1)$ поступает на вход устройства формирования решающей статистики (УФРС) $\Delta = \sum_{i=1}^{L_{x(k+1)}} \sum_{j=1}^{L_{x(k+1)}} \frac{\left(\theta_{i,j(k+1)}(\vartheta_1) - \hat{\theta}_{i,j(k+1)}(\vartheta_1)\right)^2}{\sigma_{i,j(k+1)}^{\ 2}}$, где $L_{x(k+1)} \times L_{y(k+1)}$ – размер изображения наблюдаемого объекта в пикселях, $\sigma_{i,j(k+1)}^{\ 2}$ – дисперсия яркости *i,j*-го пикселя изображения наблюдаемого объекта $\mathbf{\Theta}_{k+1}(\vartheta_1)$. В устройстве обнаружения осуществляется сравнение решающей статистики Δ с пороговым значением $\overline{Z}_*$, по результатам которого формируется два вида решения: $\hat{\vartheta}_1$ – объект есть, $\hat{\vartheta}_0$ – объекта нет. Если принято решение в пользу обнаружения $\hat{\vartheta}_1$, то на выходе КОИ формируется совокупность разовых оценок векторов наблюдения обнаруженных объектов $\Delta\theta$. На выходе устройства формирования эталонного изображения (УФРС) формируется эталонное изображение на *k*+1-м кадре с учётом вероятностей взаимного перехода из μ-й модели входного воздействия в η-ю на *k*+1-м кадре.

Заключение. Представлен результат статистического синтеза устройства межкадрового обнаружения-измерения объектов на изображении. Получено двухфункциональное решающее правило (2) совместного обнаружения–оценивания яркостей пикселей *i*-го изображения наблюдаемого объекта $\mathbf{\Theta}_{k+1}$ на *k*+1-м кадре. С учётом введенных ограничений и в соответствии с двухфункциональным решающим правилом (2), представлена структура устройства совместного обнаружения–измерения, реализующего способ формированием эталонных изображений, адаптивных к изменяющимся условиям наблюдения (рис. 1). Эталонное изображение на *k*+1-м кадре формируется с учётом вероятностей взаимного перехода из μ-й модели входного воздействия в η-ю на *k*+1-м кадре.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гузенко, О.Б.** Автоматическое обнаружение и сопровождение динамических объектов на изображениях, формируемых оптико-электронными приборами в условиях априорной неопределенности. М.: Радиотехника, 2015. 280 с.
2. **Алпатов, Б.А.** Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов. Обработка изображений и управление. М: Радиотехника, 2008. 176 с.
3. **Трифонов, А.П.** Совместное различие сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
4. **Репин, В.Г., Тартаковский Г.П.** Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптации информационных систем/ М.: «Советское радио», 1977. 432 с.

S.V. Tsuprik, A.S. Solonar, A.A. Mihalkovski (Military academy of the Republic of Belarus, Minsk). **Statistical synthesis of the device for interframe detection-measurement of ground objects with adaptive formation of reference images**

Abstract. The results of the statistical synthesis of a device for joint detection of objects in an image with adaptation to changes in their spatial configuration are presented. To solve the detection problem, a correlation method is used. To increase the likelihood of correct detection of objects in an image, their reference images are adapted by interframe averaging.

УДК 681.883

В.В. ПРОКОПОВИЧ, А.В. ШАФРАНЮК
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛИ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ МОРСКОГО ОБЪЕКТА

Представлен краткий обзор литературы, посвящённый вопросам синтеза и идентификации моделей сплошной части спектра шумоизлучения морских объектов, а также дискретных составляющих и амплитудных огибающих. Описаны основные источники шума на скоростях до и после образования кавитации. Приведен ряд зарубежных и отечественных моделей шума, описанных в доступных источниках, и проведён их анализ. По результатам анализа сделаны выводы о необходимой доработке существующих моделей.

Введение. Модель шумоизлучения морского объекта является неотъемлемой частью имитаторов пассивных гидроакустических систем (ГАС), определяющая как широко- и узкополосные составляющие спектра объекта, так и амплитудно модулированную составляющую. Также такие модели применяются в задачах классификации, гидроакустических расчётов и в задаче комплексирования данных от нескольких измерительных систем.

Основными источниками шума морского объекта являются [1]:

- собственные шумы гребных винтов; существенно при этом то, что даже на малых скоростях шумы вращения винтов и вихревой шум являются одними из основных источников, а при достижении определенных скоростей (для гражданских судов всего несколько узлов) в вихревых потоках воды возникает эффект кавитации, и шум винтов становится доминирующим;
- шум корпуса, обусловленный вибрацией вследствие вращения вала, работы двигателя, вспомогательных механизмов и др.;
- гидродинамические шумы обтекания;
- прочие шумы.

Традиционно при отработке алгоритмического обеспечения пассивных гидроакустических систем принято рассматривать три составляющих шума морского объекта:

- сплошная часть спектра (СЧС) шума, определяющая его уровень в широкой полосе частот;
- дискретные составляющие (ДС) спектра шума, представляемые в виде звукорядов (гармоник вальнолопастного ряда), либо отдельных ДС вспомогательных механизмов;
- узкополосная амплитудная модуляция широкополосной части шума, состоящая из вальнолопастной модуляции, возникающей при кавитации на винте, и модуляции, вызванной морской качкой.

В доступных источниках существует множество работ, посвященных моделям шумоизлучения морских объектов [1…19]. При этом, как правило, рассматривается либо одна из указанных составляющих шума, либо один из его источников (в интересах проектирования узлов и агрегатов судов). Создание более адекватной всесторонней модели шумоизлучения является актуальной задачей при проектировании имитационно-моделирующих комплексов в интересах отладки ГАС и построении тренажёров, а также в алгоритмах вторичной обработки информации (траекторном анализе, классификации и комплексной обработке данных).

Работа посвящена обзору и анализу существующих моделей различных составляющих шумоизлучения в интересах синтеза более адекватной всесторонней модели.

Модели сплошной части спектра. Первыми моделями СЧС стали модель Урика (англ. Urick model) и модель Росса (англ. Ross model). Модель Урика [1] описывает шум надводных кораблей, для которых доминирующим источником является кавитация, в частотном диапазоне (1÷10) кГц. Уровень шума определяется водоизмещением судна и его скоростью, наклон спектра во всём диапазоне остается неизменным: –6 дБ/окт.

Модель Росса [2] описывает шум морского объекта в диапазоне частот (0,1÷10) кГц. В отличие от модели Урика, Росс рассматривает шум как с учетом эффекта кавитации, так и без него. В случае отсутствия кавитации уровень шума также определяется скоростью и водоизме-

щением объекта, а наклон спектра составляет (–7÷–8) дБ/октава. При кавитации уровень шума определяется числом лопастей винта и числом его оборотов, а наклон спектра составляет (–5.5÷–6) дБ/октава.

Несмотря на то, что эти модели были разработаны на основе данных середины прошлого столетия, они до сих пор часто используются как в России, так и за рубежом [20].

Во второй половине XX века были проведены два крупных исследования по измерению шумов гражданского судоходства, на основе результатов которых были разработаны модели ANATRA и RANDI [3, 4].

Модель ANATRA [3] построена на основе измерений шума гражданских судов (в основном танкеров и сухогрузов) в частотном диапазоне (20÷1000) Гц. В ходе анализа этих данных были определены три типовых спектра для тихих, шумных и обычных судов.

Модель RANDI изначально тоже сводилась к использованию одного из типовых спектров шума для конкретного класса объекта (одного из 5 классов гражданских судов) [4], но впоследствии была значительно доработана. Согласно последней версии, уровень шума определяется не только классом судна, но и его скоростью и длиной. Спектр разбит на три частотных диапазона, каждый из которых имеет различный наклон [5]. Также существует несколько модификаций данных моделей, а именно модель Wales-Heitmeyer [6] для коммерческих судов и модель SONIC [7] для различных классов судов на основе данных предоставляемых открытой базой данных AIS [8].

Помимо масштабных компаний по измерению шумов гражданского судоходства, проводились и частные экспериментальные измерения с формированием соответствующих моделей. Одним из примеров является модель IFREMER [9], основанная на измерениях трех научных судов (условно названных *шумный, тихий и стандартный*), указывающей на то, что наклон спектра сплошной части шума не постоянен во всей полосе частот и имеет перегиб на частоте, зависящей от типа судна.

Последними и наиболее актуальными являются модель Wittekind [10] и основанная на её принципах модель AQUO [11]. Отличительной особенностью этих моделей является представление СЧС шума объекта как суммы трех составляющих, вызванных различными источниками шума: шум механизмов, некавитационный шум винтов и кавитационный шум. Модель Wittekind определяет каждую из составляющих выражениями с такими параметрами объекта, как водоизмещение, длина, ширина и осадка судна, а также скорость возникновения кавитации, число и масса установленных дизельных двигателей и коэффициент определяющий «качество» амортизации их установки.

В ходе проекта AQUO, направленного на изучение воздействия шума судоходства на морских обитателей, было предложено использование аналогичного разбиения СЧС шума на составляющие, с последующим заданием 12 коэффициентов и трех частот среза модели. Идентификация коэффициентов и частот проводится на основе экспериментальных данных, для чего, обычно, достаточно проведения измерений для 2…3 скоростей хода объекта. В техническом отчете проекта AQUO были представлены необходимые параметры для 11 типов гражданских судов, при этом результаты показали хорошее соответствия как с исходными экспериментальными данными, так и данными использовавшимися при разработке моделей RANDI, SONIC, IFREMER и др. с поправкой на эффект отражения звука от морской поверхности (зеркало Ллойда, англ. Lloyd mirror [11]). Также стоит отметить, что существует методика идентификации коэффициентов модели для классов объектов, не приведенных в отчете AQUO, успешно применяемая на практике [12].

Модели дискретных составляющих шума. ДС шума морского объекта условно можно разделить на две группы: звукоряд гармоник вальнолопастного ряда и отдельные ДС работы механизмов.

ДС работы механизмов являются уникальными для каждого объекта. Как правило, частоты их возникновения кратны половине частоты сети электропитания (25 или 30 Гц) [10][13], но так же отмечается и наличие ДС на иных частотах. Ширина ДС увеличивается с увеличением частоты и составляет от 0,05 Гц (на частотах 10÷60 Гц) до единиц Гц (на частотах около 1000 Гц) [14].

Модель узкополосной амплитудной модуляции широкополосной части шума. Подводные шумы морских объектов подвержены двум видам модуляции: вальнолопастной модуляции,

обусловленной кавитацией, возникающей на гребном винте и модуляции качкой судна на волнении и, как следствие, периодическим изменением глубины погруженности винта. Так же отметим, что причиной возникновения модуляции качкой является эффект зеркала Лойда, причём собственно модуляции подвергаются только шумы, вызванные движителем объекта.

Модель амплитудной модуляции достаточно подробно описана в работе [18], и выводы сделанные в ней подтверждаются в зарубежных работах посвященных DEMON компоненте [19]. При этом изучение литературы позволяет сделать важный вывод: вально-лопастная модуляция присутствует только для движителя, работающего в кавитационном режиме.

Направленность шумоизлучения. В большинстве работ, посвященных шумоизлучению морского объекта, он рассматривается как точечный ненаправленный источник. В то же время в ряде работ, посвященных шумоизлучению винта, отмечается наличие неравномерной направленности шума, особенно при возникновении кавитации. При этом, например, применение лопастей с закрученной формой искажает форму характеристики направленности, поворачивая ось симметрии в сторону поверхности. Этот эффект может оказаться ключевым для подводных объектов. Также отмечается изменение направленности в связи с отражениями от поверхности и кормовой части судна. Таким образом, для формирования модели с учетом направленности необходимо четко разделить шумы, источником которых является корпус (ненаправленные), и собственные шумы винтов. Большая часть вибраций (шумов), возникающих при работе движителя передается через вал на корпус судна, следовательно в некавитационном режиме работы источник шума можно рассмотреть в ближнем поле как диполь, а в дальнем как ненаправленный монополь. Эффекты же, вызванные кавитацией на винтах (шумы в СЧС, ДС и амплитудная модуляция), обладают направленностью в зависимости от типа движителя и формы лопастей винтов.

Анализ рассмотренных моделей. Вальнолопастной звукоряд представляет собой ряд гармоник соответствующих числу лопастей винта и скорости его вращения. На основе результатов математического моделирования шума винта с использованием метода конечных элементов в условиях кавитации и без неё, приведённых в работах [13, 15…17], можно выдвинуть ряд предположений, описываемых ниже.

Дискретные составляющие вально-лопастного звукоряда, представляются в текущих работах как возникающие от единого источника [18], вследствие кавитационных и некавитационных процессов на лопастях винта и вала (входят в кавитационную и некавитационную составляющие спектра). Однако по работам [16] можно сделать выводы о раздельности источников вальных и лопастных дискрет. Ввиду этого введём следующие определения:

1) определим как лопастной звукоряд ДС (кавитационный, либо некавитационный) шумы лопастей винтов, источником которых является движитель судна;
2) определим как вальный звукоряд ДС шумы вала (валов) движителей судна, излучаемые корпусом.

Таким образом, обычно наблюдаемые ДС звукоряда являются суперпозицией различных по уровню и фазе ДС, на идентичных частотах, имеющих при этом различные источники (в т.ч.) с различной направленностью.

В части СЧС по результатам изучения существующих моделей шумоизлучения можно сделать следующие выводы:

1) Современные модели СЧС шума морского объекта указывают на наличие неравномерного на всем диапазоне частот наклона сплошной части спектра (наклона линейной регрессии, аппроксимирующей спектр мощности).
2) Наиболее актуальной в части применения является модель СЧС AQUO по ряду причин:
   - возможность выделения кавитационной составляющей шума как отдельной составляющей, что позволяет оценить её направленность отдельно от остальных источников шума судна (в т.ч. и амплитудной модуляции).
   - наличие значений необходимых параметров для большого перечня гражданских судов, верифицированных экспериментальными данными;
   - наличие методики идентификации параметров модели для отсутствующих классов.

К наиболее значимым выводам можно отнести следующее:

1) Разделение источников вально-лопастного звукоряда на кавитационный лопастной, некавитационный лопастной и вальный звукоряды, что позволяет оценить их параметры (включая направленность) отдельно от остальных источников шума.
2) Амплитудной модуляции качки подвержены только шумы СЧС движителя (в кавитационном и некавитационном режимах) и лопастной кавитационный звукоряд.
3) Для надводных объектов эффект кавитации наблюдается не только в области винта, но и на границе корпуса с водой, что необходимо учесть при задании направленности кавитационной составляющей СЧС корпуса судна.

Заключение. В докладе рассмотрены различные модели шумоизлучения и проведён из анализ, на основе которого введён ряд дополнительных предположений. Из рассмотренных моделей, применительно к их использованию в гидроакустике, выбраны модель Витикенда и AQUO. В дальнейшем предполагается уточнение выбранных моделей в соответствии с приведёнными результатами анализа, и разработка методики идентификации их параметров для объектов (источников шумоизлучения) заданного алфавита классов.

Работа проводилась при поддержке грантов РФФИ №19-08-00253 А

ЛИТЕРАТУРА

1. **Р.Дж. Урик.** Основы гидроакустики. – Л.: Судостроение, 1978. – 446 с.
2. **D. Ross.** Mechanics of underwater noise. Peninsula Publishing, 1976.
3. **J.L. Espérandieu**, Prediction of horizontal ambient shipping noise directionality with an analytical model: ANATRA. UDT'90, Undersea Defence Technology Conference, London, 7-9 Feb. 1990, p.270
4. **R.A. Wagstaff**, RANDI: Research ambient noise directionality model. Naval Undersea Center. April 1973.
5. **J. E. Breeding, L. A. Pflug, E. L. Bradley, M. H. Walrod, W. McBride**. Research Ambient Noise Directionality (RANDI) 3.1 - Physics description. Technical Report NRL/FR/7176-95-9628, Naval Research Laboratory, USA, 1996.
6. **S. C. Wales and R. M. Heitmeyer.** An ensemble source spectra model for merchant ships. Journal of the Acoustical Society of America, 111:1211–1231, 2002.
7. **A. Brooker and V. Humphrey**. D2.3 - Noise model for radiated noise/source level (intermediate). Technical report, FP7-314394-SONIC, University of Southampton, 2015.
8. AIS - сайт
9. **X. Lurton,** Propagation des ondes acoustiques sous-marines, 1988
10. **D. K. Wittekind.** A simple model for the underwater noise source level of ships. Journal of Ship Production and Design, 30(1):1–8, 2014.
11. **Audoly C., Rizzuto E.** (2015), Ship underwater radiated noise patterns, AQUO European Collaborative Project, Deliverable D2.1.
12. Analysis and Modelling on Radiated Noise of a Typical Fishing Boat Measured in Shallow Water Inspired by AQUO Project's Model
13. **S.J. Malinowski, I. Gloza, J. Domagalski.** Underwater noise radiated by ships, their propulsion and auxiliary machinery, and propellers
14. **И.М. Рудько**, Стохастическая модель звукоряда
15. **H.Seol, B. Jung, J.-C. Suh, S. Lee.** Prediction of non-cavitating underwater propeller noise. Journal of Sound and Vibration 2002
16. **K. Belibassakis.** Generation and propagation of underwater noise from marine propellers. Euronoise 2018 Crete
17. **J.-S. Jang, H.-T. Kim, W.-H. Joo.** Numerical study on non-cavitating noise of marine propeller. Inter.noise 2014 Australia
18. **Кудрявцев А.А., Лугинец К.П., Машошин А.И.** Об амплитудной модуляции подводного шумоизлучения гражданских судов // Акуст. журн. 2003. Т. 49.№ 2. С. 224–228.
19. **A.C. Takinaci, T. Taralp.** Prediction and simulation of broadband propeller noise. Journal of Marine Science and Technology, Vol.21, No. 5, pp538-544, 2013.
20. **Paul C. Etter.** Underwater Acoustic Modeling and Simulation. Fifth Edition. CRC Press, pp. 608, 2018.

V.V. Prokopovich (Concern CSRI "Elektopribor", Saint-Petersburg), **A.V. Shafranyuk** (Concern CSRI "Elektopribor", Saint-Petersburg). **Investigation of the noize model of a marine object**

Abstract. An overview of the literature devoted to the synthesis and identification of noise models of marine objects in the continuous part of the spectrum, as well as in discrete components and amplitude envelopes is presented. The main sources of noise at speeds before and after cavitation are presented. A number of foreign and domestic models of noise that are in open information access are given.

УДК 621.375

Г.А. ПОДШИВАЛОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ, НАБЛЮДАЕМЫХ ПО КАНАЛАМ ШУМОПЕЛЕНГОВАНИЯ НА ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗНЕСЕННЫЕ АНТЕННЫ

Описаны несколько подходов к решению задачи автоматической идентификации морских объектов, наблюдаемых по каналам шумопеленгования на разные приемные антенны, в частности на носовую и гибкую буксируемую протяженную антенны. Рассмотрены особенности задачи идентификации морских объектов для этого случая и предложен новый способ ее решения, основанный на анализе оценок скорости обнаруженных объектов. Приводятся достоинства и недостатки предложенного способа.

Введение. Одной из основных систем, входящих в современный гидроакустический комплекс, является система комплексной обработки информации, поступающей от различных каналов наблюдения. Система комплексной обработки информации решает две основные задачи [1]:

- идентификация физических объектов, обнаруженных и сопровождаемых различными системами наблюдения;
- объединение информации о физических объектах, одновременно сопровождаемых несколькими системами наблюдения для повышения достоверности их классификации, точности определения координат и параметров движения.

Целью настоящей работы является разработка способа автоматической идентификации морских объектов, наблюдаемых по каналам шумопеленгования на носовую антенну и гибкопротяженную буксируемую антенну (ГПБА).

Особенности идентификации морских объектов. Ввиду особенности расположения и конструкции ГПБА оценка пеленга морского объекта, наблюдаемого по этому каналу, может существенно отличаться от оценки пеленга, выработанной по каналу наблюдения на носовую антенну в случае сравнительно малой (менее 10 километров) дистанции до объекта. Таким образом, применить стандартный способ идентификации целей, основанный на сравнении оценок пеленга и величины его изменения, не всегда возможно. Поэтому актуальной является задача разработки способа идентификации объектов, наблюдаемых на носовую антенну и ГПБА.

Способы идентификации объектов по дополнительным параметрам. В докладе рассматриваются следующие существующие способы идентификации:

- сравнение параметров дискретных составляющих, выделенных в спектре шумоизлучения обнаруженных объектов;
- выработка и сравнение недостающих координат объекта на основе измеренных параметров сигналов и гипотезы о зависимости значений этих параметров от дистанции и скорости каждого возможного класса объекта.

Первый способ заключается в использовании результатов спектрального анализа сигнала от обнаруженного объекта (в каждом из каналов наблюдения). Так как для каждого объекта характерен уникальный набор дискретных составляющих спектра несущей и амплитудных огибающих, то при совпадении параметров обнаруженных дискретных составляющих сигнала можно сделать вывод об идентичности объектов, наблюдаемых по разным каналам наблюдения [3].

Второй способ основан на сравнении оценок дистанции и скорости объекта, выработанных гидроакустическим методом [2]. В этом случае в качестве оценки дистанции и скорости принимаются оценки максимального правдоподобия, выработанные на основе сравнения измеренных параметров сигналов от объектов с рассчитанными для каждой возможной дистанции и скорости объекта.

Эффективность рассмотренных известных способов решения задачи идентификации объектов, наблюдаемых по каналам шумопеленгования на носовую антенну и ГПБА, зависит от множества факторов, обусловленных возможностями гидроакустического комплекса в текущих гидроакустических условиях.

В работе предлагается новый способ, который основан на оценке скорости объектов, обнаруженных по разным каналам. На каждом цикле наблюдения принимается гипотеза о том, что все объекты, наблюдаемые по каналу шумопеленгования на носовую антенну, идентичны каждому объекту, наблюдаемому по каналу шумопеленгования на ГПБА. Таким образом, для каждой пары оценок курсовых углов, выработанных по разным каналам наблюдения, становится возможным триангуляционным методом рассчитать оценку дистанции до него. Величину, полученную таким способом, назовем оценкой условной дистанции, а объект, которому она соответствует – условно-идентичным. Далее на основе оценок условной дистанции, выработанных в разные моменты времени по одному и тому же условно-идентичному объекту, рассчитывается его скорость. Гипотеза об идентичности считается верной, если на протяжении контрольного промежутка времени дисперсия оценки скорости условно-идентичного объекта не превысила порогового значения. Если одному объекту, наблюдаемому по одному каналу наблюдения, оказались идентичны несколько объектов, наблюдаемых по другому каналу наблюдения, то среди них выбирается такой объект, оценка курсового угла которого отличается от оценки курсового угла первого объекта на меньшую величину.

Заключение. Предложенный способ решения задачи идентификации объектов, наблюдаемых по каналам шумопеленгования, позволяет осуществить корректную идентификацию при отсутствии достоверных результатов спектрального анализа сигнала от обнаруженного объекта и не зависит от флюктуации его уровня. Для повышения вероятности правильной идентификации используется информация о выработанных оценках пеленгов на объект, накопленная в течение относительно продолжительного периода времени (порядка нескольких минут).

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 17-08-00666 А

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гриненков А.В., Силина Т.А.** Структура системы комплексной обработки информации гидроакустических средств надводного корабля. Сборник докладов второй научно-технической конференции молодых специалистов ОАО «Концерн «Океанприбор», 2007. С.20-23.
2. **Марасёв, С.В.** Методы классификации шумящих объектов / С.В. Марасёв, Г.А. Подшивалов // Материалы конференции «Управление в морских системах» (УМС-2018). СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2018.
3. **Машошин А.И., Силина Т.А.** Алгоритм функционирования системы комплексной обработки информации гидроакустического комплекса подводной лодки. – Гидроакустика, 2011, вып.13(1), с.97-108

G.A. Podshivalov (Concern CSRI Elektropribor, S-Petersburg). **Identification of marine objects observed by noise-finding channels on spatially divided antennas**

Abstract. Several approaches are described for solving problems associated with automatic marine objects observed through the noise-finding channel on different receiving antennas, in particular, to a forward and flexible towed extended antenna. The features of the assessment of offshore facilities for this case are considered and a new way of solving it is proposed. The advantages and disadvantages of the proposed method are given.

▪ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИБОРОВ НАВИГАЦИИ ▪

УДК. 681.7.068.7

Д.Е. УСАЧЕВ, Н.Н. ИВАНОВ
(ОАО «АВАНГАРД»,
Санкт-Петербургский государственный университет авиационного приборостроения)

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ СХЕМ СВЯЗИ ПОЛИМЕРНОГО ОПТИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С ИСТОЧНИКОМ / ПРИЕМНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Проведен анализ перспективных вариантов сопряжения активных компонентов, таких как полупроводниковые лазеры и фотодиоды, с полимерными волноводами в оптоэлектронном модуле. Рассмотрены две схемы связи полимерного волновода с источником и приемником излучения. В результате сравнения по таким параметрам, как светорассеяние, возможность реализации печатных плат при помощи стандартных методов изготовления, простота конструкции и др. обоснован выбор схемы изготовления оптической шины передачи данных на печатной плате.

Введение. В процессе производства современной высокопроизводительной аппаратуры необходимо выполнить качественное соединение преобразующих компонентов с оптическим волноводом, образующим оптическую шину передачи данных, обеспечив минимальные потери сигнала. При этом совмещение и выравнивание компонентов предпочтительно должны достигаться стандартными методами сборки электронных модулей. Предлагаемая работа посвящена выбору схемы связи оптического волновода с источником и приемником излучения.

Цель работы – установление сопряжения полимерных волноводов с полупроводниковыми лазерами в оптоэлектронном модуле, анализ и сравнение схем связи полимерного оптического волновода с источником / приемником излучения и определение наиболее перспективной схемы связи полимерного оптического волновода с источником / приемником излучения для изготовления оптической шины передачи данных на печатной плате.

Исследование и анализ схем связи полимерного оптического волновода с источником / приемником излучения.

Исполнение схемы связи лазера и волновода на основе шариковых линз требует высокой точности юстировки микрошариковых линз относительно друг друга, а также относительно микрозеркала. Это не может быть достигнуто за счет традиционно используемых методов сборки, так как точность допусков должна составлять ± (2–5) мкм [1]. Поэтому для реализации данной схемы требуется использование дополнительного дорогостоящего специализированного оборудования. Юстировка массива микролинз относительно волновода и фотоприемника / VCSEL лазера на печатной плате может быть осуществлена с использованием стандартных методов сборки электроники, т.к. точность допусков соответствует значениям, которые обеспечиваются такими методами, то есть ± (10–15) мкм.

Микролинзовое соединение имеет достаточно высокую эффективность сопряжения, обеспечивающую надежную передачу информации. Однако следует отметить, что «микрошариковое соединение» обладает меньшими потерями на входе и выходе излучения в сравнении с микролинзовым соединением (0,6 дБ и 1,1 дБ, соответственно) [2].

Существует несколько схем сопряжения оптического волновода с преобразующими элементами – поперечное и соединение встык. Рассмотрим две схемы соединения с поперечным соединением, которые являются наиболее перспективными для создания оптической шины передачи данных на печатной плате благодаря возможности установки VCSEL лазера и фотоприемника на поверхность печатной платы, в том числе в непосредственной близости от управляющей схемы [3].

Первая схема использует два установленных друг над другом массива микролинз. Они образуют пару коллиматорно-фокусирующей линзы, подходящую как для ввода, так и для вывода излучения. Оптическая конструкция передатчика показана на рис. 1. Пучок от VCSEL коллимируется с использованием первой линзы, вторая линза фокусирует луч на вход волновода. Кроме того, для отклонения света в волновод требуется повернутая на 45° отражающая поверхность. На приемном конце системы используется противоположное функционирование. Двухсторонняя матрица микролинз будет реализована путем соединения нижних поверхностей двух подложек микролинз (как показано на рис. 1). Параметры линзы, используемые в конструкции, были следующими: радиус кривизны – 266 мкм, шаг матрицы объектива – 250 мкм, профиль поверхности – сферический. Матрицы линз изготавливаются из акрилатной фотополимерной смолы на стеклянных подложках толщиной 0,3 мм. Две подложки склеиваются минимальным количеством совместимого по коэффициенту преломления клея. Таким образом, расстояние между линзами составляет 0,6 мм [4].

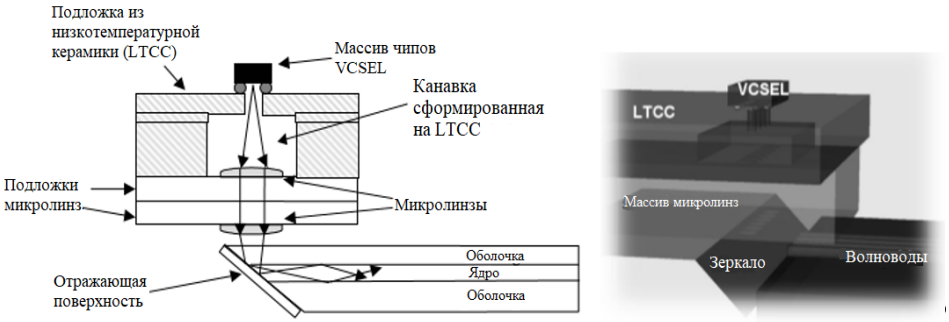


Рис. 1. Связь VCSEL-волновода с использованием многослойных массивов микролинз и подложки модуля LTCC [3]

Вторая схема соединения (показана на рис. 2) основана на микроразмерных шариковых линзах, приклеенных к поверхности зеркала. Две шариковых линзы на каждый оптический канал используются для отражения и коллимации источника на входе волновода, когда микрозеркало наклоняет луч на 90°, и наоборот, на конце приемника. Полученный компонент устанавливается в микросхему массива VCSEL (или ПИН-диодов), а весь модуль передатчика (или приемника) устанавливается в массив волноводов. Как и в схеме стыковой связи, сборка по стандартной технологии поверхностного монтажа может стать затруднительной, так как компонент должен быть установлен в отверстие, сделанное на плате с качественными волноводными торцевыми гранями [5]. Кроме того, из-за наличия малых компонентов эту схему трудно вводить в массовое производство. Однако возможно разработать инструмент выравнивания, например, раму, для повторяемого склеивания шариковых линз. В разработанной системе линзы имели диаметр 250 мкм и были изготовлены из стекла BK7. Зеркало было выполнено путем полировки края стеклянной подложки с углом наклона 45° и нанесением на неё алюминиевого слоя.

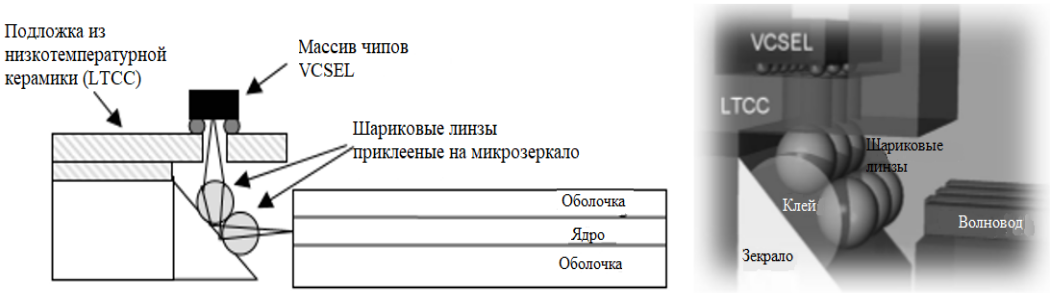


Рис. 2. Схема связи лазера и волновода на основе шариковых линз и подложки модуля LTCC [3].

Схема связи полимерного оптического волновода на основе массивов микролинз является наиболее эффективным техническим решением для последующего изготовления оптической шины передачи данных на печатной плате по технологическим и экономическим показателям.

Заключение. Проведен анализ двух наиболее перспективных схем связи полупроводниковых лазеров и оптических волноводов с источником / приемником излучения на основе шариковых линз. Выполнено сравнение этих схем по таким параметрам как светорассеяние, возможность реализации стандартными методами изготовления печатных плат, простота конструкции и т.д. В качестве наиболее эффективного технического решения для дальнейшего изготовления полимерной оптической шины передачи данных на печатной плате была выбрана схема связи полимерного оптического волновода с источником / приемником излучения на основе массивов микролинз.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mikko Karppinen, Jukka-Tapani Mäkinen, Kari Kataja, Antti Tanskanen, Teemu Alajoki, Pentti Karioja, Marika Immonen, Jorma Kivilahti.** Embedded optical interconnect on printed wiring board // Helsinki University of Technology, Electronics Production Technology, 2004.
2. **D. Plant, and A. Kirk.** Optical Interconnects at the Chip and Board Level: Challenges and Solutions. // Proceedings of IEEE, Vol. 88, No. 6, pp. 806–818, June 2000.
3. **Jian Chen.** Polymer waveguide technology for optical interconnect circuits and components. / Jesus College University of Cambridge, 2015.
4. **Yuzo Ishii, Shinji Koike.** SMT-Compatible Large-Tolerance “OptoBump” Interface for Interchip Optical Interconnections, 2003.
5. **Krzysztof Nieweglowski and Karlheinz Bocka.** Assembly of optical transceivers for board-level optical interconnects // Electronics Packaging Laboratory, Technische Universität Dresden, Germany, 2016.

D.E. Usachev, N.N. Ivanov («AVANGARD» OJSC, St-Petersburg, State University of Aerospace Instrumentation). **Research and analysis of the circuit of connection of a polymeric optical waveguide with a source / receiver of emitting.**

Abstract. The analysis of promising variants for conjugating active components, such as semiconductor lasers and photodiodes, with polymer waveguides in an optoelectronic module has been carried out. Two schemes of coupling a polymer waveguide with a radiation source and detector are considered. As a result of comparison of such parameters as light scattering, the possibility of implementation using standard methods of manufacturing printed circuit boards, simplicity of design, etc. the scheme for the further manufacture of an optical data bus on a printed circuit board was chosen.

УДК 629.7.036.621.373

М.В. ПАВЛОВА, О.С. ЮЛЬМЕТОВА
(Университет ИТМО, ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

А.Г. ЩЕРБАК
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАПЫЛЕНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНОГО ХРОМОВОГО ПОКРЫТИЯ НА СФЕРИЧЕСКИЙ УЗЕЛ

В работе рассмотрена возможность напыления тонкопленочного покрытия хрома на сферический узел для обеспечения однородной поверхностной проводимости. Представлена технология, позволяющая получить покрытие с хорошей адгезией. Выявлены зависимость удельного электрического сопротивления от толщины покрытия и влияние формирования оптического рисунка на геометрию узла.

Введение. Для гироприборов с неконтактным подвесом чувствительного элемента точность работы прибора напрямую зависит от точности изготовления сферического узла. Чувствительный элемент шарового гироскопа, например, электростатического гироскопа [1], должен быть идеальным с точки зрения геометрии и дисбалансов. На данный момент перспективным требованием, предъявляемым к сферическому узлу, является однородность поверхностной проводимости. Ротор электростатического гироскопа изготавливается следующим образом: из бериллия формообразуется сферическая заготовка, формируется необходимая разность моментов инерции посредством диффузионной сварки, производится балансировка и сферодоводка, на поверхность сферического узла напыляется износостойкое покрытие нитрида титана [2] и финишной операцией является нанесение оптического изображения методом лазерного маркирования [3, 4]. Однако в результате формирования оптического изображения на поверхности нитрида титана образуется оксид титана. Следовательно, поверхность сферического узла имеет разную электропроводность, что негативно влияет на динамику ротора при его вращении в электростатическом подвесе. Это может быть обусловлено наличием поверхностной неоднородности ротора. В связи с этим было предложено исследовать возможность напыления тонкопленочного хромового покрытия на финишную поверхность сферического узла, что и является целью настоящего исследования.

Исследование и разработка технологии напыления хромового покрытия. Предварительные эксперименты показали, что с ростом толщины хромовое покрытие ухудшает контрастность оптического рисунка на роторе, поэтому необходимо было разработать режим не только напыления покрытия на ротор, но и режим нанесения оптического рисунка методом лазерного маркирования. За основу разработки режима формирования оптического рисунка с повышенной величиной контрастности была использована уже имеющаяся технология, обеспечивающая контрастность в пределах 0,4±0,05 на длине волны 860-890 нм. Этот режим основан на применении многопроходной лазерной обработки для постепенного усиления контрастности, не приводящей к пережогам поверхности покрытия нитрида титана (табл. 1).

Таблица 1

Режим маркирования ротора

Мощность P, %	Скорость V, мм/с	Частота f, кГц	Длительность импульса τ, нс	Плотность заливки N, лин/мм	Число проходов Q	Температура лазера T, °C
25	85	99	4	250	4-7	32

Для увеличения оптического контраста было предложено увеличить количество проходов лазера с 4-х до 7-ми.

Режим напыления хрома на финишную поверхность ротора был выявлен в ходе экспериментально-исследовательских работ и обеспечил хорошую адгезию к поверхности (табл. 2).

Таблица 2

Режимы напыления пленки хрома методом катодно-ионной бомбардировки

Время напыления t, с	40	120
Напряжение смещения U, В	150	
Вакуум в камере $P_{вак}$, мм рт.ст.	$1 \cdot 10^{-4}$	
Ток дуги I, А	80	

Особенностью режима является время напыления покрытия хрома, которое составляло 40 с и 120 с. Для анализа полученного покрытия были получены круглограммы, снимки оптических изображений с поверхности ротора и контрастность, полученная при формировании пространственной карты отражения.

Заключение. По результатам исследования разработана технология напыления хрома методом катодно-ионной бомбардировки, позволяющая получить тонкопленочное хромовое покрытие с хорошей адгезией и толщиной порядка 15 нм. Выявлено, что увеличение длительности напыления уменьшает удельное электрическое сопротивление тонкопленочного хромового покрытия на порядок. Установлено, что повышение контрастности оптического изображения за счет увеличения числа проходов приводит к прожигу покрытия и формированию ступенчатого микрорельефа на поверхности сферического узла.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ландау Б.Е.** Электростатический гироскоп со сплошным ротором. Гироскопия и навигация, №1, 1993, с. 6-12.
2. **Фомичев А.М., Юльметова О.С., Беляев С.Н., Щербак А.Г.** Устройство для напыления тонкопленочных покрытий на сферические роторы электростатического гироскопа. Патент РФ № 2555699. Бюл. 2015. № 5.
3. **Юльметова О.С., Щербак А.Г., Буцык А.Я., Ландау Б.Е, Вейко В.П, Валетов В.А.** Способ изготовления ротора электростатического гироскопа./ Патент РФ 2498224, МПК G 01C25/00.
4. **Юльметова О.С., Щербак А.Г., Вейко В.П., Юльметова Р.Ф., Щербак С.А.** Управление контрастностью растрового рисунка при лазерной маркировке: моделирование технологического процесса. Изв. вузов. Приборостроение. 2015. № 6(58), стр. 485-491.

M.V. Pavlova, O.S. Yulmetova (ITMO University, St-Petersburg, Concern CSRI Elektropribor, JSC, St-Petersburg), **A.G. Scherbak** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St-Petersburg). **The research of sputtering process of thin film chrome coating on the spherical unit.**

Abstract. The paper considers the possibility of sputtering a thin-film coating of chromium on a spherical unit to ensure homogeneous surface conductivity. The technology that allows to obtain a coating with good adhesion is presented. The dependence of the specific electrical resistance on the coating thickness is revealed. The effect of the formation of an optical pattern on the geometry of the unit is shown.

УДК 67.05

М.Ю. ЗАХАРЧЕНКО, А.С. ЯКОВИШИН
(Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.)

ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ ПУТЕМ РЕЛАКСАЦИИ ОСТАТОЧНЫХ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрен метод повышения долговечности подшипников качения путем релаксации внутренних напряжений, остающихся в процессе изготовления. Разработана математическая модель метода мгновенного частотного анализа при помощи модели некоррелированного «белого шума» и процесса снятия остаточных напряжений.

Введение. При изготовлении точных приборов для ракетно-космической, авиационной, оборонной промышленности следует особое внимание уделять остаточным напряжениям в деталях, которые могут скапливаться во всевозможных узлах приборов, и впоследствии могут привести к неточности показаний и даже их поломке [1]. В процессе серийного производства деталей приборов и машин, имеющих сложную геометрическую форму и особо высокие точностные характеристики, наиболее существенными являются остаточные напряжения первого рода – это макронапряжения, охватывающие область детали, размеры которой одного порядка с размерами всего изделия. Впоследствии воздействие таких напряжений приводит к нестабильности геометрических размеров детали. Как правило, этот неизбежный побочный эффект вызван несовершенством технологий изготовления, таким образом, с течением времени под действием внутренних напряжений геометрия детали может изменяться, что в свою очередь может привести к ускоренному износу или поломке изделия. Например, при производстве прецизионных координатно-расточных станков, станина после изготовления выдерживается несколько десятилетий, в течение которых остаточные напряжения распределяются за счет естественного старения материала и при эксплуатации деформация конструкции не происходит. Так же в деталях, которые используются в экстремальных условиях (при высоких нагрузках, в условиях космоса - воздействия низких и высоких температур), внутренние напряжения могут пагубно сказаться на работе узла или агрегата в целом. Таким образом, решение проблемы контроля и релаксации остаточных напряжений является актуальной проблемой современного машиностроения и точного приборостроения.

Целью работы является повышение долговечности подшипников качения путем релаксации остаточных внутренних напряжений. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработка метода мгновенного частотного анализа процессов контроля и релаксации остаточных напряжений при помощи модели некоррелированного «белого шума»;
- разработка способа практической реализации мгновенного частотного анализа процессов контроля и релаксации остаточных напряжений при исследованиях механических и электрических систем, что обеспечит возможность повышения качества подшипников качения, применяемых в механических системах.

Разработка метода повышения долговечности подшипников качения. В настоящее время существует более десятка методов контроля и релаксации остаточных напряжений [2, 4, 8, 9, 10, 13]. В работе выполнен анализ преимуществ и недостатков каждого из них. Существующие методы контроля остаточных напряжений и скрытых дефектов обладают рядом недостатков, а именно: а) метод ультразвуковой диагностики остаточных напряжений [2, 5] позволяет измерять только внутренние дефекты [6], и не имеет возможности контроля остаточных напряжений; б) метод рентгенографии позволяет определять величину остаточных напряжений только в поверхностном слое металла (глубиной до 20 мкм).

Проведенный анализ перечисленных методов контроля внутренних напряжений позволяет сделать вывод о том, что отсутствуют методы контроля остаточных напряжений и скрытых дефектов в деталях машин, имеющих сложную конфигурацию. Таким образом, разработка новых,

Научный руководитель м.н.с. каф. Кузнецов А.О.

универсальных методов контроля напряжений деталей является актуальной. Наиболее перспективными из них являются методы наложения на заготовку резонансных или ультразвуковых колебаний [2, 5]. Реализация этих методов возможна на базе электромагнитной системы. В случае если обрабатываемая и контролируемая деталь металлическая, имеется возможность как контролировать, так и снимать остаточные напряжения посредством воздействия на деталь электромагнитного поля на резонансной частоте и последующего контроля частот колебаний в акустическом диапазоне. Введение системы автоматического регулирования по амплитуде и частоте входных колебаний позволит сохранить устойчивость системы и предотвратить разрушение детали. При серийном производстве деталей требуется контроль остаточных напряжений и скрытых дефектов [8], который требуется производить быстро, что повышает технико-экономические показатели производства, а именно - энергоэффективность. Разрабатываемый в проекте метод контроля позволяет при помощи модели белого шума [10, 12] производить частотный анализ механической системы любой сложности практически за секунды (время проверки зависит от периода нижней частоты диапазона). Применение схожего метода контроля известно только в акустике и акустической метрологии, при тестировании и акустических системах.

Также при серийном производстве приборов, например, таких как акселерометры и виброметры, производится частотный анализ их полосы пропускания, который в настоящее время проводят посредством перебора частот с определенным шагом, что занимает много времени и энергетических ресурсов и самое главное, тратится ресурс работы прибора.

Предлагаемый в работе метод позволяет производить мгновенный частотный анализ посредством возбуждения колебаний чувствительного элемента при помощи модели белого шума, при этом выходным сигналом будет являться амплитудно-частотная характеристика механической или электрической системы. Впервые разработанный универсальный метод позволяет производить частотный анализ как электрических, так и механических систем. При проведении измерений требуется сокращение времени проверок, в целях снижения энергопотребления, ускорения производства, а в случае с готовым устройством или изделием - сохранение ресурса. Таким образом, предлагается метод мгновенного частотного анализа при помощи модели некоррелированного «белого шума» и его практическая реализация при исследованиях внутренних напряжений механических систем и исследовании частотных характеристик электрических систем [7, 10, 11, 14]. Исходя из этого, предложена математическая и компьютерная модель процесса, позволяющая посредством численного моделирования выявить и описать основные закономерности и особенности процесса контроля остаточных напряжений и скрытых дефектов детали на основе применения «белого шума».

Разработан универсальный метод мгновенного частотного анализа, а также метод контроля и снятия остаточных напряжений деталей, имеющих сложную геометрическую форму. При этом контроль осуществляется посредством сравнения результатов конечно-элементного анализа собственных колебаний детали с результатами экспериментально проведенного частотного анализа, полученного при помощи разработанного метода мгновенного частотного анализа при помощи модели некоррелированного «белого шума».

Применительно к подшипникам качения, снятие описанными выше методами остаточных напряжений, которые появляются в процессе изготовления деталей, позволяет избежать преждевременной деформации колец подшипников и продлевает срок эксплуатации подшипников на годы.

Заключение. Разработан метод мгновенного частотного анализа при помощи модели некоррелированного «белого шума» и процесса снятия остаточных напряжений. Подтверждена адекватность модели и возможность практической реализации метода. Обоснованы преимущества метода, который позволяет мгновенно измерять отклик исследуемой системы на всех частотах рассматриваемого диапазона путем синтеза модели сигнала, спектральные составляющие которого равномерны на исследуемом частотном диапазоне. Практическая реализация мгновенного частотного анализа процессов контроля и релаксации остаточных напряжений позволяет более эффективно производить частотный анализ как механических, так и электрических систем, и обеспечивает возможность повышения долговечности подшипников качения, применяемых в механических системах, на годы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Брагин В.В., Безъязычный В.Ф.** Современное управление организацией. «Справочник. Инженерный журнал», Приложение № 7(256), 2018. 12 с.
2. **Марков А.А., Шпагин Д.А.** Ультразвуковая дефектоскопия рельсов, Изд. 2-е, исправл. и доп. СПб.: Образование — Культура, 2013, 283с.
3. **Shajer, Gary S.** 2013. Practical Residual Stress Measurement Methods. Wiley. ISBN 978-1-118-34237-4.
4. **Трофимов В.В., Башкарев А.Я., Краус Иво.** Неразрушающий метод рентгеновской тензометрии для контроля напряжений в поверхностных слоях деталей и изделий./ Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Чешский университет (г. Прага). Опубликовано на сайте механико-машиностроительного факультета СпГПУ: www.mmf.spbstu.ru/konf 2011/38.pdf.
5. **Быченок В.А.** Лазерно-ультразвуковая диагностика остаточных напряжений в тонкостенных элементах изделий ракетно-космической техники // изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, No7.
6. **Малыхин Д.Г.** Определение плотности дислокаций по рентгеновскому анализу микроискажений в поликристаллических материалах / Д.Г. Малыхин, В.В.
7. **Самойлова Е.М.** Интеллектуализация мониторинга технологического процесса производства подшипников / Самойлова Е.М., Игнатьев А.А. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013. № 4. – С. 50-52.
8. **Самойлова Е.М.** Экспертные системы поддержки принятия решений при диагностировании технологического оборудования / Е.М. Самойлова, М.В. Виноградов // PROSPECTS OF WORLD SCIENCE - 2015. Materials of the XI Interna-tional scientific and practical conference. Sheffield. 2015. Vol.10, Technical sciences. – P.80-82.
9. **Биргер И.А.** Остаточные напряжения, М., 1963 г.
10. AES20-1996 (s2008): AES recommended practice for professional audio - Subjective evaluation of loudspeakers.
11. **Бигус Г.А., Даниев Ю.Ф., Быстрова Н.А., Галкин Д.И.** Диагностика технических устройств. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014 – 615, [1] с. : ил.
12. **Serway Raymond A.; Jewett John W.** 2003 Physics for Scientists and Engineers. Brooks/Cole. ISBN 0-534-40842-7.
13. **Нестеров П.Н.** Параметрический резонанс в гармоническом осцилляторе с переменной частотой собственных колебаний / Модел. и анализ информ. систем, 20:3 (2013), 5–28.
14. **Гандер В., Гржебичек И.** Решение задач в научных вычислениях с применением Maple и MATLAB. ISBN: 985-6642-06-X. Издательство "Вассамедина" 2005г. 520 стр.

M.Yu. Zaharchenko, A.S. Yakovishin (SSTU named after Gagarin Yu.A., Saratov). **Improving the reliability and durability of parts and components of the device by monitoring and reducing the residual internal stresses.**

Abstract. The method of increasing the durability of rolling bearings by relaxing the internal stresses remaining in the manufacturing process is considered. A mathematical model of the method of instantaneous frequency analysis using the model of uncorrelated "white noise" and the process of removing residual stresses, allowing to identify patterns of the process is developed.

УДК 621.767

М.А. ТИТ, А.Н. БОЧАРОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург),

А.К. МАЗЕЕВА, П.А. КУЗНЕЦОВ
(НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург).

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ УЗЛОВ ГИРОПРИБОРОВ

Рассмотрена технология формообразования порошка сплава 80НХС селективным лазерным сплавлением. Показана зависимость магнитных характеристик полученных образцов от параметров термической обработки. Установлена корреляция пористости образцов и режимов процесса лазерного сплавления. Проанализирована возможность выращивания деталей из алюминиевых сплавов.

Введение. Развитие технологий в современном мире направлено на автоматизацию и совершенствование процессов всего технологического цикла. Также отмечается тенденция к использованию геометрически сложных изделий, обеспечивающих улучшение ряда характеристик. Изготовление таких изделий традиционными методами представляет собой технологически сложную задачу, зачастую связанную с большим количеством операций, выполняемых ручным способом. В связи с этим, увеличивается интерес к аддитивным технологиям, позволяющим автоматизировать процесс изготовления геометрически сложных изделий, выполнение которых затруднительно или невозможно традиционным образом.

На сегодняшний день в гироприборостроении широко развито использование аддитивных технологий для создания прототипов и моделей, однако наибольший интерес представляют технологии изготовления, позволяющие получить готовую единицу конструкции или даже готовое изделие. Таким образом, в рамках исследований целесообразно обратить внимание на технологии, обеспечивающие формирование изделий из металла. По типу построения детали и по ключевой технологии [1] наиболее предпочтительным методом является селективное лазерное сплавление [2]. Указанная технология обеспечивает сравнительно высокую точность и невысокую шероховатость получаемых изделий. Процесс формирования изделия предполагает послойное сплавление порошка лазерным лучом по траектории, обусловленной геометрией изделия.

Целью работы являлась оценка возможности применения аддитивных технологий для изготовления узлов гироскопических приборов.

Исследование возможности формирования аддитивными методами деталей из магнитно-мягких и алюминиевых сплавов. Номенклатура порошковых металлических материалов на данном этапе узко специализирована и включает в основном нержавеющие стали, титан, алюминиевые сплавы, в том время как магнитным сплавам (в особенности магнитно-мягким сплавам), часто используемым в гироприборостроении в качестве экранов, имеющих при этом сложную геометрическую форму, уделяется недостаточно внимания. В частности, для производства магнитных экранов сложной формы АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» использует сплав 80НХС. Однако стоит отметить, что формообразование изделия методом селективного лазерного плавления может не обеспечить требуемых магнитных характеристик в силу искаженной макроструктуры, формируемой за счет сплавления частиц металла. Таким образом, в рамках исследований необходимо предварительно изготовить тестовые образцы из материала 80НХС и осуществить подбор оптимальных режимов термообработки, обеспечивающей требуемые значения магнитной проницаемости.

Для реализации поставленной задачи производилось изготовление порошка из сплава 80НХС. После изготовления осуществлялось выращивание колец-имитаторов высотой 10 мм и с внешним и внутренним диаметром 22 мм и 16 мм, соответственно. Образцы выращивались на установке EOSINT M270 в среде азота. Было отмечено, что величина магнитной проницаемости всех выращенных образцов не превышает 1770 Гс/Э. Незначительное увеличение магнитных свойств предполагается за счет подбора режима формирования детали (в частности мощ-

ности лазерного излучения). Повышение магнитных свойств возможно за счет термообработки [3], приводящей к релаксации внутренних напряжений и укрупнению кристаллитов. Были проведены исследования по термообработке образцов, в рамках которых предполагалось использовать не только режим, предлагаемый ГОСТ 10160-75, но и режимы с повышенной температурой и временем выдержки. Результаты для одного из образцов представлены в таблице 1.

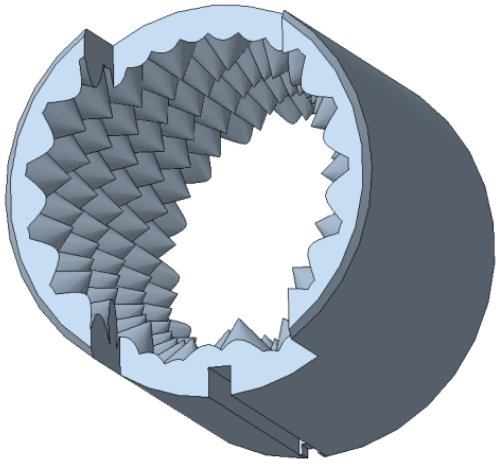
Таблица 1

Влияние термообработки на магнитные свойства образцов

Температура, Т, ºС	Время выдержки, τ, ч	Максимальная магнитная проницаемость μ_{max}, Гс/Э	Коэрцитивная сила Нс, А/м
20	0	1700	45
1125	3	13900	11
1125	6	13800	11
1200	3	20950	6
1200	6	26300	4,8
1200	9	27100	4,4
1250	3	30200	3,7

Из таблицы 1 видно, что увеличение температуры и времени выдержки способствует повышению магнитных свойств, которые, однако, уступает значениям из ГОСТ по виду продукции – прутки Ø8-100 мм, где величина максимальной магнитной проницаемости составляет 70000 Гс/Э [4]. При этом следует отметить, что не для всех магнитных экранов предъявляются требования на соответствие магнитных свойств согласно ГОСТ 10160-75. Так, например, в номенклатуре производства АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» существуют экраны, где требования по величине максимальной магнитной проницаемости составляют 14000 Гс/Э. Учитывая данное требование, можно утверждать, что технология селективного лазерного сплавления с последующей термообработкой подходит по критерию магнитной проницаемости для изготовления такого типа экранов.

С целью выявления пористости образов была проведена металлография вдоль и перпендикулярно росту детали. Было показано, что, варьируя параметрами процесса селективного лазерного спекания, можно добиться наименьшей пористости образцов.



Деталь, изготавливаемая селективным лазерным сплавлением

В рамках работы также анализировалась возможность изготовления аддитивными методами деталей из алюминиевых сплавов. При этом, актуальным являлся вопрос о возможности выращивания изделий на отечественных установках с использованием порошков отечественного производителя. Установлено сотрудничество с компанией ООО «Эксклюзивные решения», располагающей возможностью формирования изделия из порошка алюминиевого сплава AlSi10Mg. Конструкция выбранной для исследования детали представлена на рисунке. Как видно из рисунка, деталь имеет геометрически сложную форму внутренней поверхности, получение которой традиционными методами невозможно.

Заключение. В рамках исследований проанализирована возможность формообразования деталей сложной конфигурации, выполненных из магнитно-мягких и алюминиевых сплавов. Выявлена принципиальная возможность восстановления магнитных свойств образцов, выполненных из порошка сплава 80НХС. Установлено, что пористость исследуемых образцов также зависит от параметров процесса сплавления, что было подтверждено результатами металлографии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М.** Аддитивные технологии в машиностроении. М.: ГНЦ ФГУП «НАМИ», 2015.
2. **Кузнецов П.А.** Как закаляется аддитивная сталь. Возможности и перспективы селективного лазерного сплавления. // ЦНИИ КМ «Прометей», 2018 г.
3. **Касаткин Г.С., Федотов В.В.** Исследование свойств магнитных материалов. / М.: ММИТ, 2008 г.
4. **ГОСТ 10160-75.** Сплавы прецизионные магнитно-мягкие. Технические условия. М.: ИПК Издательство стандартов, 2004.

M.A. Tit, A.N. Bocharov (Concern CSRI Elektropribor JSC, Saint-Petersburg), **A.K. Mazeeva, P.A. Kuznetsov** (NRC "Kurchatov Institute" - CRISM "Prometey"). **The prospect of using additive manufacturing for gyro device units producing.**

Abstract. The additive technology of formation samples from a magnetic alloy is considered. The correlation between magnetic characteristics and parameters of thermo processing is found. Porosity of samples and dependence it on modes of laser treatment are studied.

УДК 629.7.036:621.373

А.М. БИБИК
(Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого)

С.Н. БЕЛЯЕВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НИТРИДА ТИТАНА НА УЗЛАХ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

В докладе рассмотрены особенности формирования функциональных покрытий нитрида титана на узлах гироскопических приборов при использовании различных методов напыления. Изучены характеристики покрытий, такие как микротвердость, фазовый состав, сопротивление износу и трению, Проанализированы основные параметры процесса, такие как парциальное давление азота, и их влияние на характеристики покрытий.

Введение. В узлах существующих и перспективных конструкций гироскопических приборов используются тонкопленочные износостойкие покрытия нитрида титана, обеспечивающие функционирование изделия. Это сферические роторы шаровых гироскопов и опоры и фланцы газодинамического подшипника [1] двухстепенного поплавкового гироскопа.

В этих узлах формирование покрытий нитрида титана осуществляется методами магнетронного напыления и конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ), которые, вследствие различий в механизмах формирования, обусловливает возможную разницу в характеристиках и свойствах образующихся слоев [2, 3, 4, 5].

Целью работы являлось исследование свойств покрытия нитрида титана, напыленных с помощью различных методов на узлы гироскопических приборов.

Для достижения цели было необходимо решение следующих задач:

- нанесение покрытий различными методами на имитаторы узлов гироприборов;
- исследование микротвердости покрытий с помощью металлографических испытаний;
- проведение испытаний имитаторов на сопротивление покрытия износу и трению;
- определение фазового состава покрытия с помощью рентгенофазового анализа.

Исследование свойств износостойких покрытий нитрида титана на узлах гироприборов. В ходе работы исследовались свойства покрытия нитрида титана на образцах-имитаторах из сплава 40ХНЮ-ВИ, являющимся материалом деталей газодинамического подшипника поплавкового гироскопа. Методы нанесения покрытий: магнетронное напыление (образец М) и метод конденсации с ионной бомбардировкой (образец К).

При металлографических испытаниях на микротвердость двух образцов по методу Виккерса при нагрузке 0,2 кгс в течение 10 с были получены следующие значения: для образца М микротвердость $HV_{0,2/10}$ = 987, для образца К $HV_{0,2/10}$ =1119, из чего следует, что покрытие, нанесенное методом КИБ, имеет микротвердость примерно на 10% выше, чем покрытие, нанесенное методом магнетронного напыления.

Установлено, что при формировании покрытий диапазон парциальных давлений азота, в пределах которого обеспечивается стабильная микротвердость нитрида титана (в пределах 19 - 20 ГПа), достаточно широк и составляет P = (0,01–0,58) Па. При этом вероятность влияния на этот параметр возможных отклонений от режима напыления незначительна.

Были проведены испытания образцов на сопротивление трению и износу методом вращения шара из стали марки ШХ-15 диаметром 2 мм относительно образцов с покрытием при нагрузке 18 кгс и при вращении с угловой частотой 200 об/мин в течение 600 с. Полученные результаты измерения момента трения верчения для образцов М и К приведены на рис. 1. Установлено, что наименьшее значение момента трения верчения и минимальный разброс его значений наблюдается у покрытия, полученного методом КИБ (0,0135 Нм), тогда как у покрытия, полученного методом магнетронного напыления – порядка 0,0140 Нм.

Результаты испытаний образцов М и К на износ представлены на рис.2. Как видно из рис. 2, средний диаметр лунки износа покрытия образца К составил 1,45 мм, что меньше, чем у об-

разца М (1,75 мм); это показывает, что покрытие, нанесенное методом КИБ, обладает меньшим износом, чем нанесенное методом магнетронного напыления.

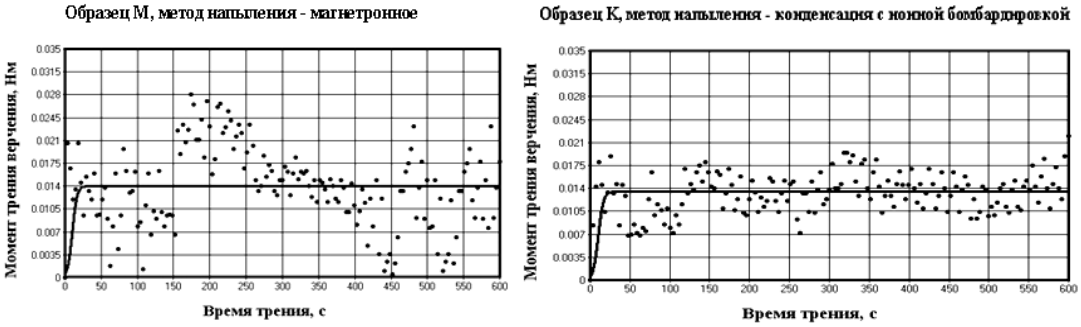


Рис. 1. Зависимость момента трения верчения от времени для образцов с покрытием нитрида титана, полученного различными методами напыления.

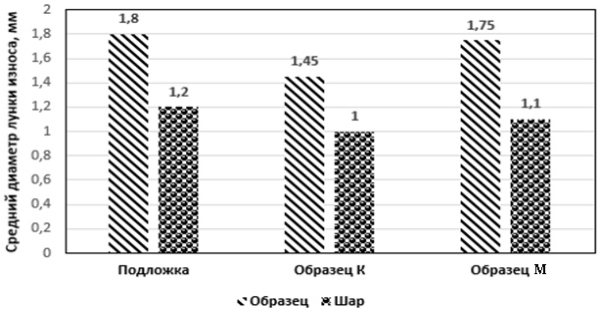


Рис. 2. Износ покрытия на образцах, напыленных различными методами

Рентгенофазовый анализ выявил, что при использовании метода КИБ в составе покрытия преобладает нитрид титана, имеющий стехиометрический состав формулы $TiN_{0,9}$, а в случае магнетронного метода – формулы *TiN*. Результаты рентгенофазового анализа для образцов К и М приведены в таблице 1.

Таблица 1

Рентгенофазовый анализ образцов с покрытием нитрида титана, выполненного различными методами

Образец	К (метод КИБ)				М (метод магнетронного напыления)					
Название фазы	*Fe*	*FeTi*	$TiN_{0,9}$	*TiN*	*Fe*	*FeTi*	*TiN*	Ti_2N	Fe_2Ti	*Ti*
Количество фазы в образце, %	9,3	5,4	80,3	5,0	2,4	2,2	71,7	23,0	0,3	0,3

В работе обоснована важность учета стехиометрии покрытия, поскольку имеет место явно выраженная зависимость термического коэффициента линейного расширения от содержания азота в соединении нитрида титана, что влияет на согласованность свойств покрытия и основы узла по этому показателю и определяет надежность конструкции. При этом термический коэффициент линейного расширения у нитрида титана формулы *TiN* имеет большее значение ($\sim 9 \cdot 10^{-6}$ 1/°С), чем у нитрида титана формулы $TiN_{0,9}$ ($\sim 5 \cdot 10^{-6}$ 1/°С), и более близкое к значениям ТКЛР 40ХНЮ-ВИ ($\sim 11{,}5 \cdot 10^{-6}$ 1/°С), что определяет предпочтительность использования метода магнетронного напыления для изготовлении опор и фланцев газодинамических подшипников поплавкового гироскопа.

Заключение. На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что выявленная с помощью рентгенофазового анализа фаза $TiN_{0,9}$, которая образуется при напылении покрытия методом КИБ, обладает чуть большей микротвердостью, имеет меньший износ покрытия и минимальный разброс значения момента трения верчения, чем фаза *TiN*, образуемая при напылении покрытия магнетронным методом. При этом при выборе метода напыления необходимо учитывать зависимость термического коэффициента линейного расширения мате-

риала покрытия от стехиометрического состава, что также является важным критерием оценки качества покрытия. Результаты испытаний показывают достаточно высокую надежность узлов, на которых покрытие нитрида титана сформировано как магнетронным напылением, так и методом КИБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сипенков И.Е., Филиппов А.Ю., Болдырев Ю.Я., Григорьев Б.С., Заблоцкий Н.Д., Лучин Г.А., Панич Т.В.** Прецизионные газовые подшипники / / Под ред. Филиппова А.Ю. и Сипенкова И.Е. СПб. ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2007. 504 с.
2. **Беляев С.Н., Щербак А.Г.** Средства оснащения процессов напыления покрытий на узлы гироприборов, имеющие форму тел вращения. «Навигация и управление движением», Материалы X конференции молодых учёных, ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008.
3. **Ройх И.Л., Колтунова Л.Н., Федосов С.Н.** Нанесение защитных покрытий в вакууме. М.: «Машиностроение», 1976, 368 с.
4. **Беляев С.Н.** Технологические особенности выбора материалов и методов напыления узлов гироприборов. СПб.: Изв. вузов. «Приборостроение», т.52, №3, 2009, с.73.
5. **Циркин А.В.** Износостойкие покрытия: свойства, структура, технологии получения: методические указания к лабораторным работам. Ульяновск: УлГТУ, 2005, 27 с.

A.M. Bibik (Peter the Great St-Petersburg Polytechnic University, St-Petersburg), **S.N. Belyaev** (Concern CSRI “Elektropribor” JSC, St-Petersburg). **Research of titanium nitride wear-resistant coatings on the units of gyroscopic devices**

Abstract. This paper considered the features of titanium nitride functional coatings formation on the units of gyroscopic devices using various methods of sputtering. There were researched the characteristics of coatings, such as microhardness, phase composition, resistance to wear and friction and analyzes the main parameters of the process, such as nitrogen partial pressure, and their effect on the characteristics of coatings.

УДК 620.172.2

К.С. МАЛАШЕНКОВ, Д.П. ЕЛИСЕЕВ
(Университет ИТМО, ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМ СПОСОБОМ

Приведены результаты испытаний на растяжение металлических изделий, изготовленных классическим и аддитивным способом. Полученные результаты позволили сравнить такие механические свойства использованных материалов, как предел пропорциональности, модуль упругости, предел текучести.

Введение. Аддитивные технологии – это способ изготовление объекта с использованием его цифровой модели методом послойного добавления материала. Материал (пластик, гипс, воск, металл) подается слой за слоем, при этом каждый слой фиксируется и твердеет, представляя собой сечение CAD-модели [1]. Для производства деталей из металлов на данный момент доступно около 20 сплавов и их количество постоянно увеличивается. Стоит отметить, что в аддитивных технологиях используются не только стандартные сплавы, но и уникальные высокотехнологические материалы для решения специфических задач. Металлические детали, изготовленные аддитивным способом, находят применение в автомобильной, нефтегазовой, аэрокосмической, пищевой промышленности, электронике, машиностроении, медицине [2].

На сегодняшний день представляется актуальной задача расширения области применения упомянутых деталей до навигационной техники. Это позволит: во-первых, быстро изготавливать детали самой сложной формы, к которым не предъявляются высокие требования к точности формы и расположению поверхностей (количество таких деталей в одном гироскопическом приборе может достигать нескольких десятков); во-вторых, уменьшить массогабаритные характеристики изготавливаемых приборов (что особенно актуально в условиях увеличения требований к их миниатюризации [3]); в-третьих, разрабатывать механические фильтры [4] оптимальной геометрической формы для уменьшения влияния внешних воздействующих факторов (температуры, вибраций, ударов, магнитных полей).

Одно из основных препятствий на пути внедрения аддитивных технологий в процесс производства металлических деталей навигационной техники – это недостаточная информация о механических свойствах используемых материалов (предела пропорциональности; модуля упругости; предела текучести и др.). Эти свойства, как правило, приводятся в рекламных брошюрах производителей материалов и установок.

Целью работы являлось проведение испытаний металлических деталей, распечатанных на 3D-принтере, с определением их механических свойств и сравнением этих свойств со свойствами деталей, изготовленных методами механической обработки.

Испытания металлических изделий, полученных аддитивным способом. Для изучения механических свойств деталей использовались детали из алюминия и стали. Определение свойств металла производилось согласно методике, описанной в литературных данных [5]. Приведенный стандарт устанавливает методы статических испытаний на растяжение черных и цветных металлов и изделий из них номинальным диаметром или наименьшим размером в поперечном сечении 3,0 мм и более для определения при температуре (20^{+15}_{-10}) °С характеристик механических свойств: предела пропорциональности, модуля упругости, предела текучести физического, предела текучести условного и временного сопротивления. Испытания производились с использованием универсальной испытательной машины LFM 400 [6]. Непосредственно, перед испытанием разработана CAD-модель детали в соответствии с литературными данными [5]. После того как CAD-модель была разработана, по ней были изготовлены два типа деталей: полученных с помощью 3d-печати и по классической методике.

При проведении испытаний в первую очередь устанавливают необходимые зажимы для крепления образца. Затем назначают нагрузку и устанавливают режим универсальной испытательной машины на эту нагрузку. Нижнюю головку регулируют для закрепления образца. Образец вставляют в зажим головок машины, при этом нулевую точку фиксируют в программном

обеспечении испытательной машины. Затем машина настраивается на необходимую скорость испытания. Производится растяжение образца. Диаграмма растяжения (рис. 1), то есть зависимость удлинения образца Δl от прилагаемой нагрузки P, фиксируется в текстовом документе. Результаты испытаний обрабатываются согласно литературным данным [5], выдержка из протокола испытаний в сравнении с табличными значениями [7] для соответствующих материалов представлена в таблице 1.

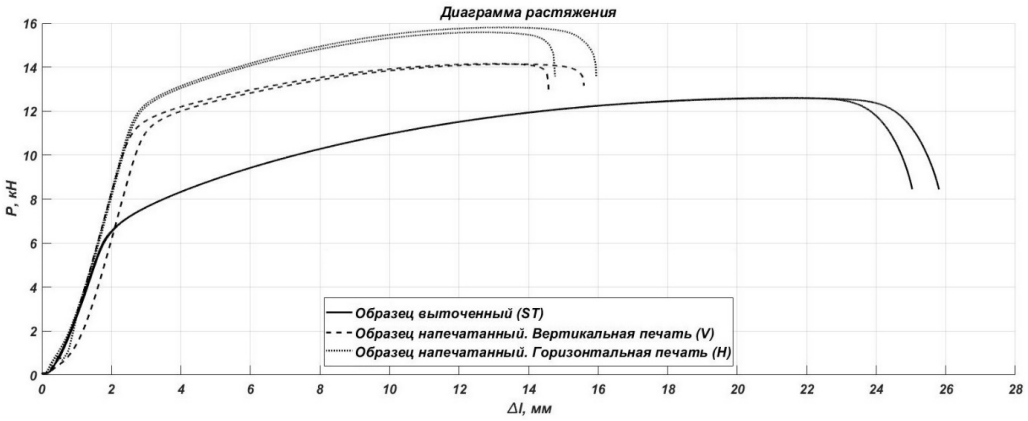


Рис. 1. Диаграммы растяжения образцов

Таблица 1

Результаты испытаний

Марка материала	Маркировка	Усилия, кН		Пределы, МПа			Модуль упругости, ГПа
		Разрыва	Пропорц.	Прочности	Текучести	Пропорц.	
12Х18Н9Т (классич. технологии)	Табл. знач.	–	–	≥510	280-400	≥216	195
	1ST	12,6	5,4	646,5	333,2	277,7	211,5
	2ST	12,6	5,6	655,2	352,3	293,6	223,2
07Х18Н12М2 (аддитивные технологии)	Табл. знач.	–	–	≥520	≥260	≥220	200
	1V	14,1	10	711,8	603	502,5	181,1
	2V	14,2	10	724,2	612,6	510,5	182,7
	1H	15,8	11,1	795,6	616,7	560,6	176,3
	2H	15,6	10,2	745,5	586,6	533,3	176,2

По полученным результатам можно сделать следующие выводы.

1) Испытания имеют высокую повторяемость результатов, а разброс значений для деталей, изготовленных по одной технологии, не превосходит 6,5%.

2) Полученные значения механических свойств деталей из стали 12Х18Н9Т выше табличных значений на 22-25%. На практике они могут быть еще выше и зависят от действительного соотношения примесей в сплаве.

3) Значения механических свойств деталей из стали 07Х18Н12М2 существенно выше (до 60%), и больше соответствует значениям для деталей из стали 40ХН2Л. Таким образом, при использовании аддитивных технологий низколегированная сталь имеет прочностные характеристики легированной стали, при этом отсутствует необходимость ее закалки.

4) Образцы, изготовленные аддитивным способом, являются более хрупкими и менее пластичными по сравнению с образцами, изготовленными классическим способом. Тем не менее, при усилии, приводящем к разрыву последних, первые находятся в области пластических деформаций.

Заключение. Проведены испытания на растяжение деталей, изготовленных по классическим и аддитивным технологиям. Результаты показали, что детали, полученные 3d печатью, практически не уступают по своим прочностным свойствам выточенным деталям, а в некоторых случаях даже превосходят. Направлениями дальнейших исследований являются: анализ пористости, твердости, шероховатости деталей, полученных аддитивными технологиями; анализ обрабатываемости и возможности получения базовых элементов на деталях; исследование вибрационной и ударной прочности деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н.** Аддитивные технологии – технологии XXI века. Учебное пособие. Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет, 2012. 3 с.
2. **Меренков К.** 5 особенностей металлических порошков для 3D-печати [Электронный ресурс]. – Введ. 2018-01-23. – Режим доступа: http://blog.iqb-tech.ru/metals-for-3d-printing. – (Дата обращения: 23.04.2019).
3. **Пешехонов В. Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. №. 1. С. 3-16.
4. **Yakimova A. et al.** Methods to increase the resistance of an inertial measurement unit to external mechanical and thermal actions //2017 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). – IEEE, 2017. С. 1-3.
5. **ГОСТ 1497-84.** Металлы. Методы испытаний на растяжение.
6. **ГОСТ 28840-90.** Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования.
7. **Сорокин В.Г. и др.** Марочник сталей и сплавов. 1989.

K.S. Malashenkov, D.P. Eliseev (ITMO University, Concern CSRI Elektropribor, JSC, St-Petersburg). **The results of tensile testing of metal parts produced by additive manufacturing.**

Abstract. The results of the test of metal products were obtained by the classical method and the additive method. The obtained results allowed us to compare such mechanical properties of the materials like proportionality limit, elastic modulus and yield strength.

УДК 629.5.058.45

А.С. ВОРОНОВ, Г.Е. КОНДРАШКИН
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДАТЧИКАХ ИНДУКЦИОННЫХ ЛАГОВ

Рассмотрены преимущества применения композиционных материалов в приборах навигации. Построена конечно-элементная модель датчика индукционного лага. Определены напряжения и деформации, возникающие в конструкции датчика. Описаны наиболее предпочтительные материалы, обеспечивающие требуемую прочность.

Введение. С каждым годом происходит расширение применения композиционных материалов (КМ) в различных областях, в частности в судостроении. КМ могут применяться для аварийно-спасательного буя, антенн радиопеленгатора, гирокомпасов, также в приборах навигации [1–3]. При глубоководном плавании забортные приборы подвержены внешнему гидростатическому давлению, которое может достигать значительных величин. Современный уровень технического развития позволяет совершать погружения на глубины океана до 6 км [4]. В этом случае на забортные приборы воздействует давление порядка 600 атм. (60 МПа), что обуславливает необходимость применения конструкции повышенной прочности [5]. К таким приборам относится датчик индукционного лага, предназначенный для измерения скорости движения судна с целью последующей выработки текущих координат места [5]. Исходя из принципа действия датчика, одним из обязательных элементов конструкции является изоляционный заливочный КМ (компаунд), служащий для герметизации электроники [6]. Целью работы являлся анализ влияния свойств КМ на прочностные характеристики датчика и определение возможности применения различных КМ в качестве заливочного изоляционного материала датчика для увеличения его прочности.

Применение композиционных материалов в датчиках индукционных лагов. В программной среде ANSYS смоделировано гидростатическое воздействие на конструкцию датчика. В процессе моделирования рассмотрены следующие КМ:

- органопластик;
- полиамид;
- сферопластик;
- синтактик;
- стеклопластик;
- углепластик (карбон).

Данные КМ обладают рядом преимуществ, не присущих традиционным конструкционным материалам, применяемым в морской деятельности. Повышенная прочность, возможность работы в агрессивных средах без коррозии, сохранение стабильности размеров, уменьшенная масса, малая плотность – это малый список преимуществ приведенных КМ. Все перечисленные КМ применяются в судостроении в качестве замены классических материалов (металлов и его сплавов) в различных приборах, в том числе навигационных.

КМ датчика индукционного лага выбирался на основе анализа предела прочности при растяжении и сжатии материалов [7 – 11], а также возможности заливки в корпус. Для наглядного представления данных, по результатам моделирования получена сравнительная характеристика максимальных напряжений и предела прочности в датчике в зависимости от выбранного КМ (см. рисунок).

На диаграмме (см. рисунок) отчетливо видны некоторые КМ, применение которых возможно для повышения прочности конструкции датчика при погружении на глубины до 6000 м. Это такие КМ как, органопластик, стеклопластик, углепластик, обладающие повышенным значением предела прочности материала. Данные КМ удовлетворяют повышенным требованиям за-

Научный руководитель д.т.н., проф. Евстифеев М.И.

бортных устройств и способны выдерживать более высокие механические напряжения. Перечисленные КМ могут быть рекомендованы к применению в качестве заливочного материала в датчике индукционного лага. Применение полиамида, сферопластика, синтактика крайне не рекомендуется в датчике, поскольку в КМ возникает максимальные напряжения, превышающее предел прочности материала. При погружении в ультра глубокие воды произойдет разрушение датчика и его полной выход из строя.

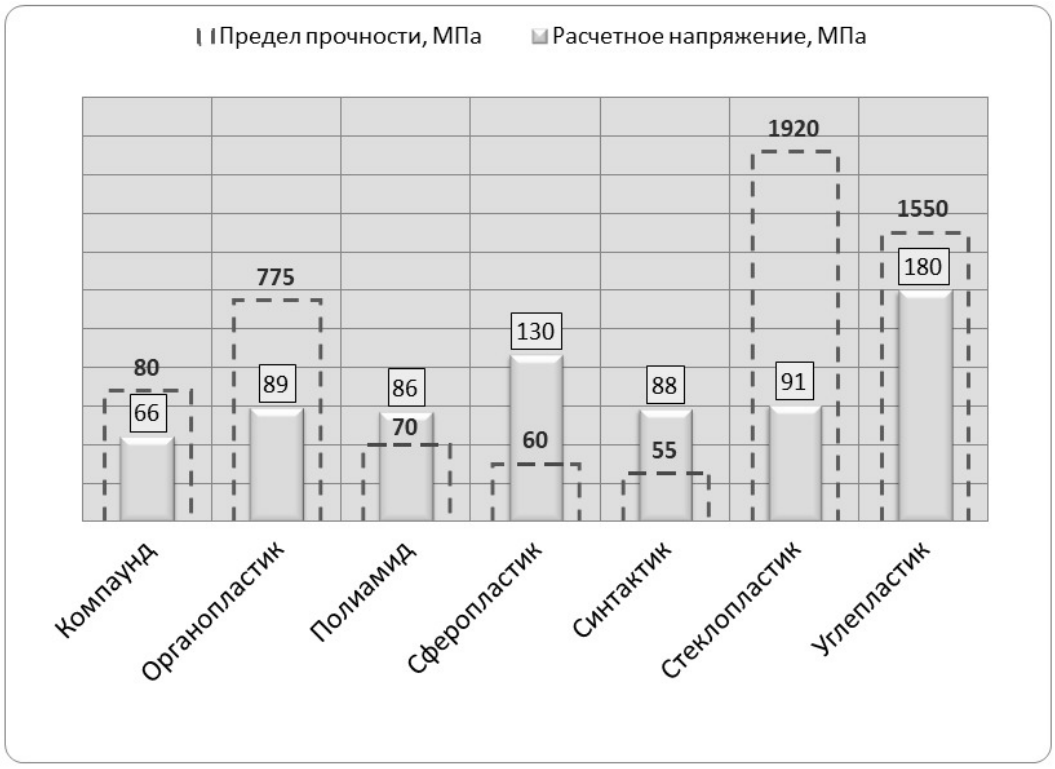


Диаграмма сравнения расчетных напряжений и предела прочности композиционных материалов

Заключение. Построена расчетная имитационная модель датчика индукционного лага. Проведено компьютерное моделирование, получены максимальные напряжения и деформации в конструкции прибора в зависимости от выбранного материала. Приведены композиционные материалы, при которых обеспечивается прочность конструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Юльметова О.С., Щербак А.Г., Челпанов И.Б.** Специальные технологии изготовления прецизионных узлов и элементов гироскопических приборов. СПб: Университет ИТМО, 2017. 131 с.
2. **Воронов А.С., Кондрашкин Г.Е.** Перспективы применения композиционных материалов в приборах навигации. Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО, 2018. Т. 1. С. 138–141.
3. **Никитин В.С., Половинкин В.Н.** Применение композитных материалов в зарубежном подводном кораблестроении. [Электронный ресурс].
    a. URL: http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7479
4. **Кувшинов Г.Е., Наумов Л.А., Чупина К.В.** Системы управления глубиной погружения буксируемых объектов: монография. Владивосток: Дальнаука, 2005. 285 с.
5. **Буканова А.Н., Воронов А. С., Евстифеев М.И.** Оптимизация конструктивных параметров глубоководного индукционного датчика скорости. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2018, Т. 18. № 1. С. 140–146.
6. **Аванесов Ю.Л., Воронов А.С., Евстифеев М.И.** Компьютерное моделирование прочностных характеристик датчика индукционного лага. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, 2016. Т. 16. № 4. С. 738–744.
7. **Рогов В.А., Шкарупа М.И., Велис А.К.** Классификация композиционных материалов и их роль в современном машиностроении. Вестник РУДН, серия Инженерные исследования, 2012, № 2. С. 41–49.
8. **Николаев Г. И., Бахарева В. Е., Власов В. А., Лобынцева И. В., Анисимов А. В., Петрова Л. В., Симина В. Н.** Применение антифрикционных углепластиков в подшипниках скольжения. Антифрикционные углепластики. Научно-технический журнал «Вопросы материаловедения». № 2 (46), 2006. С. 7–21.

9. **Молчанов Б.И., Гудимов М.М.** Свойства углепластиков и области их применения. Всероссийский институт авиационных материалов, 1996. С. 1–10.
10. **Бобович Б.Б.** Армированные пластики (часть 1): структура и свойства. [Электронный ресурс]. URL: https://plastinfo.ru/information/articles/301
11. **Зеленский Э.С., Куперман А.М., Горбаткина Ю.А., Иванова-Мумжиева В.Г., Берлин А.А.** Армированные пластики – современные конструкционные материалы. Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева), 2001. Т. XLV. №2. С. 56–74.

A.S. Voronov, G.E. Kondrashkin (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, St-Petersburg). **The possibility of using composite materials in electromagnetic log sensor.**

Abstract. The advantages of using composite materials in navigation devices are reviewed. The finite element model of the electromagnetic log sensor is simulated. Stresses and strains arising in the sensor design are defined. The most preferred materials providing the required design strength of the sensor are shown.

УДК 535.8

Е.Г. ЛИТУНЕНКО, А.В. СТАРЦЕВА, Б.Л. ШАРЫГИН
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕРНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В СОСТАВЕ СПЛАВА РОТОРА ДПГ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Доклад посвящен изучению состава магнитотвердого сплава, из которого изготавливаются роторы двухстепенных поплавковых гироскопов методами растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Получены электронные изображения включений материалов на поверхности роторов и исследован их химический состав. Проведен корреляционный анализ зависимости брака при производстве двухстепенного поплавкового гироскопа от количества примесей в составе сплава ротора.

Введение. Двухстепенные поплавковые гироскопы (ДПГ) – серийное изделие, которое входит в состав более двухсот инерциальных навигационных систем, находящихся в эксплуатации [1]. Одним из основных конструктивных элементов ДПГ является ротор, надежность которого влияет на характеристики всей системы. Актуальность настоящей работы заключается в повышении надежности работы этих изделий за счет повышения качества роторов.

Ротор ДПГ изготавливается из сплава типа АЛНИ, магнитные и механические характеристики которого чувствительны к химическому составу [2, 3]. Ранние исследования [4] показали, что состав сплава отличается от заявленного и содержит в себе нежелательные примеси таких материалов, как кобальт, кремний, медь, титан, марганец и сера. Настоящий доклад посвящен исследованию серных включений в составе сплава роторов ДПГ методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа (РСМА) и изучению их влияния на выход годных приборов с помощью корреляционного анализа.

Контроль качества изготовления роторов с помощью методов растровой электронной микроскопии и рентгеноспектрального микроанализа. Объектами исследования стали образцы роторов ДПГ, взятые из вышедших из строя приборов, и роторы, не прошедшие контроль качества. Цель работы заключалась в определении химического состава сплава ротора на его соответствие техническим требованиям, поиске включений материалов и проведении их визуальной оценки, а также оценки корреляции между количеством примесей в сплаве и количеством проблем при изготовлении партии роторов и других узлов прибора ДПГ.

Визуальная оценка поверхности исследуемых роторов с помощью метода РЭМ показала наличие большого количества включений материалов разной формы с размерами от 1х1 мкм до 5х5 мкм. Рентгеноспектральный микроанализ выявил, что обнаруженные включения преимущественно можно разделить на две группы:

- сульфиды титана, ванадия и хрома;
- сульфиды алюминия и марганца.

Такие включения представляют собой кристаллы с большим диапазоном молярных масс (83-200 г/моль) и плотностей (2,02 – 4.84 г/см³). Поскольку при каждом включении гироскопа ротор испытывает тепловой удар до 50-60 ºС, а ускорения достигают 4000 g при линейной скорости до 170 м/с, микросульфидные включения могут разрушаться в ходе эксплуатации. Продукты разрушения будут покидать поверхность ротора, что может вызвать заклинивание и смещение центра масс подвижной части, что ведет к сходу прибора и существенной потере точности.

Примеры обнаруженных серных включений показаны на рис. 1.

Наличие серных включений также было подтверждено и в разрезе ротора. Это позволяет сделать вывод о том, что сера попадает в заготовку ротора еще на этапе литья, и ее появление в составе не является следствием механической обработки.

При анализе полученных с помощью метода РСМА результатов был рассчитан коэффициент корреляции количества примесей с различными проблемами, возникающими при изготовлении прибора ДПГ. Рассмотрены такие проблемы, как брак роторов из-за механических повреждений в процессе производства, количество вышедших из строя

приборов, а также количество изготовленных приборов третьего класса по отношению к общему количеству приборов (включая приборы первого и второго класса). В таблице 1 приведены наиболее значимые результаты оценки корреляции.

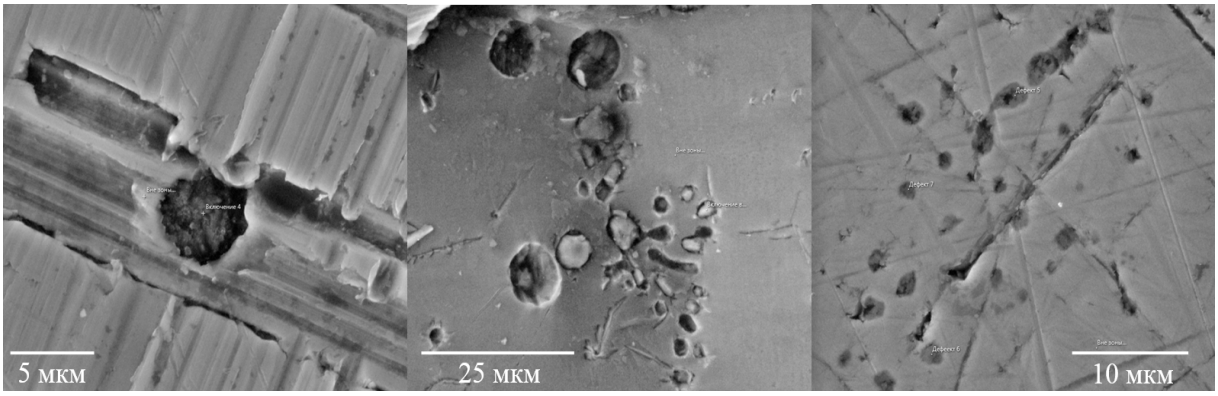


Рис. 1. Электронные изображения примеров серных включений на поверхности роторов ДПГ, полученные методом РСМА

Таблица 1

Коэффициент корреляции между количеством примесей в сплаве и количеством проблем в партии

№	Коэффициент корреляции, % элемента с	Сера S	Хром Cr	Ванадий V
1	Количеством забракованных роторов	0,163	0,358	-0,454
2	Количеством сходов	0,939	0,27	-0,371
3	Количеством проблем	0,539	0,5	-0,519

Оценка коэффициента корреляции проведена согласно шкале Чеддока [5]. Согласно полученным данным можно сделать вывод о том, что количество забракованных роторов (сколы, трещины, раковины) статистически обусловлено недостатком ванадия и повышенным содержанием хрома; количество сходов приборов статистически обусловлено примесями серы и практически не связано с процентом легирующих элементов.

Заключение. В результате исследования роторов методами растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного рентгеноспектрального микроанализа выявлено наличие большого количества серных включений разных форм, состоящих преимущественно из серы, титана, хрома и ванадия, либо из серы, алюминия и марганца. Анализ разреза ротора показал наличие серных включений и в толще материала. По данным, полученным с помощью рентгеноспектрального микроанализа, проведен корреляционный анализ, показавший высокую зависимость количества вышедших из строя приборов от количества серы в составе сплава. По результатам проведенных исследований можно сделать вывод о том, что для устранения серных включений в роторах необходимо проведение работ по следующим направлениям:

- разработка методов уменьшения содержания серы в заготовках на стадии их изготовления;
- введение выборочного входного контроля заготовок роторов;
- дополнительная обработка готовых роторов с целью снижения количества вскрытых серных включений на поверхности роторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **В.Г. Пешехонов.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем. // Гироскопия и навигация 1 (72), "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор", 2011, с. 3–16.
2. **Н.Е. Февралева.** Магнитно-твердые материалы и постоянные магниты. Наукова думка, Киев , 1969 г.

3. **Б.Г. Лившиц, В.С. Львов.** Высококоэрцитивные сплавы на железоникельалюминиевой основе. // ГНТИ литературы по черной и цветной металлургии, Москва, 1960 г.
4. **А.В. Старцева, Б.Л. Шарыгин, Е.Г. Литуненко.** Электронный микроскоп при исследовании проблем в мелкосерийном производстве ДПГ // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», 2018 г.
5. **М. Кендалл, А. Стьюарт**. Статистические выводы и связи. Перевод с англ. под редакцией А.Н.Колмогорова. Наука ГРФМЛ, Москва, 1973 г., том 2.

E.G. Litunenko, A.V. Startseva, B.L. Sharygin (Concern CSRI “Elektropribor” JSC, St-Petersburg). **Research of sulfur inclusions in the composition of the rotor alloy of a two-degree-of-freedom float gyroscope by scanning electron microscopy.**

Abstract. The paper is devoted to the study of the composition of the hard magnetic alloy from which the rotors of two-degree-of-freedom float gyroscopes are made using scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Electronic images of the inclusions of materials on the surface of rotors are obtained and their chemical composition was researched. A correlation analysis of the dependence of spoilage production of a two-degree-of-freedom float gyroscope on the amount of impurities in the composition of the rotor alloy was carried out.

УДК 53.06

А.А. НИКОНОВ, А.Н. ВОЛКОВ
(АО «Лазерные системы», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург)

СЕДИМЕНТАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПОРОШКА, ИСПОЛЬЗУЕМОГО В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Рассмотрен метод седиментационного анализа металлических порошков, применяемых при изготовлении изделий с помощью технологии селективного лазерного сплавления, который позволяет оценить фракционный состав порошков. Предложен метод повышения степени текучести порошков для улучшения их качества.

Введение. В связи с развитием аддитивных технологий задача оценки качества используемых металлических порошков является весьма актуальной. Качество порошка определяется следующим набором параметров: сферичность формы частиц, совпадение реального фракционного состава порошка с заявленным в паспорте, текучесть порошка, отсутствие инородных включений и другие. Седиментационный анализ является широко используемым и достаточно точным в практических целях инструментом для исследования различных металлических и других дисперсных систем с целью определения фракционного состава [1]. Описываемый метод позволяет судить о размерах частиц в довольно широком диапазоне (10^{-7} – 10^{-4} м) [2], в отличие от других методов исследования.

Принцип седиментационного метода основан на измерении скорости оседания мелкодисперсных частиц в вязкой среде. По скорости осаждения можно судить о размерах частиц и процентном содержании интересующей фазы в общей массе порошка.

Целью настоящей работы являлась разработка способа повышения текучести порошка посредством удаления его мелкой фракции с описанием процесса удаления.

Седиментационный анализ и метод отмучивания порошка. Исследуемый порошок получен методом плазменной сфероидизации, что обеспечивает отсутствие пор и требуемое отклонение от сферичности частиц порошка с заявленной фракцией 10-40 мкм. Задача определения фракционного состава порошка, применяемого в аддитивных технологиях крайне важна по ряду причин. В паспорте любого порошка указана фракция его частиц, но в большинстве случаев это не означает, что отсутствуют фракция менее 10 мкм для порошка с заявленной фракцией 10-40 мкм. Экспериментально установлено, что текучесть порошка фракцией 10-40 мкм повышается при выполнении последовательных операций по отсеиванию частиц мелкой фракции, препятствующих свободной текучести. Согласно ГОСТ 20899-98, исследуемый порошок не обладает текучестью, если он, обладая массой 50 грамм, в течение 40 секунд не может просыпаться через калиброванную воронку с отверстием 2,5 мм (прибор Холла) [3].

Частицы сферической формы, опускаемые в сосуд с вязкой жидкостью (глицерин, бензин и др.), начинают оседать на дно под действием гравитации с равномерной скоростью. Скорость оседания частиц U зависит от силы трения скольжения о жидкость, имеющую коэффициент трения *B* и пропорциональна размеру частиц: крупные частицы имеют более высокую скорость оседания, в сравнении с более мелкой фракцией.

Гистограмма фракционного состава исследуемого порошка представлена на рис. 1. Проанализировав ее можно сделать вывод о том, что фракционный состав, указанный в паспорте продукта, соответствует действительности только частично. Около 50% от общей массы взятой пробы порошка занимает фракция 50-100 мкм, также присутствуют частицы от 100 до 200 мкм. Но особое внимание следует обратить на частицы менее 10 мкм. Они присутствуют в небольшом объеме, но крайне негативно влияют на текучесть порошка, т.к. увеличивается количество точек контакта между частицами, повышая силу трения. Фотография порошка под микроскопом (объектив 40-0,60) представлена на рис. 2.

Научный руководитель к.т.н., доцент Евдокимов И.М.

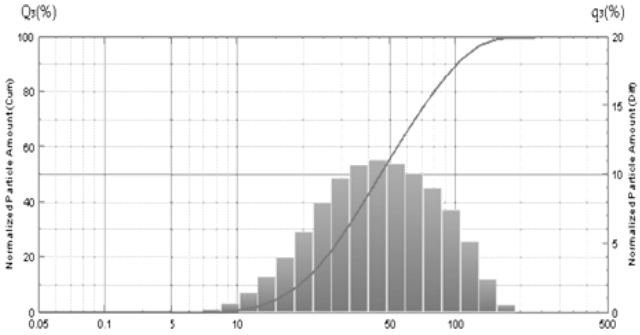


Рис. 1. Гистограмма фракционного состава исследуемого порошка

В качестве среды для седиментационного анализа использовался 10-процентный водный раствор глицерина при температуре 20ºС. Вязкость глицерина при такой температуре составит $\eta_{глиц}$ = 1480 Па·с, что в 1474 раза больше вязкости воды [4]. Общая вязкость смеси при этом составит $\eta_{смеси}$ = 1311 Па·с [5]. Зависимость скорости осаждения от радиуса частиц представлена на рис. 3.

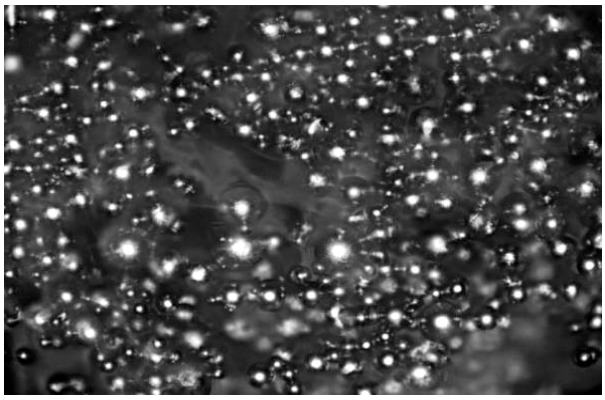


Рис. 2. Фотография исследуемого порошка под увеличением

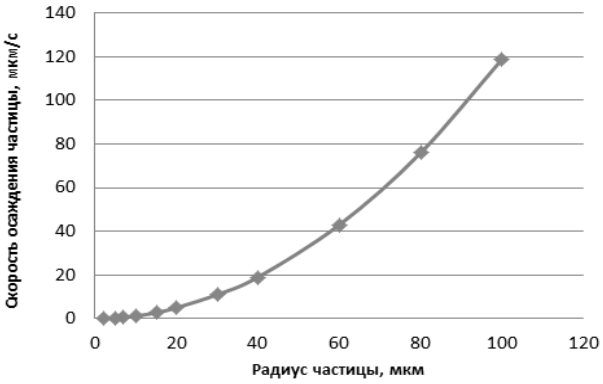


Рис. 3. График зависимости скорости осаждения частиц от их радиуса

Для отделения мелкой фракции используется метод отмучивания порошка, основанный на выделении из суспензии частиц определенных размеров. Для реализации этого метода был взят мерный стакан с раствором глицерина в воде и исследуемым порошком, также добавлено ПАВ для повышения смачиваемости частиц. Согласно графику скорости осаждения, изображенному на рис.3, было рассчитано время, необходимое для осаждения частиц с диаметром более 10 мкм. Процесс осаждения размешанной суспензии длился около получаса до получения абсолютно чистого раствора. Небольшая часть частиц мелкой фракции не смогла преодолеть пленку поверхностного натяжения даже после тщательного размешивания суспензии.

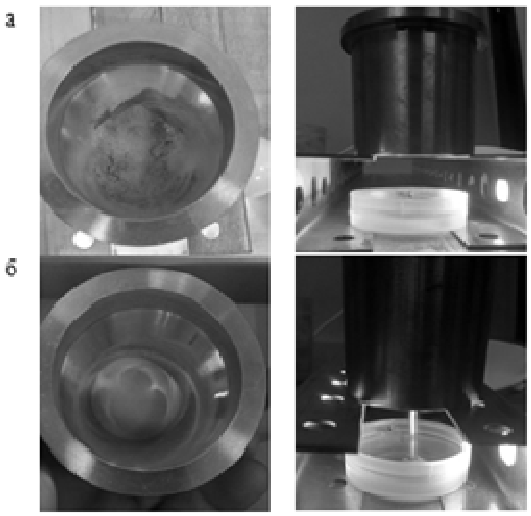


Рис. 4. Процесс протекания порошка через прибор Холла: а) до отмучивания, б) после отмучивания

При повторно проведенном эксперименте жидкость, находящаяся выше рассчитанного уровня, была слита. Эта операция проводилась многократно, и в результате была получена суспензия, не содержащая частиц менее 10 мкм. Пропустив порошок через воронку Холла после процесса отмучивания, можно сделать вывод о том, что исследуемый порошок стал обладать необходимой текучестью. На рис. 4 показан процесс протекания порошка через воронку до седиментации (рис. 4а) и после (рис. 4б).

Заключение. Разработан и испытан способ повышения текучести порошка посредством удаления его мелкой фракции. В результате работ с применением методов седиментации и отмучивания порошка стало возможным отделить мелкую фракцию порошка от общей массы, что значительно повысило текучесть порошка и привело к его полному вытеканию из воронки Холла в течение нескольких секунд.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Н.Л. Великанов, В.А. Наумов, Л.В. Примак.** Осаждение частиц взвесей в воде // Механизация строительства №7 (829), 2013.
2. **Ж.И. Беспалова, И.А. Пятерко, Л.Г. Мирошниченко, Ю.Д. Кудрявцев.** Коллоидная химия. Поверхностные явления и дисперсные системы // Кинетические и оптические свойства дисперсных систем. Методы их исследования: Учеб. пособие. – 3-е изд., перераб. и доп. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2014.— 88 с.
3. **ГОСТ 20899-98** (ИСО 4490-78) Порошки металлические. Определение текучести с помощью калиброванной воронки (прибора Холла) Постановление Госстандарта России от 19.12.2000 N 384-ст. ГОСТ от 19.12.2000 N 20899-98.
4. **Справочник по свойствам веществ и материалов** [Электронный ресурс], – http://thermalinfo.ru (Дата обращения: 19.12.2018 г.)
5. **Краткий справочник физико-химических величин.** Изд. 8. Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой, Л.: Химия, 1983 г. С. 114

A.A. Nikonov, A.N. Volkov (Laser Systems LLC, Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F. Ustinov, St-Petersburg). **Sedimentation analysis of metal powder used in additive technologies**

Abstract. This article describes the method of sedimentation analysis of metal powders used in the manufacture of products using the selective laser fusion technology, which allows us to evaluate the fractional composition of powders. The method for increasing the degree of fluidity of powders was proposed.

УДК 621.373

О.Н. ПОСЛЯНОВА, О.С. ЮЛЬМЕТОВА
(Университет ИТМО, ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург),

А.Г. ЩЕРБАК
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ В ГИРОПРИБОРОСТРОЕНИИ

В докладе исследуется возможность лазерной обработки спеченного поликристаллического алмазного композита с целью изменения шероховатости поверхности и получения контуров требуемой геометрии. Приводятся результаты лазерной полировки образцов поликристаллического алмазного композита и результаты профилирования поверхности образцов.

Введение. В современном гироприборостроении все больше появляется необходимость использования новых конструкционных материалов. Преимущество этих материалов заключается в том, что они обладают высокой твердостью, износостойкостью, прочностью, теплоустойчивостью, повышенной коррозионной стойкостью, а так же способны сохранять эти свойства в условиях длительной работы под нагрузкой [1]. Особо широкое распространение композиционные материалы получили в прецизионных приборах, где предъявляются повышенные физико-механические и физико-химические требования. Характерным примером использования современных конструкционных материалов является двухстепенной поплавковый гироскоп, в котором для взвешивания ротора применяется полусферический газовый подшипник, детали которого выполнены из сплава 40ХНЮ-ВИ [2]. Еще одним ярким примером использования композиционных материалов в гироскопии является гирокамера чувствительного элемента электростатического гироскопа, которая изготавливается из корундовой керамики Al_2O_3, отличающейся высоким удельным электрическим сопротивлением и размерной стабильностью [3]. Объектом настоящих исследований является поликристаллический алмазный композит, из которого изготавливают конструкционные узлы упорных и радиально-упорных подшипников специального назначения. В связи с тем, что композит обладает крайне высокой твердостью и износостойкостью, процесс механической обработки данного материала является довольно проблематичным. Механическая обработка сверхтвердых материалов представляет собой длительной и экономически затратный процесс, так как инструмент быстро изнашивается и требует замены. Кроме того, низкое качество обработанной поверхности требует финишной обработки. Все указанное выше обуславливает необходимость поиска альтернативных технологических методов обработки сверхтвердых материалов [4], в качестве которых предложено исследовать технологию лазерной обработки, практически не имеющей ограничений по спектру применяемых материалов. Таким образом, целью данной работы являлось исследование возможности лазерной обработки поликристаллического алмазного композита для улучшения качества его поверхности.

Лазерная обработка алмазного композита. В ходе исследований было предложено оценить принципиальную возможность обработки поверхности алмазного композита с целью изменения шероховатости и профилирования на основе технологии лазерной обработки. Экспериментальные образцы (рис.1) представляли собой диски из поликристаллического алмазного композита диаметром 10 мм и толщиной 2 мм, спеченные на поверхности карбида вольфрама ВК8.

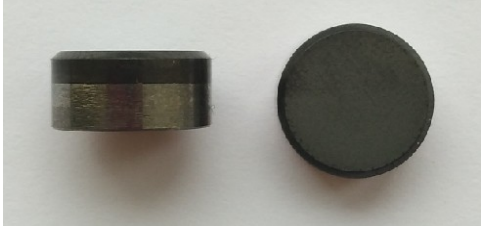


Рис.1. Экспериментальные образцы из поликристаллического алмазного композита

Экспериментальные исследование включали варьирование режимов лазерной обработки с изменением мощности, скорости, частоты, длительности импульсного лазерного воздействия. Осуществлялся контроль шероховатости поверхности образцов с экспериментальным набором режимов лазерной полировки (рис.2) на измерительной станции Hommel tester T8000 до и после обработки (рис.3).

Рис.2. Экспериментальный образец с набором режимов лазерной полировки

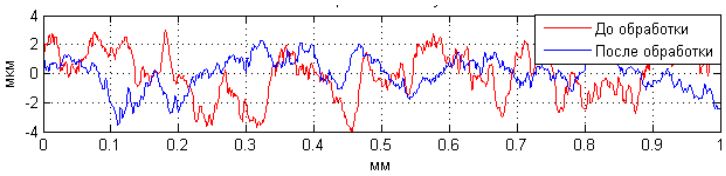


Рис.3. Профилограмма поверхности поликристаллического алмаза до и после лазерной полировки

При профилировании поверхности (рис.4) оценивалось качество и глубина рельефной структуры с использованием оптического микроскопа Микромед. Исследование процессов модификации поверхности оценивалось с применением сканирующего электронного микроскопа Mira Feg SeM 3.

Рис.4. Экспериментальный образец с требуемым профилем поверхности

Заключение. Показана принципиальная возможность лазерной обработки алмазного композита. Выявлены режимы лазерной обработки, изменяющие шероховатость поверхности, которые могут использоваться для финишной обработки (полировки) композиционного материала. Перспективы дальнейших исследований связаны с проведением сравнительных трибологических испытаний композита с профилированной поверхностью и с поверхностью без профилирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Красный В.А., Халимоненко А.Д.** Новые конструкционные материалы: Учебно-методический комплекс / Санкт-Петербургский горный университет. СПб, 2016, 121 с.
2. **Яковлева С.А.** Исследование и разработка технологических методов повышения точности и размерной стабильности прецизионных деталей и узлов гироскопических приборов. Автореферат. Санкт-Петербург: 2012. 22 с.
3. **Демидов А.Н., Ландау Б.Е., Цветков В.Н.** Гирокамера электростатического гироскопа // Патент на изобретение № 2193159. 2002.
4. **Юльметова О.С., Щербак А.Г., Челпанов И.Б. / Под ред. Валетова В.А.** Специальные технологии изготовления прецизионных узлов и элементов гироскопических приборов. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 131 с.

O.N. Poslyanova, **O.S. Yulmetova** (ITMO University, St-Petersburg; Concern CSRI Elektropribor, JSC, St-Petersburg), **A.G. Scherbak** (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St-Petersburg). **Research of the laser processing manufacture in gyroscopic instrument making**

Abstract. This research considers the possibility of laser processing of polycrystalline diamond composite in order to change surface roughness and to receive a contour of the required geometry. The results of the laser processing of the polycrystalline diamond composite samples and the results of surface profiling of samples are represented.

УДК 53.06

А.А. НИКОНОВ, А.Н. ВОЛКОВ
(АО «Лазерные системы», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург).

ВЫЯВЛЕНИЕ И ОТСЕИВАНИЕ ПОБОЧНЫХ ПРОДУКТОВ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В ПОРОШКЕ ПРИ ПРОЦЕССЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

Доклад посвящен исследованию фракционного состава металлического порошка, используемого в технологии селективного лазерного сплавления при помощи ситового метода. В работе описаны и представлены агломераты микрокапель порошка, негативно влияющие на процесс его сплавления и предложен способ отсеивания побочных продуктов процесса сплавления.

Введение. В целях обеспечения стабильных термических условий при процессе аддитивного селективного лазерного сплавления необходимо, чтобы фракционный состав используемого порошка находился в узком диапазоне. Более того, кроме отсутствия частиц, выходящих за рамки требуемого диапазона, необходимо обеспечить чистоту порошка, исключив частицы инородного химического состава [1]. Такие гранулы образуются в процессе сплавления и представляют собой агломераты микрокапель сплава, создающиеся в процессе конденсации паров металлов. Образующиеся инородные частицы имеют различные размеры, совпадающие с размерами частиц порошка, поэтому задача их отсеивания занимает существенное количество времени.

Целью работы являлось исследование фракционного состава металлического порошка сферической формы, а также разработка метода отсеивания инородных частиц с помощью сегрегации используемого сырья.

Выявление инородных частиц и сегрегация порошка. Существует группа технологий для определения размеров частиц, которая представлена в литературных источниках [2].

Фракция исследуемого порошка, заявленная в паспорте на него, составляет 10-40 мкм, однако в нем могут присутствовать частицы, выходящие за границы диапазона. Исследование по определению процентного соотношения различных фракций произведено с помощью ситового метода.

В эксперименте были использованы сита со следующими размерами ячеек: 112, 80, 63, 40, 32 мкм. Исходя из того, что фракция порошка составляла 10-40 мкм, значительная его часть должна лежать в диапазонах 0 ÷ 32 мкм и 32 ÷ 40 мкм. Сита были установлены на вибропривод ВП-30 [3].

Исследование проводилось с использованием порошка массой 200 г, прошедшего цикл сплавления, и содержащим описанные выше агломераты микрокапель сплава. Просеивание происходило два раза в течение тридцати минут, усредненные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

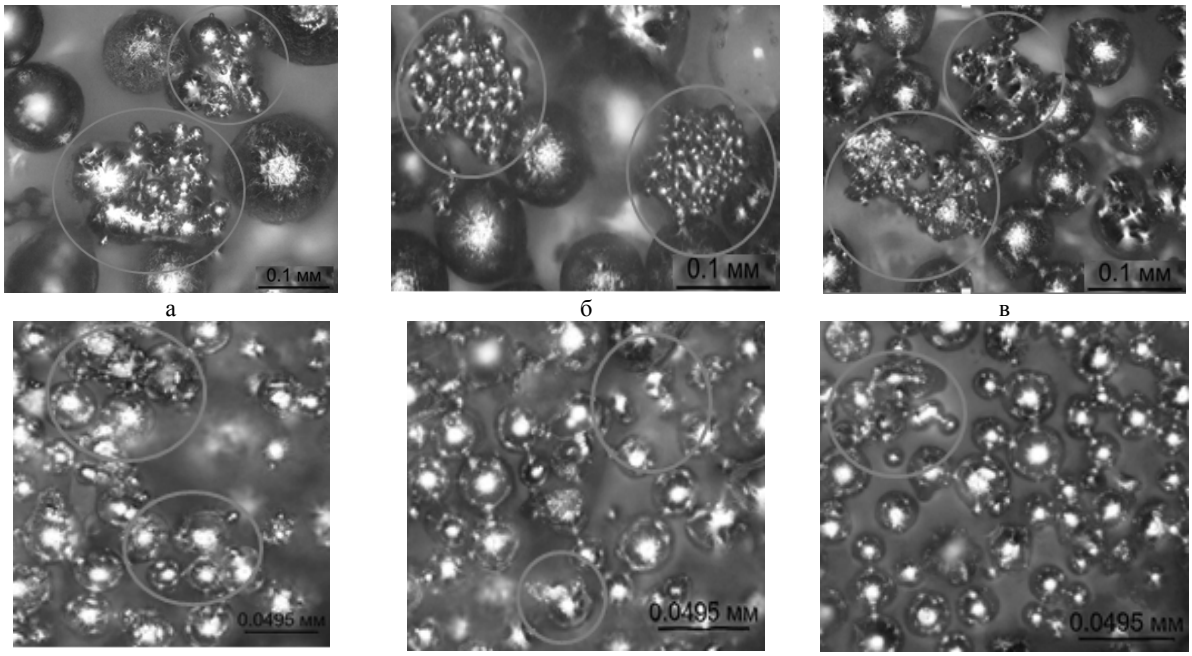
Распределение фракций порошка

Фракция, мкм	0 ÷ 32	32 ÷ 40	40 ÷ 63	63 ÷ 80	80 ÷ 112	>112
Масса, г	46,72	22,73	93,46	32,10	0,61	0,47
Относительная масса, %	23,63	11,50	47,27	16,55	0,31	0,24

Исходя из данных таблицы можно сделать вывод о том, что вопреки данным паспорта на порошок наибольшей по массе оказалась фракция 40 ÷ 63 мкм. Также в незначительном количестве присутствуют частицы больше 112 мкм, что, в свою очередь, превышает высоту формируемого на подложке слоя порошка.

Побочным продуктом процесса селективного лазерного сплавления являются конденсированные пары металлов, представляющие собой гранулы, образованные из множества сплавленных капель металлов, имеющие неправильную форму и неизвестный химический состав. В результате исследования были получены фотографии агломератов в каждой рассматриваемой фракции (рис. 1, а-е).

Научный руководитель к.т.н., доцент Евдокимов И.М.

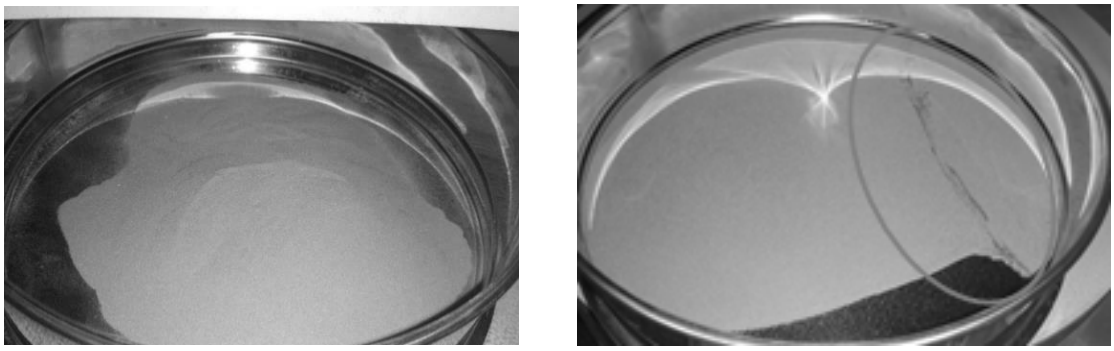


а б в

г д е

Рис. 1. Фотографии агломератов в получившихся фракциях:
а) > 112 мкм; б) 80 ÷ 112 мкм; в) 63 ÷ 80 мкм; г) 40 ÷ 63 мкм; д) 32 ÷ 40 мкм; ж) 0 ÷ 32 мкм

В той или иной форме агломераты присутствуют в каждой фракции, следовательно, попытки удалить их ситовым методом не представляются возможными. Более рациональным вариантом является сегрегация порошка, суть которой заключается в том, что под воздействием горизонтальной или вертикальной вибрации на сосуд с порошком происходит разделение частиц по нескольким признакам: форме, размеру, плотности [4]. В случае рассмотрения одной фракции разделение частиц, в большей степени, происходит из-за различия форм и плотностей. В качестве пробы был взят просеянный порошок фракцией от 0 до 45 мкм массой 450 г и засыпан в сосуд, на который воздействовала вибрация в течение получаса. На рис. 2а показан порошок до обработки; в нем под воздействием вибрации инородные частицы, отличной от чистого порошка плотности, скапливаются на поверхности (рис. 2б).



а б

Рис. 2. Исследуемый на воздействие вибрации порошок в емкости: а) до воздействия вибрации;
б) после воздействия вибрации. Линией выделена область с поднявшимися на поверхность агломератами

Заключение. Проведено исследование фракционного состава металлического порошка сферической формы. Разработан эффективный метод отсеивания инородных частиц с помощью сегрегации используемого сырья, который основан на удалении скопившихся частиц посредством механического снятия верхнего слоя и повторного выполнения сегрегации снятого слоя, с целью сохранить максимальное количество чистого порошка. Таким образом, сегрегация порошка позволяет выполнить задачу удаления скопившихся на поверхности вторичных продуктов сплавления, что невозможно производить с помощью ситового метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Акименко В.Б., Буланов В.Я., Гуляев И.А.** Состав, структура и свойства железных и легированных порошков. Екатеринбург: Наука, 1996. 350с.
2. **«Сайт о химии»** [Электронный ресурс], – http://www.xumuk.ru (Дата обращения: 26.12.2018 г.).
3. **«Идеи и оборудование для малого бизнеса»** [Электронный ресурс], – https://msd.com.ua (Дата обращения: 26.12.2018 г.).
4. **Либенсон Г.А.** Основы порошковой металлургии. Металлургия; М. 1975.

A.A. Nikonov, A.N. Volkov (Laser Systems LLC, Baltic State Technical University "Voenmeh" D.F. Ustinov, St-Petersburg).
Identification and screening of by-products formed in the powder during the process of selective laser fusion

Abstract. This article is devoted to the study of the fractional composition of the metal powder used in the technology of selective laser alloying using the sieve method. There were described and demonstrated agglomerates of micro droplets of powder in this article which negatively affect the fusion process of the powder and there was proposed the method for screening off by-products of the fusion process.

УДК 681.373

Я.Р. КАПША
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

Л.Г. КУТЛУГУЛЬДИНА
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КОРРЕКТИРОВКИ ДИСБАЛАНСА СПЛОШНОГО РОТОРА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

В докладе предлагается модель балансировки ротора электростатического гироскопа на основе технологии лазерной абляции. Разработана математическая модель балансировки на основе испарения локальной массы для устранения дисбаланса ротора. Экспериментальные данные подтвердили адекватность разработанной модели и преимущество использования лучевых технологий в сравнении с традиционными методами механообработки.

Введение. На сегодняшний день в точном приборостроении одними из самых перспективных инерциальных измерительных систем являются системы на основе гироскопов с электростатическим подвесом. Однако используемые технологии производства роторов таких гироскопов, например, ротора бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ), не позволяют таким системам достигнуть потенциальной расчетной точности [1].

Существенная доля погрешности показаний БЭСГ обусловлена характеристиками его ротора, влияющими на его динамику в подвесе, а именно: уход формы ротора от идеальной сферы, неоднородность плотности материала и, как следствие наличию дисбаланса. Эти факторы напрямую связаны с методами механообработки, не гарантирующими необходимого уровня качества и выполнения всех технических требований при производстве ротора [2].

Предлагаемый доклад посвящен разработке и исследованию модели корректировки дисбаланса сплошного ротора электростатического гироскопа. Целью доклада является разработка перспективного метода балансировки ротора с использованием лучевых технологий посредством испарения локальной массы материала с поверхности ротора и ее замещения массой более плотного материала.

Разработка модели корректировки дисбаланса ротора. На начальном этапе исследования в пакете программ MatLab разработана модель корректировки дисбаланса на основе лазерного испарения (абляции) [3]. Суть предложенного, относящегося к лучевым метода заключается в том, что на финальном этапе балансировки ротора на его поверхности в точке, противолежащей направлению вектора дисбаланса, формируется выемка - локальное углубление на поверхности ротора определенного диаметра и расчетной глубины. Далее на поверхность ротора в зоне выемки наносится функциональное покрытие со значительно большей плотностью, чем у материала ротора. В итоге указанная выемка заполняется материалом функционального покрытия и обеспечивает компенсацию дисбаланса ротора. Ниже приведен график результатов моделирования.

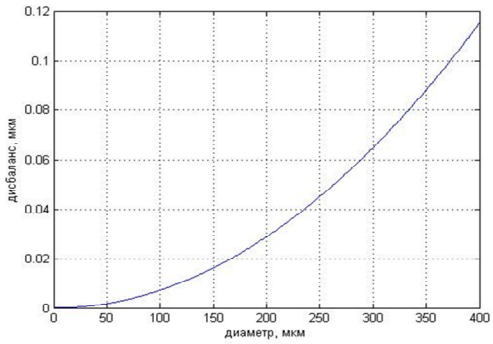


График зависимости велечины корректируемого дисбаланса от диаметра выемки на поверхности ротора, глубиной 50 мкм, для системы бериллий-нитрид титана

Научный руководитель к.т.н., доцент Юльметова О.С.

В практической части работы проведена экспериментальная проверка разработанной модели. С помощью волоконного лазерного излучателя «Минимаркер 2» реализована выемка необходимого размера. Нанесение функционального покрытия осуществлялось в установке «Булат 6» методом катодно-ионной бомбардировки. В результате удалось достичь величины смещения дисбаланса порядка десятков микрометров, что подтверждает адекватность разработанной модели корректировки дисбаланса.

Заключение. В результате исследований разработана модель балансировки ротора бескарданного электростатического гироскопа выполняемая посредством испарения локальной массы материала ротора с его поверхности и последующего заполнения выемки материалом большей плотности. Полученная технология позволяет с высокой точностью (до десятых и сотых долей микрометра) производить корректировку дисбаланса без нарушения сферической формы ротора. Экспериментальные данные подтвердили адекватность модели, разработанной с использованием лучевых технологий для формирования дисбаланса ротора, и показали преимущество использования лучевых методов обработки по сравнению с механическими.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Б.Е. Ландау, А.А. Белаш, С.С. Гуревич, Г.И. Емельянцев, С.Л. Левин, С.Г. Романенко.** Бескарданная инерциальная система ориентации на электростатических гироскопах для орбитального космического аппарата. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2011.
2. **Б.Е. Ландау, А.Я. Буцык, А.Г. Щербак, А.П. Буравлёв, С.Н. Беляев.** Способ изготовления ротора шарового гироскопа. / Патент РФ 2286535 от 10.03.2005 г., МКИ G01C 25/00, B23P 15/00, Бюл. № 30,27.10.2006.
3. **С.А. Пячин, М.А. Пугачевский**. Новые технологии получения функциональных наноматериалов: лазерная абляция, электроискровое воздействие. Хабаровск, 2013. 38 с.

Y.R. Kapsha (ITMO University, St-Petersburg), **L.G. Kutluguldina** (ITMO University, Concern CSRI Elektropribor, JSC, St-Petersburg). **Development of the disbalance correcting model for the electrostatic gyroscope filled rotor**

Abstract. The paper proposes a model of balancing process for an electrostatic gyroscope rotor based on laser ablation technology. A mathematical model of balancing process based on the evaporation of local mass has been developed to correct rotor imbalances. Experimental data confirmed the adequacy of the developed model and the advantage of using beam methods in comparison with traditional methods of machining.

▪ СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ▪

УДК 681.51

Д.С. ГНУСАРЕВ
(Филиал ФГУП «НПЦ АП» – «ПО «Корпус», г. Саратов)

РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ МОДЕЛИ КВАРЦЕВОГО МАЯТНИКОВОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА КОМПЕНСАЦИОННОГО ТИПА В СРЕДЕ COMSOL С РЕАЛИЗАЦИЕЙ ЗАМКНУТОГО КОНТУРА УПРАВЛЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ ПРИБОРА

В докладе приводятся результаты компьютерного моделирования движения инерционных масс чувствительного элемента кварцевого маятникового акселерометра, изготовленного из кварцевого стекла марки КУ-1. Особое внимание уделяется построению замкнутого контура обратной связи и результатам моделирования во временной области при различных входных воздействиях. Проводится сравнение результатов моделирования в программных комплексах Comsol Multiphysics и MatLab Simulink.

Введение. Объектом исследования в настоящем докладе является кварцевый маятниковый акселерометр компенсационного типа производства филиала ФГУП «НПЦАП» – «ПО «Корпус» (г. Саратов) [1]. Рассматриваемый акселерометр в качестве чувствительного элемента входит в каждый измерительный канал шестикомпонентного блока измерителей линейных ускорений с неортогональной ориентацией осей чувствительности. С 2002 г. блок применяется в составе системы управления спускаемого аппарата космического корабля «Союз-ТМА» [2]. По заказу РКК «Энергия» (г. Королев) с 2016 г. проводится модернизация блока путём замены в измерительных каналах аналоговой системы управления акселерометром на цифровую (ЦСУ). Модернизированный блок прошёл все виды испытаний и с 2019 г. должен заменить блок акселерометров с аналоговой системой обратной связи в системе управления космического корабля «Союз», а также войти в систему управления транспортного космического корабля «Прогресс» [3–7].

Доклад является продолжением исследований акселерометра с ЦСУ, представленных на предыдущей конференции молодых ученых (XX КМУ, 2018) и посвящённых разработке физической модели прибора в среде Comsol, расчёту резонансных частот и математическому описанию движения чувствительного элемента кварцевого маятникового акселерометра (КМА) при различных входных воздействиях. К текущему моменту не только реализована физическая модель прибора по рабочим чертежам с описанием используемых материалов, но и сформирован в этой же среде регулятор в виде системы дифференциальных уравнений в форме Коши, в связи с чем исследуемая модель была названа комбинированной. Реализация такой модели позволяет проводить компьютеризированное исследование поведения прибора как замкнутой системы автоматического управления, например, при изменении механических параметров чувствительного элемента акселерометра и оценке влияния контура регулирования на качество управления при изменении коэффициентов регулятора. Также, для сравнения, была реализована упрощённая модель прибора в программном комплексе MatLab Simulink. В докладе рассмотрено решение нескольких задач, таких как исследование характеристик акселерометра с замкнутой цепью обратной связи в статическом и динамическом режимах работы при использовании различных вариантов конструкции маятника, решение задачи компенсации разбалансировки маятника с использованием рассматриваемой среды Comsol и ряд других, что в итоге позволяет провести оптимизацию параметров акселерометра с ЦСУ. Настоящая работа является актуальной потому, что на основе прогнозов ведущих учёных, например Джорджа Шмидта (США) [8], в ближайшие 25 лет кварцевые акселерометры и Q-Flex технологии будут широко использоваться не только в высокоточных навигационных системах, но и в МЭМС-датчиках.

Научный руководитель к.т.н., ведущий инженер-программист Депутатова Е.А.

Рис. 1. Схема модели чувствительного элемента маятникового акселерометра с замкнутым контуром обратной связи

Комбинированная модель кварцевого маятникового акселерометра. На рис. 1 показана упрощённая схема построенной в среде Comsol модели чувствительного элемента маятникового акселерометра с замкнутым контуром обратной связи. Маятник КМА является основной частью чувствительного элемента акселерометра и представляет собой физическую модель. Кду и Кдм – коэффициенты передачи датчиков угла и момента, соответственно. Регулятор формируется в виде системы дифференциальных уравнений в форме Коши. Такой способ построения модели позволяет избежать применения программного комплекса MatLab и операций, связанных с передачей данных между программами в процессе моделирования, что делает сам процесс моделирования более контролируемым и снижает требования к аппаратным ресурсам.

Для сравнения была построена аналогичная, но упрощённая модель прибора в программном комплексе MatLab. В этом случае мятник представляется в виде точки в одномерном пространстве, задаются жёсткость подвеса, показатель демпфирования и ограничители перемещений, соответствующие таковым в приборе. Регулятор формируется в виде передаточной функции по Лапласу [9].

В работе приводятся результаты моделирования такой системы во временной области для маятников разного конструктивного исполнения и упрощённой модели при различных входных воздействиях, в том числе и вибрациях; приводятся графики переходных процессов.

Одной из задач, стоящих перед разработчиками КМА на нашем предприятии, является исследование влияния разбалансировки в следствии несовпадения центра масс маятника и центра приложения сил обратной связи, в результате чего маятник под действием входного ускорения и компенсирующего воздействия не может вернуться в горизонтальное положение. При этом система находится в устойчивом состоянии, а остаточные напряжения в объёме кварцевого диска вносят дополнительные погрешности в выходной сигнал прибора. В данной работе приводятся результаты исследования данного эффекта и формируются рекомендации по его устранению.

Заключение. Таким образом, построенная модель чувствительного элемента маятникового акселерометра с замкнутым контуром обратной связи может быть применена при решении широкого спектра задач, связанных как с модернизацией самого чувствительного элемента маятникового акселерометра, так и с оптимизацией управляющего контура, что в свою очередь позволяет проводить комплексную оптимизацию параметров прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мельников В.Е.** Электромеханические преобразователи на базе кварцевого стекла. М., 1984. 160 с.
2. **Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Полушкин А.В., Нахов С.Ф., Бранец В.М., Рыжков В.Н., Дибров Д.Н.** Измеритель вектора кажущегося линейного ускорения – прибор БИЛУ КХ69-042 для СУ спускаемого аппарата корабля «Союз-ТМА» // 13 Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: Изд-во ЦНИИ «Электроприбор», 2006. С. 253–263.
3. **Калихман Д.М., Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф., Ермаков Р.В.** Результаты экспериментальной отработки термоинвариантного кварцевого маятникового акселерометра с цифровой обратной связью и перепрограммируемым диапазоном измерения // 23 Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 139–157.
4. Патент 2615221 РФ от 04.04.2017. Заявка № 2015116808. Приоритет от 30.04.2015. Способ обеспечения виброустойчивости маятникового акселерометра линейных ускорений с цифровой обратной связью и виброустойчивый маятниковый акселерометр / *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф., Смирнов Е.С.* // Б.И. № 10, 2017.
5. Патент 2627970 РФ от 14.08.2017. Заявка № 2016144606. Приоритет от 14.11.16. Способ обеспечения линейности масштабного коэффициента маятникового широкодиапазонного акселерометра компенсационного типа / *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф.* // Б.И. № 23, 2017.
6. Патент 2626071 РФ от 21.07.2017 г. Заявка № 2016122097. Приоритет от 03.06.16. Способ обеспечения линейности масштабного коэффициента маятникового акселерометра компенсационного типа / *Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Гребенников В.И., Скоробогатов В.В., Нахов С.Ф., Кожевников В.Е., Самитов Р.М.* // Б.И. № 21, 2017.

7. **Скоробогатов В.В.** Основы разработки безобогревных термоинвариантных измерителей угловых скоростей и кажущихся ускорений для систем управления ракетно-космическими объектами / Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук. Саратов: 2018. 24 с.
8. **Шмидт Дж.** Т. Эксплуатация навигационных систем на основе GPS в сложных условиях окружающей среды. // Гироскопия и навигация, № 1, 2019. С. 3-21.
9. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 767 с.

D.S. Gnusarev (Branch of the Federal State Unitary Enterprise “Academician Pilyugin Scientific-production Center of Automatics and Instrument-making” – “Production Association “Korpus”, Saratov). **Development of a combined model of compensation type quartz pendulum accelerometer in Comsol environment with implementation of a closed control loop and parameter optimization**

Abstract. The report presents the results of computer modeling of motions of inertial masses of the sensory element in quartz pendulum accelerometer performed using the KU-1 quartz glass. Particular attention is given to constructing the closed feedback loop and the results of the time domain simulation for various input effects. Comparison of the results of modeling performed in Comsol Multiphysics and MatLab Simulink software packages is shown.

УДК 539.37/38

И.В. МУРАТОВ
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Институт прикладной математики и механики)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕЛИНЕЙНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИТИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Работа посвящена численному исследованию процессов нелинейного деформирования железобетонных конструкций на основе аналитических решений. Выполнен обзор нелинейных моделей деформирования и прочности железобетона, реализованных в программных системах конечно-элементного анализа. С использованием нелинейных моделей были решены задачи деформирования железобетона.

Введение. Многие современные инженерные задачи связаны с моделированием железобетонных конструкций. Подавляющее большинство задач нелинейного деформирования железобетона решаются в таких программных комплексах, как LS-DYNA, ANSYS, ABAQUS [1-3]. В этих вычислительных программах задаются разные модели неупругого поведения бетона. На сегодняшний день в инженерной и научной литературе недостаточно полно рассмотрены вопросы обоснованности и применимости тех или иных сложных математических моделей механики железобетона к расчету реальных конструкций под действием широкого класса возможных нагрузок. Предлагаемый доклад посвящен численному исследованию процессов нелинейного деформирования железобетонных конструкций на основе аналитических решений.

Работа посвящена исследованию и верификации численных методов анализа пространственного напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций в условиях интенсивного нелинейного деформирования бетона. Рассматривается ряд задач, имеющих аналитическое решение, на основе которых произведен сравнительный анализ аналитических решений задач нелинейного деформирования железобетонных конструкций с численным решением в программной системе конечно-элементного (МКЭ) анализа ANSYS.

Классическая теория пластичности железобетона. Первая часть доклада посвящена обзору имеющихся постановок математических моделей железобетонных конструкций и изучению классической теории пластичности железобетона и её применению для получения аналитических решений. Большая часть теории пластичности железобетона была разработана в XX веке. Весомый вклад в изучения железобетона внесли советские ученные Г.А. Гениев, Н.И. Карпенко, Л.М. Качанов [4-6].

Гениев в своей книге "Теория пластичности бетона и железобетона" излагает теоретические и экспериментальные исследования прочности и деформации железобетона и бетона. Поверхность текучести образована параболоидом вращения и строится в главных напряжениях [4]. Основные зависимости записываются в терминах интенсивности напряжений.

В программной системе МКЭ анализаANSYS для моделирования бетонных конструкций используется модель Друкера-Прагера (Drucker-Prager concrete). Данная модель позволяет рассчитать напряженно-деформированное состояние при одноосном растяжении/сжатии и при двухосном сжатии. Кроме того можно установить разупрочнение материала. Так же в ANSYS используется модель Menetrey-Willam, где поверхность текучести построена путем комбинации поверхностей Вилама-Варнке.

В программном комплексе в области конечно-элементных расчетов Abaqus используется модель Concrete damaged plasticity, которая обеспечивает моделирование бетона и других квазихрупких материалов. В модели используется изотропное разрушение в сочетании с изотропным растяжением и сжимающей пластичности для моделирования неупругого поведения бетона.

Решение модельных задач. Вторая часть работы посвящена решению задач в упруго-пластической постановке, имеющих аналитическое решение. В этом разделе приведено решение нескольких классических задач теории пластичности. Решение задач в данной постановке позволяет освоить основные понятия из теории пластичности, которые в последствии будут необходимы для решения задач связанных с железобетоном. Набор такихзадач позволяет произвести верификацию численного решения с использованием идеально пластической модели "bilinear isotropic hardening" в ANSYS.

Растяжение и кручение тонкостенной трубы. Имеется труба, которая сначала закручивается крутящим моментом до наступления текучести, затем растягивается осевой силой при фиксированном угле. Предполагается,что труба тонкостенная,а радиус трубы много меньше ее длины. Так же предполагается,что в трубе наблюдается идеальная пластичность. В такой постановке задачи наблюдается явление релаксации касательных напряжений (при увеличении нормальных напряжений,касательные напряжения спадают).

Толстостенная сферическая оболочка под действием давления. Имеется толстостенная сферическая оболочка под действием постоянного давления с внутренней стороны сферы. Известна толщина сферической оболочки. Предполагаем, что наблюдается идеальная пластичность. Анализ задачи показывает,что в сферической оболочки в зависимости от величины прикладываемого давления наблюдаются 3 характерных зоны материала: упругая зона, упруго-пластическая зона, пластическая зона.

Консольная балка под действием сосредоточенной силы. Один конец балки жестко заделан, второй конец свободен. На свободный конец балки действует сосредоточенная сила. В такой постановке в сечении балки возникает пластический шарнир. Понятие пластического шарнира очень важное в строительстве и железобетонных конструкциях [7].

Толстостенная труба под действием давления. Имеется толстостенная труба под действием постоянного давления. Предполагается, что длина трубы много больше,чем радиус трубы. Материал трубы несжимаемый.

Численное исследование железобетонных конструкций. Третий раздел реферата посвящен решению модельных задач из второго раздела с заменой идеально-пластической модели на нелинейнуюмодель железобетона. Численное решение выполняется в прораммной системе в ANSYS с использованием нелинейной модели Друкера-Прагера (Drucker-Prager concrete). Аналитическое решение задач для модели железобетона получено на основе расчетов, выполненных Г.А. Гениева.

Заключение. В работе исследованы процессы нелинейного деформирования железобетонных конструкций на основе аналитических решений, рассмотрена аналитическая модель железобетона Г.А. Гениева. Произведен сравнительный анализ задач с упруго-пластической постановкой в программном комплексе ANSYS с аналитическим решением. Выполнен сравнительный анализ нелинейной модели Г.А. Гениева с моделью Друкера-Прагера (Drucker-Prager concrete), реализованной в ANSYS. Дальнейшие планы работы включают в себя применение полученных результатов и знаний для реальных конструкций и различных натурных испытаний. Кроме того, планируется изучение отдельных аспектов, связанных с моделированием металлобетонных конструкций: высокотемпературная ползучесть бетона при силовом и температурном нагружении, моделирование контакта арматуры с бетоном**.**

ЛИТЕРАТУРА

1. LS-DYNA, Keyworduser's manual, vol 1,2,3, Livermore software technology corrporation,2018
2. ANSYS Theory reference,2018
3. Abaqus, Verification Guide,2018
4. **Гениев Г.А., КиссюкВ.Н., Тюпин Г.А.** Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974, С. 12-25
5. **Карпенко Н.И**, Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996
6. **Качанов Л.М**, Основы теории пластичности М.: Наука 1969

7. **Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю**, Экстремальные воздействия на Сооружения, СПБ.: Атомэнергопроэкт 2009,132-136

I.V. Muratov (Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, department of Mechanics and Control Processes). **Numerical investigation of nonlinear deformation processes of reinforced concrete structures based on analytical solutions**

Abstract. The work is devoted to a numerical study of non-linear deformation processes of reinforced concrete structures based on analytical solutions. The review of nonlinear models of deformation and strength of reinforced concrete implemented in software systems of the finite element analysis is made. With the use of nonlinear models were solved the problem of deformation of reinforced concrete.

УДК 519.63

Ю.А. ЛАВРОВ, А.В. СОКЛАКОВ
(АО «ЦИФРА», Санкт-Петербург)

ОЦЕНКА ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОПТИЧЕСКОГО УЗЛА ОРБИТАЛЬНОГО ТЕЛЕСКОПА В УСЛОВИЯХ НЕВЕСОМОСТИ

Выполнено численное моделирование деформирования рабочих поверхностей зеркал оптического узла орбитального телескопа. Разработан алгоритм, позволяющий значительно сократить время на проведение экспериментов и в полной мере провести оценку качества получаемого изображения, оценить жесткость конструкции.

Введение. Перед отправкой в космос любая техника настраивается и проверяется, чтобы обеспечить безотказную и надежную работу изделия. В исследуемом телескопе все зеркала неподвижные, закреплены жестко в корпусе и изменить их положение на орбите не представляется возможным. По этой причине настройка телескопа – юстировка, осуществляется на земле и производится с учетом будущего режима работы в условиях невесомости.

Чтобы повторить подобные условия эксплуатации на земле предусмотрена система разгрузки, задача которой скомпенсировать действие силы тяжести, оказываемое на зеркала, являющиеся главными компонентами оптического узла. Подобное механическое воздействие приводит к деформированию рабочей поверхности зеркала, в следствии чего падает разрешающая способность телескопа и как следствие, снижается качество оптического изображения.

В докладе рассматривается численное моделирование телескопа. Описывается методика определения деформирования рабочей поверхности зеркала от воздействия механических и тепловых нагрузок исключительно с помощью программного комплекса ANSYS Mechanical.

Цели и задачи. Цель работы заключается в разработке алгоритма расчета деформирования рабочей поверхности зеркала при воздействии различных нагрузок без использования сторонних программных продуктов.

Достижение цели осуществляется путем решения следующих задач: создание численной модели изделия; расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) телескопа при воздействии силы тяжести, компенсационных сил обезвешивания и температурных нагрузок; анализ полного перемещения зеркал; исключение части компонентов перемещения, не влияющих на деформацию рабочих поверхностей зеркал, и получение искомой величины.

Объект исследования. Объект исследования – телескоп с оптическим узлом, состоящим из четырех зеркал (рис.1). На рисунке указаны расположение зеркал и направление действия силы тяжести.

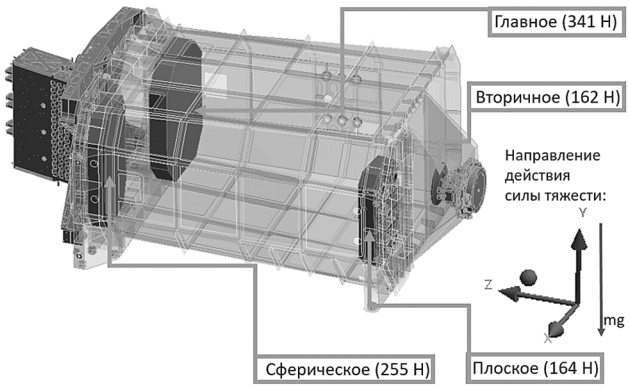


Рис.1 Объект исследования – телескоп

Компоненты, входящие в оптический узел: главное зеркало, плоское зеркало, сферическое зеркало, вторичное зеркало.

Корпус телескопа выполнен из углепластика, зеркала выполнены из ситалла. На нижней торцевой поверхности зеркал есть две металлические площадки, через которые осуществляется воздействие тензометрическими балками, компенсирующими силу тяжести.

Численная модель объекта исследования. Для выполнения задач построена трехмерная геометрическая и конечно-элементная модель телескопа. Сетка включает в себя 505 589 узлов и 307 598 элементов. Размерность задачи составляет 1 773 685 степеней свободы.

Закрепление изделия в пространстве осуществляется в 10 точках через предусмотренные в конструкции штатные закладные втулки.

Корпус телескопа выполнен из углепластика КМУ-4Л (углеродная лента ЛУП-0.1 ГОСТ 28006-88, связующее ЭНФБ ТУ-596-38-98). Материал является композиционным и физико-механические свойства принимались ортотропными. Значения свойств задавались в соответствии с экспериментальными данными описанными в [1].

Расчет телескопа с оптическим узлом. Решение задачи выполнялось в два этапа. На первом этапе воздействовала сила тяжести, позволяя всей конструкции свободно деформироваться. Зеркала из-за деформации корпуса меняют свое начальное положение, перемещаясь и поворачиваясь относительно оптической оси телескопа. На втором этапе прикладываются компенсационные силы обезвешивания зеркал, направление действие которых противоположно действию силы тяжести. Значения компенсационных сил для каждого зеркала индивидуальное и обусловлено массой зеркала. Задача этих сил заключается в обеспечении требуемых значений линейных и угловых перемещений зеркал, которые не должны превышать установленные пределы. Вместе с таким механическим воздействием происходит деформирование рабочей поверхности зеркала, что в свою очередь ведет к падению качества оптической картинки.

Для оценки этого падения необходимо взять среднеквадратическое отклонение от деформации рабочей поверхности зеркала. На основании полученных значений, пользуясь интерферограммой изделия, можно определить на сколько падает разрешающая способность телескопа и тем самым снижается работоспособность оптического узла.

Для определения поля деформации рабочей поверхности зеркала вдоль оптической оси обычно используют полиномы Цернике. Разработанная методика позволяет получать результаты в среде ANSYS Mechanical без применения данного математического аппарата.

Суть алгоритма в том, чтобы из полных перемещений зеркала исключить поворот вокруг двух осей, перпендикулярных оптической оси, и исключить перемещение как жесткого тела. В результате получаются поля деформации рабочей поверхности зеркала, от которой можно взять СКО и дать оценку по качеству будущей картинки. Пример полей деформации рабочих поверхностей зеркал приведен на изображении ниже (рис.2).

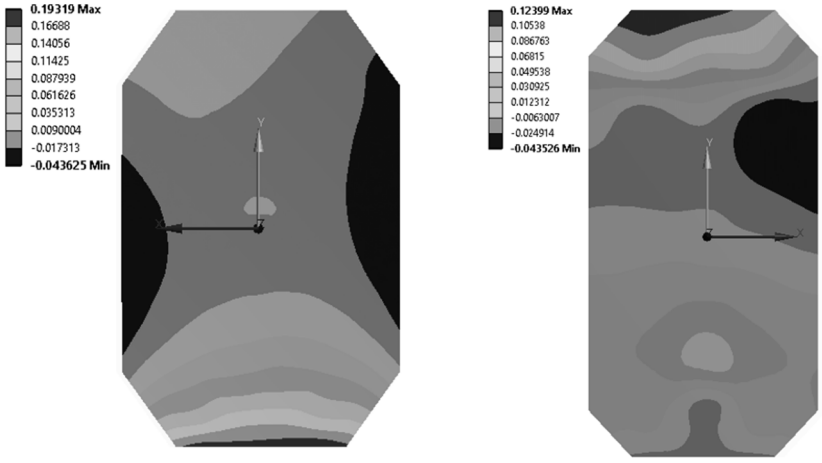


Рис.2 Поле деформации рабочих поверхностей зеркал, мкм

В качестве воздействия может выступать не только механическая нагрузка, но и тепловая. При этом разработанная методика никак не меняется.

Заключение. В результате механического расчета определено НДС телескопа, разработана методика, позволяющая получать поля деформации рабочих поверхностей зеркал. Предложенный подход позволяет значительно сократить время на проведение экспериментов, в полной мере провести оценку будущего качества получаемого изображения. Таким образом, значительно сокращаются материальные затраты на этапе летно-космических испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет по программе определения физико-механических и теплофизических характеристик образцов укладок композиционных материалов, 2011 г., 2 с.

Y.A. Lavrov, A.V. Soklakov (Center of Engineering Physics Research and Analysis, JSC, Saint-Petersburg). **Stress and performance analysis of theoptical unit in the orbital telescope in zero-gravity conditions.**

Abstract. We performed a simulation of deformation for the working surfaces of mirrors in the optical unit of the orbital telescope. Based on the calculations, we developed an algorithm to determine the degree of stress deformation for the working surface of the mirror during the alignment of the orbital telescope for zero-gravity operation. This algorithm makes it facilitates and fastens obtaining the experimental results.

УДК 539.3, 62-4

А.И. ФИЛИМОХИНА, В.С. МОДЕСТОВ, Р.В. ФЕДОРЕНКО
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Институт прикладной математики и механики, Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ПОДКРЕПЛЕННОЙ РЕБРИСТОЙ ОБОЛОЧКИ

Рассмотрена проблема обеспечения устойчивости металлической оболочки. Анализируется значение коэффициента устойчивости конструкции в случае подкрепленной и неподкрепленной металлической оболочки. Проводится решение обратной задачи, когда подпираются свойства подкрепляющих конструкций по имеющимся результатам решения задачи и требованиям обеспечения прочности и устойчивости конструкции.

Введение. Современное проектирование атомных электростанций зачастую сталкивается с множеством не только технических, но и физико-механических проблем. Работа посвящена решению проблемы упругой устойчивости металлической оболочки (МОЦП), которая подвержена тепловым и силовым нагрузкам, являющейся необходимым условием сплошности конструкции, что является одним из критериев безопасности работы.

Устойчивость двухслойной оболочки. Металлическая конструкция представляет собой двуслойную оболочку, состоящую из сталей различных свойств. Одна из них моделирует основную металлическую оболочку, а другая – наплавку, сохранность которой не требуется в расчетах. Все металлические конструкции заливаются бетонным раствором (рис. 1). Задача решается с помощью метода конечных элементов, реализованным в программном средстве ABAQUS [1].

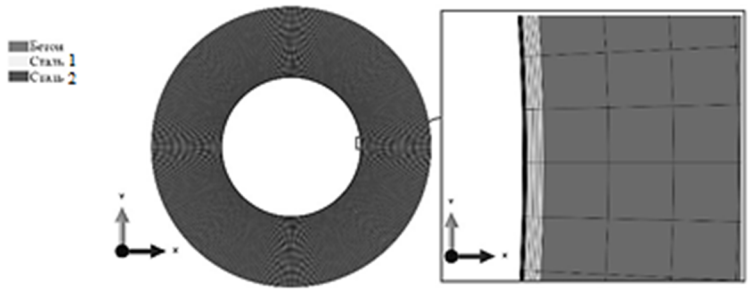


Рис. 1. Объект исследования: МОЦП с окружающим бетоном

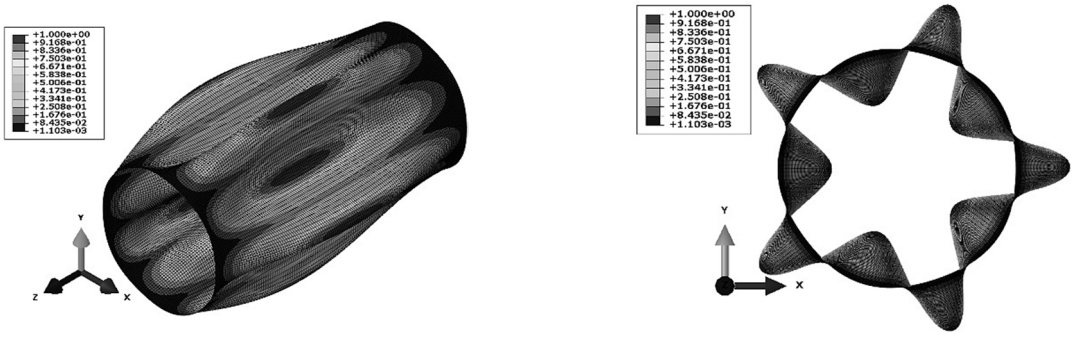
Для исследования устойчивости центральной полости применяется упрощение модели. На первом этапе решается задача Лямэ (плоская) для трехслойной конструкции [2,3]. В качестве действующих нагрузок используется температура 420°C, что соответствует температуре расплавленного свинца в режиме нормальной эксплуатации (НЭ). В результате, удается найти значение радиальных напряжений на границе раздела металла и бетона. Данное радиальное напряжение является сжимающим для металла, поскольку бетон имеет меньший коэффициент температурного расширения, чем сталь, что приводит к препятствованию расширения стальной конструкции. Значение полученных радиальных напряжений составляет 1.594 МПа.

Реальная конструкция центральной полости представляет собой трехступенчатую конструкцию разных диаметров, связанных конусными переходами. В данном исследовании объект исследования не содержит конусных переходов для упрощения геометрической модели. Общая высота составляет 14.35 м. В качестве граничных условий на нижней грани производится запрет осевых и окружных перемещений, а на верхней – запрет окружных перемещений. Разрешается радиальное перемещение конструкции. Важно отметить, что бетон исключен из модели на данном этапе. В качестве нагрузки рассматривается только давление 1.594 МПа, поскольку в данном давлении уже учтена информация о действующей температуре в конструкции.

Критерием обеспечения устойчивости конструкции принимается значение критической нагрузки в 2 раза превышающей действующую. В работе будут анализироваться коэффициенты отношения расчетной критической нагрузки к приложенной, который далее будет называться

коэффициентом устойчивости. Устойчивость считается обеспеченной при значении данного коэффициента большим или равным 2. В качестве представляемых результатов представляются формы потери устойчивости и анализируются значения коэффициента устойчивости [4].

На рисунке 2 представлена первая форма потери устойчивости.

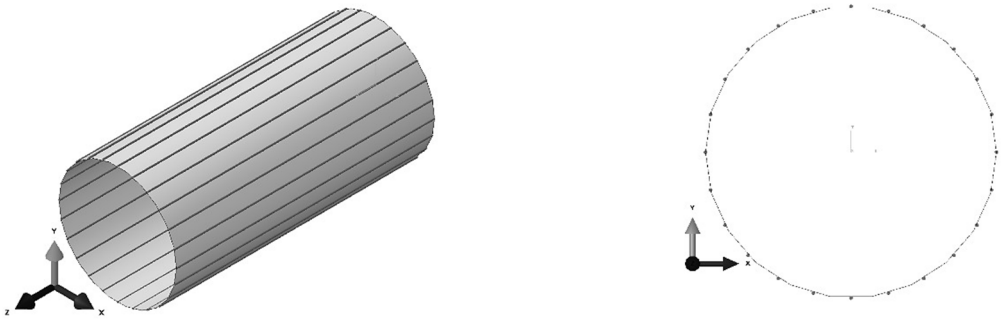


а) изометрия б) вид сверху

Рис. 2. Первая форма потери устойчивости

Значение коэффициента устойчивости, полученное при решении задачи, равно 0.311. Как видно из результатов упругая устойчивость конструкции не обеспечивается. На следующем этапе анализируются результаты при введении в конструкцию стрингеров и шпангоутов, повышающих жесткость конструкции [5].

Устойчивость подкрепленной двухслойной оболочки. Как видно из полученных результатов, количество полуволн на первой форме потери устойчивости составляет 10. В систему вводятся стрингеры так, чтобы они располагались в узлах и пучностях данных полуволн. Таким образом, количество стрингеров составляет 20, что представлено на рис. 3.



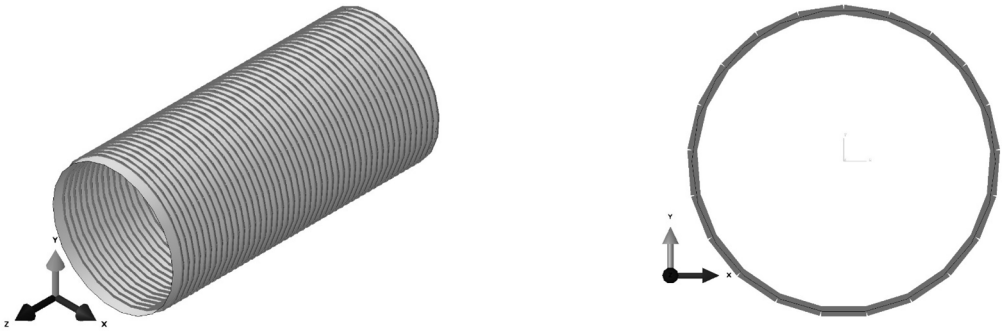
а) изометрия б) вид сверху

Рис. 3. МОЦП, подкрепленная стрингерами

Стрингеры моделируются стержнями, жестко связанными с оболочкой. При этом принимается, что они жестко заделаны по торцам, что обеспечивает большую жесткость на изгиб, чем у оболочки. Материалом стрингеров служит сталь, обладающая более жесткими характеристиками, чем сталь оболочки. Поперечное сечение принимается круглым с варьируемым значением радиуса (начальное значение принимается равным 2 см). В результате расчета значение коэффициента устойчивости составляет 0.339. Варьирование радиуса поперечного сечения стрингеров показывает, что коэффициент упругости 2.03 достигается при радиусе 29 см.

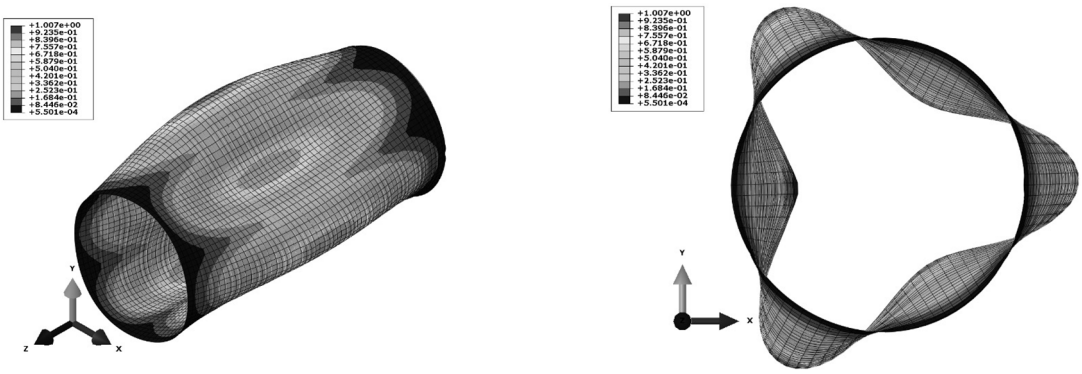
Иной способ задания подкрепления оболочки состоит в ведении в систему шпангоутов. Шпангоут представляет собой сцепливающий элемент между бетоном и сталью. В настоящее время кольцевые шпангоуты имеют толщину 16 мм. Проводится анализ упругой устойчивости модели центральной оболочки высотой 14.3 м в предположении отсутствия конусных переходов и равномерного распределения шпангоутов по высоте с шагом 300 мм, конструктивное решение разработчиков приведено на рис. 4.

В результате расчета коэффициент упругости составляет 3.4, что говорит об обеспечении упругой устойчивости в случае использования шпангоутов выбранной толщины с шагом по высоте 300 мм. На рис. 5 представлена форма потери устойчивости оболочки, подкрепленной шпангоутами.



а) изометрия б) вид сверху

Рис. 4. МОЦП, подкрепленная шпангоутами



а) изометрия б) вид сверху

Рис. 5. Первая форма потери устойчивости МОЦП, подкрепленной шпангоутами

Проверочный линейный статический расчет оболочки выбранного размера, подкрепленной шпангоутами, в условиях статического нагружения давлением со стороны бетона показывает, что пластических деформаций в оболочке не возникает и устойчивость действительно обеспечена.

Заключение. Получены результаты исследования устойчивости двухслойной МОЦП под действием тепловых и силовых нагрузок. Показана необходимость введения подкрепления оболочки с помощью стрингеров и/или шпангоутов. Доказано преимущество использование шпангоутов над использованием стрингеров. В качестве дальнейшего развития работы необходимо провести исследование устойчивости оболочки при введении в материалы свойств ползучести и пластичности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abaqus 6.13 Theory guide, Dassault Systèmes, 2013
2. **Кац А.М.** Теория упругости, Из-во: Лань, 2002. 71 с.
3. **Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем, Из-во: Наука,** Москва, 1967, 506 с.
4. **Тимошенко С.П.** Устойчивость упругих систем, Из-во технической литературы, Москва, 1946.
5. **Биргер И.А. Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич.** Расчет на прочность деталей машин. М., 1979. 702 с.

A.I. Filimokhina, V.S. Modestov, P.V. Fedorenko (Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, department of Mechanics and Control Processes). **Analysis of stability of reinforced ribbed shell**

Abstract. The problem of ensuring the stability of the metal shell is considered. The value of the stability coefficient of the structure is analyzed in the case of a reinforced and unsupported metal shell. The solution of the inverse problem is carried out when the properties of the supporting structures are supported by the available results of the solution of the problem and the requirements for ensuring the strength and stability of the structure.

УДК 681.51.015

Е.А. ШАРИНА, Ю.И. ЖУКОВ
(Санкт–Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург)

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ПЛАНИРУЮЩЕГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Рассматривается модель системы управления движением с использованием микроэлектромеханических элементов и исследуются точностные характеристики предлагаемых систем. Задачами для разработки математической модели системы автоматического управления движением планирующего подводного аппарата по курсу являются составление линейных дифференциальных уравнений движения, ввод функция управления и запись нелинейных дифференциальных уравнений для построения траектории движения. Инструментом исследования является система Matlab Simulink, результаты которой представлены в докладе.

Введение. Существующие ППА, как правило, маневрируют по глубине и не имеют системы управления движением по курсу. Это затрудняет мониторинг нефте и газопроводов. Учитывая ограниченные массогабаритные характеристики и большую автономность ППА, предлагается строить его системах управления движением на МЭМ элементах Задача решается с использованием математического и имитационного моделирования, результаты которого приводятся в докладе. Для расшифровки результатов мониторинга подводных трубопроводов ППА должен доставить полученные результаты в район старта. С учетом высокой автономности ППА к его системе управления движением по курсу предъявляются конкретные требования по точности. Традиционные приборы управления не могут быть размещены на борту ППА. В докладе рассматривается модель системы управления движением с использованием МЭМ элементов и исследуются точностные характеристики предлагаемых систем.

Математическая модель системы автоматического управления движением планирующего подводного аппарата. Основной целью исследования является разработка математической модели системы автоматического управления движением планирующего подводного аппарата по курсу. Для этого решаются следующие задачи:

- составление линейных дифференциальных уравнений движения ППА по курсу;
- ввод функций управления, обеспечивающих требуемое маневрирование ППА;
- запись нелинейных дифференциальных уравнений для построения траектории движения ППА.

Так как для иллюстрации точности строится траектория возврата ППА в точку старта, то в качестве примера представлена математическая модель [1] вычисления координат движения ППА по курсу:

$$\begin{cases} \xi(t)=\int_0^t V(\cos\beta(t)\cos\psi(t)+\sin\beta(t)\sin\psi(t))dt+\xi_0, \\ \xi(t)=\int_0^t V(\cos\beta(t)\cos\psi(t)+\sin\beta(t)\sin\psi(t))dt+\xi_0. \end{cases} \quad (1)$$

где V – линейная скорость движения ППА; $\beta(t)$, $\psi(t)$ – углы дрейфа и курса ППА, которые получают из математической модели объекта управления.

Инструментом исследования является система Matlab Simulink. Один из вариантов структурной схемы моделирования приведен на рис. 1. В результате варьирования параметров управляющих функций и статических характеристик приборов управления достигнут удовлетворительный результат возврата ППА в точку его старта при решении задами мониторинга подводного трубопровода, результаты которого в виде траектории движения приведены на рис. 2.

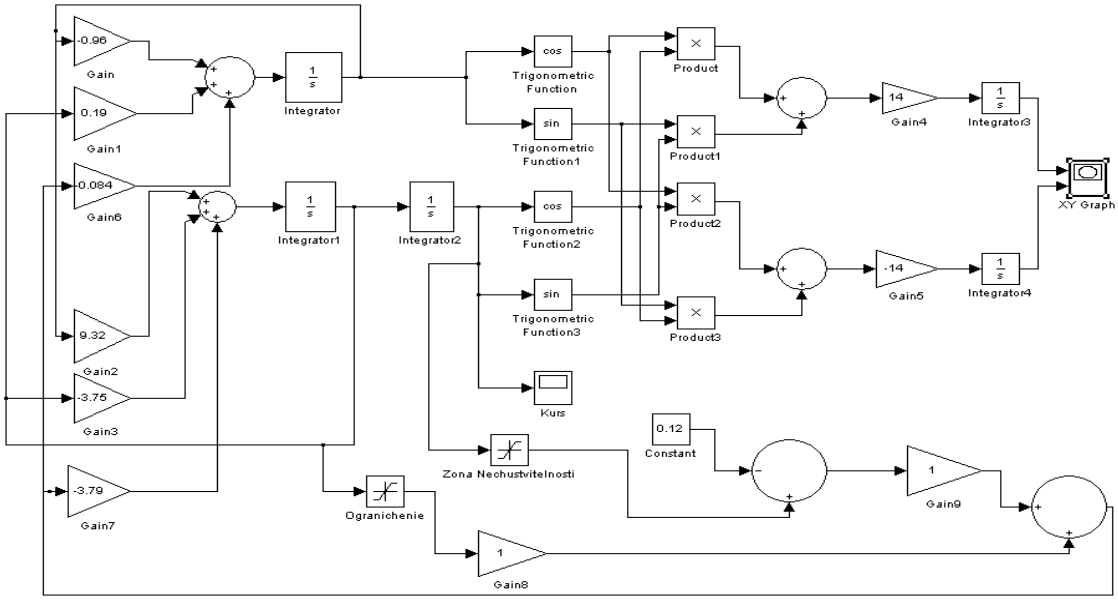


Рис. 1 Структурная схема моделирования управляемого движения планирующего подводного аппарата в инструментальной среде Matlab Simulink

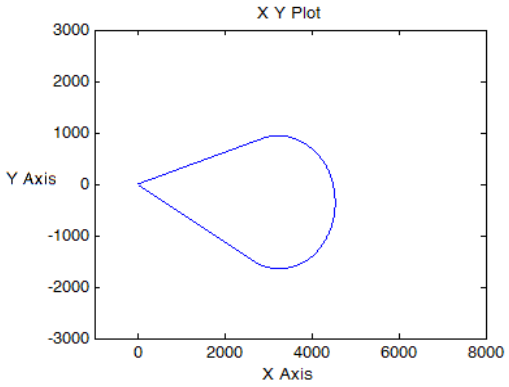


Рис. 2 Траектория возврата планирующего подводного аппарата в точку старта по курсу

Заключение. Была разработана математическая модель системы автоматического управления движением планирующего подводного аппарата по курсу, инструментом исследования которой являлась система Matlab Simulink. Результаты моделирования дают основание утверждать, что может быть достигнута средняя точность движения планирующего подводного аппарата по курсу с использованием МЭМ датчиков курса и угловой скорости в системе управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Жуков Ю.И.** Компьютерное моделирование морских автоматических средств движения. СПб.: СПбГМТУ, 2013. 169 с.
2. **Иконников И.Б./под.ред.** Самоходные необитаемые подводные аппараты. Л.: Судостроение, 1986. С. 234–255.
3. **Nodeland W.E., Ewart T.E., Bendiner W.P.** “Spurv-II” an unmanned, free swimming submersible development for oceanographic research, Ocean-81, Boston,1981, v.1p.92.

E.A. Sharina, Y.I. Zhukov (Saint – Petersburg state marine technical University, Saint-Petersburg). **Microelectro-mechanical systems traffic control planning of underwater vehicle.**

Existing planning underwater vehicles (PAP), as a rule, maneuvering depth and have no traffic management system (DMS) for the course. This makes it difficult to monitor oil and gas pipelines. Given the limited weight and dimensions and great autonomy of the PPA, it is proposed to build the COURT on microelectromechanical (MEM) elements, the Problem is solved using mathematical and simulation modeling, the results of which are presented in the report.

УДК 681.787

С.Б. БЕКБАУОВА, Н.А. НИКОЛАЕВА
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОГО КОНФОКАЛЬНОГО РЕЗОНАТОРА

Анализируется влияние на характеристики одной из возможных конфигураций кольцевого конфокального резонатора внешних воздействий, которые резонатор может испытывать при работе в составе миниатюрного оптического резонаторного гироскопа. При исследовании кольцевого конфокального резонатора используется пакет мультифизического моделирования OOFELIE:Multiphysics.

Введение. Спектр открытого кольцевого резонатора, состоящего из p повторяющихся периодов, определяется следующим выражением [1, 2]:

$$\nu_{nmq} = \frac{c}{L}\left[q + \frac{p}{2\pi}\left(n+\frac{1}{2}\right)\arccos\left(\frac{A_1+D_1}{2}\right) + \frac{p}{2\pi}\left(m+\frac{1}{2}\right)\arccos\left(\frac{A_2+D_2}{2}\right) + \frac{1}{2}\varepsilon\right], \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме; L – оптическая длина осевого контура резонатора; q – продольный и m, n – поперечные индексы мод; $A_{1,2} + D_{1,2}$ – сумма диагональных элементов лучевых матриц в плоскости резонатора и в перпендикулярной ему плоскости соответственно; ε – коэффициент, равный нулю при четном числе зеркал. В общем случае спектр кольцевых резонаторов имеет гребенчатую форму. При выполнении $A_{1,2} + D_{1,2} = 0$, что наблюдается, в частности, у кольцевых конфокальных резонаторов, спектр вырождается и становится эквидистантным. Такие резонаторы можно использовать в качестве чувствительных элементов оптических резонаторных гироскопов [3]. В первом приближении кольцевой конфокальный резонатор можно получить, используя в его составе несколько отражающих поверхностей: плоские и вогнутые тороидальные (хотя бы одна) с радиусами кривизны в двух главных меридиональных сечениях обеспечивающими выполнение условия конфокальности и вырождение спектра [4].

Работа посвящена анализу влияния на характеристики такого резонатора внешних воздействий, которые он может испытывать при работе в составе компактного оптического резонаторного гироскопа: вращение вокруг с угловой скоростью Ω = 300 рад/с; движение с линейным ускорением 100 g; изменение температуры от 20 °C до 50 °C и от 20 °C до -60 °C.

Модель кольцевого конфокального резонатора. В графическом редакторе программы OOFELIE:Multiphysics была построена модель кольцевого конфокального резонатора закрепленного из фторида кальция на квадратной медной пластинке (рис. 1). Был задан кольцевой конфокальный резонатор в виде призмы, с одной торообразной отражающей поверхностью 2 и с тремя плоскими отражающими поверхностями 1, 3 и 4 (см. рис. 2). Геометрические параметры резонатора: расстояние между отражающими поверхностями a = 15 мм; ширина отражающих поверхностей b = 5 мм; толщина призмы c = 5 мм; радиусы кривизны торообразной поверхности $R_1 \approx$ 121 мм и $R_2 \approx$ 61 мм. Сторона медной пластинки 30 мм, а толщина 1 мм. Модель разбита сеткой конечных элементов (рис. 1). Максимальная длина ребер конечных элементов у пластинки 0,5 мм, а у призмы резонатора 0,2 мм. Так как, результатами моделирования являются механические деформации резонатора, исходя из величины которых вычисляются оптические характеристики, то указанной дискретизации до-

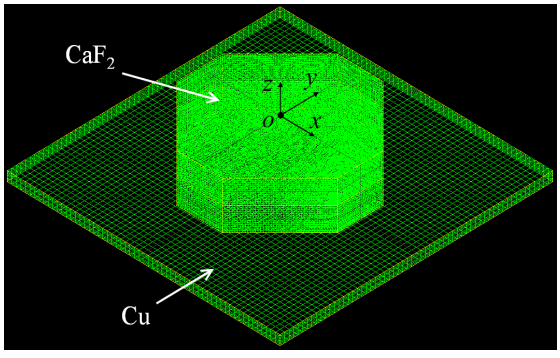


Рис. 1. Модель кольцевого конфокального резонатора

Научный руководитель к.т.н., ассистент каф. Шалымов Е.В.

статочно для сходимости результатов по сетке. В модели введена декартовая система координат *oxyz*: ось *oz* совпадает с нормалью к медной пластинки; *oy* направлена на торообразную поверхность.

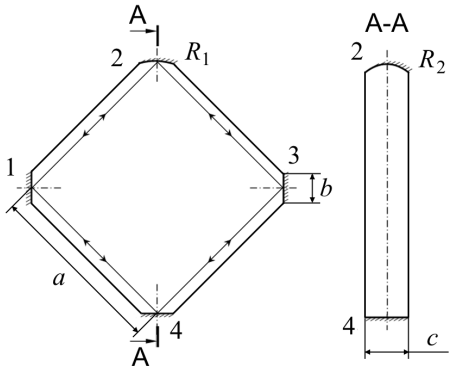


Рис. 2. Параметры кольцевого конфокального резонатора

Влияние внешних воздействий. В начале, моделировалось вращение резонатора вокруг оси *oz* с $\Omega = 300$ рад/с. При этом отражающие поверхности слегка наклоняются, форма отражающих поверхностей практически не искажается, а длина осевого контура резонатора изменяется на величину $\Delta L \approx 2.1\times10^{-9}$ м.

Очевидно, что у рассматриваемого резонатора из-за изменения длины осевого контура полусумма элементов главной диагонали лучевых матриц станет отличной от нуля и изменится на величину:

$$1 - (L + \Delta L)/L. \qquad (2)$$

В результате вырожденные по частоте моды сдвинутся относительно фундаментальных поперечных мод на величину $\Delta\nu$, что, в частности, ведет к снижению добротности резонатора и может привести (если $\Delta\nu$ превышает или близка к ширине спектральной линии фундаментальной продольной моды) к отмене вырождения спектра резонатора.

Исходя из (1) и (2), вращение резонатора с $\Omega = 300$ рад/с вызовет $\Delta\nu \approx 54$ Гц. При добротности резонатора $Q = 10^9$ указанный сдвиг частот незначительно снижает ее величину до 9.997×10^8.

Далее моделировалось движение с линейным ускорением 100 g вдоль оси *oz* и в плоскости резонатора. В первом случае длина осевого контура изменяется на $\Delta L \approx -1.0\times10^{-9}$ м, $\Delta\nu \approx 26$ Гц, а изменение добротности пренебрежимо мало. Во втором случае длина осевого контура изменяется на $\Delta L \approx 10^{-16}$ м, $\Delta\nu$ и изменение добротности пренебрежимо малы. Но при равноускоренном движении наблюдаются изменения формы и наклона отражающих поверхностей, что может привести к изменению оптических свойств резонатора. Это планируется исследовать в будущем с использованием адаптированного для кольцевых резонаторов метода Фокса и Ли [5].

Также моделировались влияние изменения температуры от 20°C до 50°C и от 20°C до –60°C. При этом отражающие поверхности значительно наклоняются и деформируются, а длина осевого контура изменяется, соответственно, на $\Delta L \approx 21\times10^{-6}$ м и $\Delta L \approx -56\times10^{-6}$ м. При добротности резонатора $Q=10^9$ сдвиги частот значительно превышают ширину его спектральной линии и спектр из эквидистантного превращается в гребенчатый.

Заключение. С использованием компьютерного моделирования проанализировано влияние на характеристики одной из возможных конфигураций кольцевого конфокального резонатора внешних воздействий, которые резонатор может испытывать при работе в составе миниатюрного оптического резонаторного гироскопа. При вращении с угловой скоростью 300 рад/с или движении с линейным ускорением 100 g сохраняется вырождение спектра. Однако при этом наблюдаются некоторые изменения формы и наклона отражающих поверхностей, которые могут привести к изменению оптических свойств резонатора. Это планируется исследовать в последующих работах по данной тематике. При изменении температуры окружающей среды от 20 °C до 50 °C или от 20 °C до -60 °C спектр превращается в гребенчатый и в этом случае резонатор нельзя использовать в качестве чувствительного элемента оптического резонаторного гироскопа. Выходом из данной ситуации является либо термостабилизация резонатора, либо изменение конструкции и материала резонатора. Например, можно составить кольцевой конфокальный резонатор из нескольких зеркал или призм, закрепленных на корпусе из термостабильного материала [6].

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований в рамках гранта № 18-38-00699.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kogelnik H., Li T.** Laser beams and resonators. Appl. Opt. 1966. Vol.5. №10, 1550-1567.
2. **Быков В.П., Силичев О.О.** Лазерные резонаторы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 104-107.
3. **Filatov Y.V., Sevryugin A.A., Shalymov E.V., Venediktov V.Y.** Frequency properties of the confocal ring cavity. Optical Engineering. 2015. Vol. 54. № 4. P. 044107.
4. **Шалымов Е.В.** О вырождении поперечных мод в кольцевом конфокальном резонаторе. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 4. С. 64–68.
5. **Gorelaya A.V., Filatov Yu.V., Shalymov E.V., Venediktov V.Yu.** Investigation of properties of the confocal ring resonators. Proc. SPIE, 2017. 10438, 104380J.
6. **Filatov Yu.V., Gorelaya A.V., Shalymov E.V., Venediktov V.Yu.** Optical gyros operating using the phase characteristic of the ring confocal resonator. Proc. SPIE, 2018. 10821, 108210B.

S.B. Bekbauova, N.A. Nikolaeva (St.-Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, St.-Petersburg) **Evaluation of the influence of external influences on the characteristics of the ring confocal resonator**

Abstract. The influence on the characteristics of one of the possible ring confocal resonator configurations of external influences that the resonator may experience when working as part of a miniature optical resonator gyroscope is analyzed. The multiphysical simulation package OOFELIE:Multiphysics is used to study the ring confocal resonator.

УДК 681.7.062.2

В.И. ПАТЛАН, И.С. РАЗУВАЕВА
(Балтийский государственный технический университет «Военмех» имени Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург)

СКАНИРУЮЩЕЕ ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЕ МИКРОЗЕРКАЛО НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Рассматривается возможность создания сканирующего устройства дорожного полотна на основе широкоапертурного сканирующего микрозеркала. Определен закон движения микрозеркала с учетом принципа электромагнетизма и стремлением к миниатюризации конструкции.

Введение. С 18-ого века, когда произошла промышленная революция, человечество стало активно стараться упростить – автоматизировать – свою жизнь. Суть автоматизации заключается в передаче функций управления и контроля от человека к механизму. Одним из самых активных направлений автоматизации в современной жизни являются беспилотные технологии в автомобильной технике. Ключевая составляющая системы беспилотного управления – это сканирующее устройство. Чаще всего сканер представляет собой ЛИДАР (LIDAR – Light Identification Detection and Ranging – идентификация, детектирование и определение расстояния при помощи света), встроенный в беспилотный автомобиль и осуществляющий в реальном времени распознавание и анализ дорожного полотна и окружающей обстановки в заданном секторе. Одним из возможных конструктивных решений является микрозеркало, спроектированное как микроэлектромеханическая система (МЭМС). В отличие от большинства аналогичных разработок предлагаемая конструкция предполагает существенно больший угол обзора и увеличенную апертуру при малых габаритах. Работа посвящена разработке электромагнитного микрозеркала, применяемого в составе сканирующих устройств систем беспилотного управления.

Разработка микрозеркала. Для эффективного сканирования дорожного полотна детектор должен обладать высокой частотой сканирования, большой апертурой и широким сектором обнаружения.

Для увеличения скорости сканирования предлагается использовать МЭМС-зеркало, основанное на принципе электромагнетизма. Хотя одни из самых распространенных МЭМС основываются на термоэлектрическом принципе: из-за разницы коэффициентов линейного термического расширения двух слоев из различных материалов при нагреве происходит контролируемый изгиб – они имеют меньшие рабочие частоты, так как их работа связана с постоянной тратой времени на нагрев и охлаждение. Принцип работы разрабатываемого электромагнитного микрозеркала основан на использовании магнитного поля от двух постоянных магнитов и катушки с переменным током.

Большая апертура необходима для уменьшения паразитных сигналов, например, от кристалликов льда, во время снегопада, при этом ее размер должен быть больше, чем фальшивые препятствия – снежинки. Также для сканирующего устройства важен сектор обнаружения, представляющий собой область, в которой происходит детектирование. Углы отклонения зеркала обеспечиваются прочностью и способностью материалов скручиваться под действием внешней силы и возвращаться в исходное состояние при снятии нагрузки; поэтому в качестве материала подложки был выбран кремний. На подложку напыляется отражающее покрытие, которое было выбрано золотым, так как сканер должен быть безопасным для глаз человека, то есть иметь длину волны порядка 1,5 мкм. С двух сторон от подложки отходят торсионы, которые обеспечивают наклоны зеркала.

Микрозеркало совершает колебания по закону, описываемому следующим уравнением [1]:

$$I \cdot \ddot{\theta} + D \cdot \dot{\theta} + K \cdot \theta = M, \qquad (1)$$

где I – момент инерции; $\ddot{\theta}$ – угловое ускорение; D – коэффициент затухания; $\dot{\theta}$ – угловая скорость; K – жесткость торсиона; θ – угол отклонения.

При решении дифференциального уравнения закона движения была получена зависимость угла наклона зеркала от времени, представленная на рис. 1.

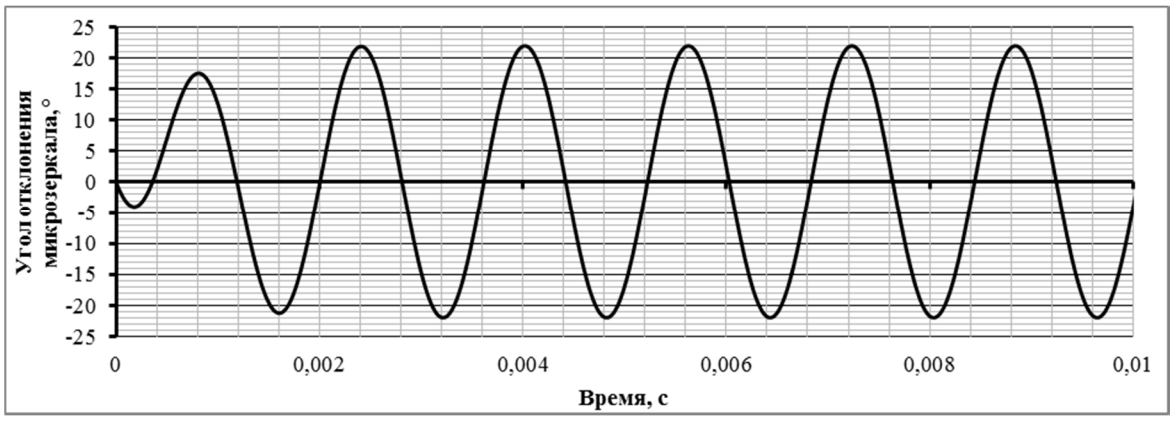


Рис. 1. Закон колебания микрозеркала

Эффективность осцилляций – величина максимального отклонения микрозеркала – зависит от частоты колебаний переменного тока. Закон колебаний, показанный на рис. 1 характерен для зеркала, колеблющегося на резонансной частоте. Зависимость максимального угла отклонения зеркала от частоты колебаний при прочих равных параметрах представлена на рис. 2. Внешний вид микрозеркала представлен на рис. 3.

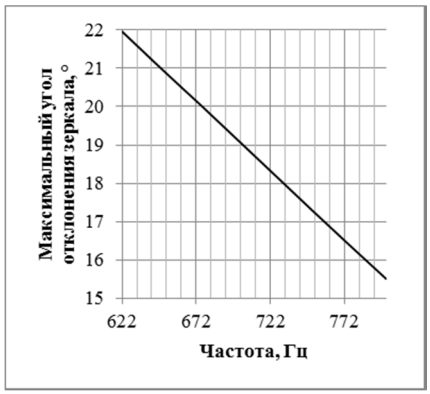


Рис. 2. Зависимость максимального угла отклонения зеркала от частоты колебаний

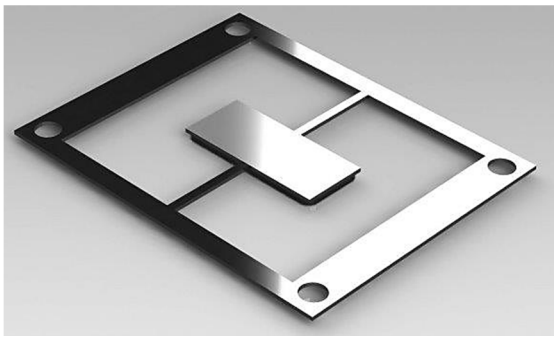


Рис. 3. Внешний вид микрозеркала

Заключение. Разработанное микрозеркало имеет апертуру пучка 5,5 мм. При подаче на катушку микрозеркала переменного тока с частотой 622 Гц, равной резонансной частоте, полный оптический угол сканирования составляет 88° (отклонение зеркала составляет 22°). Угол отклонения зеркала не превышает максимально возможного 22,8°, рассчитанного в соответствии с теорией сопротивления материалов [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. Liangchen Ye, Gaofei Zhang, Zheng You. Large-Aperture kHz Operating Frequency Ti-alloy Based Optical Micro Scanning Mirror for LiDAR Application. [Текст] / Liangchen Ye, Gaofei Zhang, Zheng You // micromachines. - 2017. - 10 апреля. - 14 с.
2. Биргер И. А. Сопротивление материалов [Текст]: Учебное пособие / И. А. Биргер, Р. Р. Мавлютов. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.- 560 с.

V. I. Patlan, I. S. Razuvaeva (Baltic State Technical University “Voenmeh” D.F. Ustinov, Saint Petersburg). **Micro-scanning oscillating mirror based on electromagnetics**

Modern technological development trends of society lead to the developed devices’ miniaturization. An example of this direction is microelectromechanical systems, which can be used in lidar systems for detecting and determining the range of objects. In this paper we discuss about the possibility of creating a large-aperture scanning micromirror.

Статистика конференций молодых ученых «Навигация и управление движением»

Год проведения конференции	Дата проведения	Количество участников	Количество докладов (лекций)	Количество докладов (лекций) в сборнике	Количество организаций	Количество городов
1999	6-7 апреля	110	35 (4)	21 (4)	8	2
2000	28-30 марта	154	58 (6)	32 (6)	19	8
2001	12-14 марта	159	61 (3)	32 (2)	25	11
2002	12-14 марта	188	74 (4)	40 (3)	27	10
2003	11-13 марта	183	83 (3)	37 (2)	32	15
2004	16-18 марта	207	87 (4)	44(2)	30	13
2005	15-17 марта	229	83 (4)	47(2)	24	9
2006	14-16 марта	245	98 (4)	58(2)	34	12
2007	13-15 марта	235	106 (3)	57(2)	30	10
2008	11-14 марта	221	100 (3)	68(3)	41	15
2009	10-12 марта	240	99 (4)	60(4)	32	10
2010	16-19 марта	282	127 (3)	58(2)	44	14
2011	15-18 марта	292	138 (3)	59(3)	46	17
2012	13-16 марта	306	141 (3)	72(3)	41	16
2013	12-15 марта	302	141, из них 1 обзорный (3)	63(3)	48	13
2014	11-14 марта	318	135 (4)	58(2)	41	10
2015	17–20 марта	332 (в т.ч. 8 зарубежных)	155(4)	78(3)	38 (в т. ч. 2 зарубежных)	14 (в т. ч. 2 зарубежных)
2016	15-18 марта	353 (в т.ч. 14 зарубежных)	182(4)	95 (2)	46 (в т.ч. 3 зарубежных)	20 (в т.ч. 3 зарубежных)
2017	14-17 марта	313 (в т.ч. 6 зарубежных)	149 (4)	91 (3)	40 (в т.ч. 3 зарубежных)	17 (в т.ч. 3 зарубежных)
2018	20-23 марта	400	153 (4)	145 (4)	55 (в т.ч. 5 зарубежных)	18 (в т.ч. 8 зарубежных)
2019	19-22 марта	389 (в т.ч. 11 зарубежных)	151 (3)	127 (3)	36 (в т.ч. 5 зарубежных)	11 (в т.ч. 6 зарубежных)