



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
XXV ЮБИЛЕЙНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

*Научный редактор
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН О. А. Степанов*

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

Санкт-Петербург
2023

Навигация и управление движением. Материалы XXV Юбилейной конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием / Науч. редактор член-корр. РАН, д.т.н., проф. О.А.Степанов / Под общ. ред. академика РАН В.Г.Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2023. 365 с. ISBN 978-5-91995-099-8

Настоящий сборник содержит материалы XXV Юбилейной 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 21 по 24 марта 2023 г. в ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». В сборник включены 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

член-корреспондент РАН, д.т.н., проф. О.А. Степанов	– Председатель , АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
к.т.н. Ю.А. Литвиненко	– Заместитель председателя , АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
д.ф.-м.н. М.А. Барулина	Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов
д.т.н., проф. А.А. Бобцов	Университет ИТМО, С.-Петербург
д.т.н., проф. А.М. Боронахин	Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
к.т.н. Е.А. Депутатова	Филиал ФГУП «НПЦАП» - «ПО «Корпус», Саратов
к.т.н. Д.П. Елисеев	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
к.т.н. А.С. Кремлев	Университет ИТМО, С.-Петербург
член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., проф. Н.В. Кузнецов	Санкт-Петербургский государственный университет
к.т.н. А.В. Лопарев	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
к.т.н. А.В. Моторин	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
д.т.н., проф. А.А. Пыркин	Университет ИТМО, С.-Петербург
д.т.н., проф. В.Я. Распопов	Тульский государственный университет
к.т.н. Д.О. Тарановский	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург
д.т.н., проф. Ю.В. Филатов	Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
д.т.н., проф. И.Б. Фуртат	Институт проблем машиноведения РАН, 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

О.М. Яшникова	– Председатель , АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
Л.Г. Кутлугульдина	– заместитель председателя , АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург
В.В. Богомолов	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург
Н.Л. Гора	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург
А.А. Зуева	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург
Е.Н. Климова	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
Е.Г. Литуненко	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург
Н.Ю. Скиданова	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург
С.М. Тарасов	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург
М.А. Тит	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург

**ЮБИЛЕЙНАЯ XXV КОНФЕРЕНЦИЯ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ»
с международным участием**

От программного и организационного комитетов XXV конференции молодых ученых
«Навигация и управление движением»12

Лекция. Ф.Л. Черноусько

Алгоритмы переориентации тела при помощи внутренних подвижных масс14

Секция 1.

БЕСПИЛОТНЫЙ ТРАНСПОРТ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

М.Д. Кузнецов

Управление квадрокоптером с гарантией нахождения выходного сигнала в заданных
границах пространства состояний16

Г.Р. Сайпулаев

Влияние конструкции механум-колес и структуры контактных сил на точность управления
мобильным роботом-манипулятором KUKA youBot20

М.Ж. Фернанду

Разработка мобильного механум-робота со встроенной системой цветового зрения для
преследования объекта23

А.Н. Алексеев, Е.С. Земляной, К.А. Чеканов

Посадка крылатого беспилотного летательного аппарата на взлетно-посадочную полосу
по особым точкам26

М.С. Салимов, Г.Р. Сайпулаев

Программное управление движением двухколесного робота с использованием
пропорционально-дифференциального регулятора при разных моделях трения29

А.С. Гиззатов, В.Ф. Иванов

Привязка координат подвижного состава к цифровой модели пути32

К.К. Козюра

Алгоритм одометрии мобильного робота с приводом Аккермана35

З.Х. Нгуен, В.В. Путов

Моделирование и исследование движения беспилотных летательных аппаратов типа
трикоптера с поворотными винтами38

С.А. Сухоруков

Позиционирование электропоезда на платформах остановочных пунктов по данным лидара....42

М. Мохрат

Алгоритм для 3D-реконструкции внутреннего пространства на основе глубокой нейронной сети, основанный на методе Multi-View Stereo 44

Ж. Махмуд, А.А. Пеньковский

Система робастной визуально-инерциально-колесной одометрии для мобильных роботов внутри помещений 46

А.А. Шабашов, А.А. Плотников

Разработка методики синтеза контура стабилизации беспилотного летательного аппарата на основе квазилинейной модели с изменяющимися параметрами 49

Д.П. Михайлов, А.А. Цуканов, А.И. Закиева, Е.В. Илатовская

Система управления малым беспилотным летательным аппаратом с управляемым вектором тяги 52

А.А. Пеньковский

Алгоритм робастной нелинейной оптимизации для системы визуально-инерциальной одометрии в динамических средах 55

Н.И. Кавонкин

Стенд для отладки алгоритмов удаленного управления движением судов 58

А.А. Черников

Портативный программно-аппаратный комплекс контроля полетов беспилотных летательных аппаратов 61

Секция 2.

ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Е.Д. Иванова

Влияние геометрии электродов подвеса на уходы электростатического гироскопа 63

Е.А. Якушина, В.В. Святой

Влияние изменения температуры на работу маятникового компенсационного акселерометра 66

О.Г. Андреасян, С.О. Васецкий

Исследование прочностных характеристик чувствительного элемента микро-опто-электромеханического акселерометра 69

В.С. Игумнова, А.В. Лукин

Нелинейная динамика контура первичных колебаний микромеханического гироскопа при действии систем фазовой автоподстройки частоты и автоматической регулировки усиления 71

Н.В. Можгова, А.В. Лукин

О модальной локализации параметрических колебаний в системе слабосвязанных микробалочных резонаторов при электротепловом возбуждении 75

П.П. Удалов, И.А. Попов

Модель микромасштабного индукционного левитирующего подвеса 79

Д.А. Гонтарь, Е.В. Драницына Метод снижения эластооптического смещения нуля волоконно-оптического гироскопа	83
Д.С. Стрельцов Способ возбуждения стоячей волны в волновом твердотельном гироскопе	86
Л.Е. Кочегизова, С.В. Фетисов, А.С. Малюгин, Д.И. Мартыненко, Д.С. Вахлярский Модель твердотельного волнового гироскопа в среде Simulink.....	88
Н.В. Тихменев, С.И. Назаров, А.А. Ушанов Исследование виброустойчивости лазерного гироскопа с линейной поляризацией генерируемого излучения	91
В.В. Чалков Способ минимизации взаимного влияния лазеров накачки и детектирования при настройке оптической схемы ядерного магнитного гироскопа	94

Секция 3.

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ В ШКОЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ

А.А. Голованова Разработка методики измерений магнитного поля в помещении с помощью встроенных датчиков мобильного телефона	97
А.С. Герасимов Алгоритм построения карты магнитного поля по измеренным величинам	98
Ф.К. Дарманчев Визуализация колебаний магнитных полей.....	99
Е.Д. Котлярова Корреляционно-экстремальный алгоритм навигации в помещении по магнитному полю	100
Д.Д. Синикова Разработка веб-приложения для ориентации в пространстве по магнитным полям	101
А.В. Балакирский Реализация алгоритмов распознавания, навигации и управления с использованием библиотеки компьютерного зрения OpenCV на примере игры «Арканоид»	102
К.В. Гриценко, Д.В. Коробицына Сравнение релейного и пропорционального регулятора при управлении движением роботов	103
К.В. Гриценко, В.И. Ведерников Исследование математических операций и алгоритмов для управления движением роботов	104
И.В. Панарина, М.А. Маслов, А.А. Муравицкий Устройство экспериментального стенда для определения калибровочных характеристик навигационного прибора фотосекстан	105

К.Д. Диновецкий

Анализ динамических характеристик системы автоматического управления прецизионным стендом с волоконно – оптическим гироскопом в качестве инерциального чувствительного элемента.....106

Д.Д. Хохлова

Создание прототипа устройства со встроенной GPS-системой и портативным аккумулятором для туристических походов, способного получать электроэнергию из человеческого тела.....107

П.А. Буланов, И.П. Меркурьев, М.П. Мышко

Выявление утечек бесцветных газов методами компьютерного зрения108

**Секция 4.
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ**

С.М. Тарасов

Алгоритм определения погрешностей привязки данных автоматизированного астрономического универсала к шкале всемирного времени109

А.Н. Дзюба

Алгоритм определения углов ориентации визирной оси астрокорректора на качке113

А.А. Муравицкий, С.А. Захаров

Содержание понятия калибровочных характеристик навигационного прибора фотосекстана117

М.А. Самадов, П.Н. Николаев

Разработка алгоритма идентификации звездных образований для малогабаритного звездного датчика.....120

С.А. Тимочкин, А.В. Бездетко

Анализ подходов к определению уклонения отвесной линии инерциально-геодезическим методом122

Н.Д. Богданов, М.А. Белоусов

Малогабаритный блок чувствительных элементов с настраиваемой системой амортизации125

Усков Е.Д

Разработка тепло-механической модели цифрового двойника бесплатформенной инерциальной навигационной системы на волоконно-оптических гироскопах127

**Секция 5.
ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

Я.В. Раудонис

Двухосная система управления гиросtabilизатором гравиметра на волоконно-оптических гироскопах130

А.С. Сырчина Применение диаграммы Вышнеградского для синтеза регулятора индикаторного гиросtabilизатора.....	133
М.Ю. Лобачев Аналитическая оценка полосы захвата системы фазовой автоподстройки частоты	136
Е.Д. Акимова, Н.В. Кузнецов Развитие метода годографа Цыпкина для анализа колебаний и устойчивости в релейных системах	139
С.А. Меркурьев Исследование взаимовлияния упругих и гидродинамических колебаний на движение тяжелого космического аппарата.....	142
Е.В. Саранченкова Исследование влияния гидродинамических параметров бака горючего на колебания жидкого наполнения бака в окислителе разгонного блока	145
И.С. Тренёв Линеаризация обратной связью нелинейных систем с помощью нейросетей	147
Е.А. Копысова Модификация линейных законов управления для повышения качества регулирования в установившемся режиме.....	150
Б.Х. Нгуен Управление линейными объектами на базе наблюдателя с гарантией нахождения регулируемой переменной в заданном множестве	153
Б.Х. Нгуен Управление объектами с секторной нелинейностью с гарантией нахождения регулируемой переменной в заданном множестве	156
К.К. Нгуен Применение метода DREМBAO для наблюдателя магнитного потока и скорости вращения ротора асинхронного двигателя.....	159
О.А. Козачёк, Н.А. Николаев Адаптивный наблюдатель состояния нелинейной системы с частично неизвестной матрицей состояния и запаздыванием выходного сигнала	163
D.L. Hoang Synthesis and compare the control laws for two-wheeled self-balancing vehicle.....	166
А.А. Кузнецов, В.Н. Шелудько, М.А. Чернышев Методы управления нелинейными объектами в условиях неопределенности	169
Н.С. Колесник Адаптивное управление с гарантированным нахождением управляемого сигнала в заданном множестве.....	172
М.М. Липкович Критерий Попова в задаче адаптивной абсолютной стабилизируемости.....	174

П.П. Удалов, И.А. Попов

Методика синтеза алгоритмов управления тепловым состоянием приборов и устройств с помощью термоэлектрических преобразователей177

Секция 6.

ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИБОРОВ НАВИГАЦИИ

Т.В. Басова

Разработка и внедрение метода операционного контроля заготовок и режущего инструмента на оборудовании с числовым программным управлением для изготовления корпусов гидрораспределителей182

М.А. Власова, А.Н. Шевченко

Исследование зависимости коэффициента подавления магнитного экрана от амплитуды переменного магнитного поля субгерцовой частоты185

Д.В. Глита

Технология световодов с предельно низкими оптическими потерями188

О.А. Евстафьев

Применение нейросетевых технологий в задаче обнаружения и классификации поверхностных дефектов листового проката192

С.А. Юдин

Определение рациональных режимов обработки технологической операции доводки плоских поверхностей.....196

М.А. Тит, С.Н. Беляев

Моделирование процесса формообразования тонкопленочных функциональных структур на узлах гиросприборов.....199

А.С. Завитаев, М.И. Евстифеев

Технологические особенности проектирования ядерного магнитного гироскопа202

Н.С. Каранин, О.С. Юльметова

Моделирование тепловых процессов глубокого реактивно-ионного травления чувствительного элемента микромеханического акселерометра205

Секция 7.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

Е.Г. Литуненко, Ю.М. Скородумов, Е.В. Лукоянов, Д.Ю. Поляков

Модель сети автономных необитаемых подводных аппаратов208

С.С. Варванин, Е.Г. Литуненко, Р.Л. Крючков, А.Е. Панарин

Организация надежного информационного обмена в мультиагентной системе с использованием звукоподводного канала связи211

Р.Л. Крючков, Е.В. Лукоянов, Ю.М. Скородумов Подходы к диагностированию систем обработки информации и управления автономных необитаемых подводных аппаратов	215
В.С. Тюльников, А.М. Грузликов Модели распределенных вычислений для описания бортовых систем реального времени	219
В.С. Тюльников, А.П. Павлов Решение задачи назначения с использованием модели распределенных вычислений на основе временной сети Петри	222
Е.И. Мосейко, В.Е. Ершов Использование мультиагентных технологий для повышения качества сервиса навигации в условиях неопределенности	225
И.У. Зарипов, А.А. Ширяев, И.А. Копылов Разработка программного обеспечения контроля и оценивания бортовых навигационных систем в реальном времени в летных испытаниях.....	229
А.Ю. Федоринов, М.А. Епринцев Опыт разработки виртуальной аэрометрической системы.....	232
С.В. Окуньков, И.В. Улитин, М.А. Барулина Влияние несбалансированного датасета на результаты решения задачи мультиклассовой классификации.....	235
И.В. Улитин, С.В. Окуньков, Е.В. Внуков Методы решения задач классификации изображений в градациях серого.....	238
А.В. Астафьев, А.С. Астафьев, О.С. Астафьева Разработка алгоритма позиционирования радиоустройства на основе информации о состоянии канала связи, трилатерации и искусственных нейронных сетей.....	241
И.Н. Коц, А.С. Исаева, М.А. Денисенко Использование сверточной нейронной сети для определения типа дорожного полотна с помощью микрофона.....	244
А.А. Кильдибекова Метод составления обучающей выборки для решения задач классификации изображений.....	246
Д.Д. Девяткин Сравнение методов классического и глубокого обучения при решении задачи классификации.....	249

Секция 8. ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В.В. Богомолов Позиционирование подводного аппарата по дальностям до гидроакустических маяков с уточнением результатов по данным, предшествующим первому навигационному решению	252
---	-----

А.М. Исаев, В.В. Богомолов Рекуррентные итерационные алгоритмы, использующие разложение нелинейных функций в ряд Тейлора.....	258
М.Н. Михайлов, В.П. Золотаревич Разработка алгоритма калмановского типа с применением рекуррентных нейронных сетей для нелинейных задач фильтрации.....	265
Ч.И. Нгуен, К.Х. Нгуен Метод подавления случайных шумов инерциальных датчиков на основе комплексирования AR модели и фильтра Калмана типа SRUKF с использованием SAGE-окна для сокращения времени начальной выставки БИНС в режиме гироскопасирования.....	268
Д.А. Гонтарь, Е.В. Драницына Сравнительный анализ методов идентификации параметров стохастических составляющих модели погрешностей инерциальных датчиков.....	272
Р.У. Титов, А.В. Моторин Анализ точности навигации по карте при различном характере поля, погрешностей его измерителя и системы счисления.....	276
А.В. Шолохов, М.А. Коршунов Оценка протяжённости маршрута для определения начальных навигационных параметров автономного наземного объекта в движении по цифровой карте дорог.....	279
К.А. Безрукова Алгоритмы кластеризации RGB изображений цветных оптических корреляционно-экстремальных систем навигации летательных аппаратов.....	283
В.Б. Костоусов, К.В. Дунаевская Новый метод вычисления текущей характеристики точности в задаче навигации по полю высот рельефа местности.....	286
Э.Д. Чуряев, А.В. Большакова, Р.В. Шалымов Исследование влияния перекрестных связей в колебательной системе вагон-рельсовый путь на инерциальный метод диагностики рельсовых дефектов.....	289
В.Г. Караулов, А.М. Грузликов Результаты апробации алгоритма приведения АНПА по данным от гидроакустических маяков.....	292
Е.А. Борисоглебская Ускоренный алгоритм отслеживания движущихся целей.....	296
Д.А. Севастюк Задача траекторного сопровождения движущихся объектов.....	299
Е.А. Келлер, К.А. Шабанов Кинематическая модель подвижного автономного робота.....	303
О.В. Оськина, Н.А. Николаев Адаптивный наблюдатель вектора состояния генератора мультигармонического сигнала.....	306

В.С. Быкова

Применение нейронной сети для решения задачи распознавания объектов на гидроакустических снимках.....311

В.В. Прокопович

Использование нейронных сетей для построения характеристики направленности линейной антенны314

Секция 9.

ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Е.М. Хацанова, П.П. Ткаченко

Экспериментальное определение сил сопротивления в жидкости при линейном и угловом движении образца корпуса подводного дрона317

М.Д. Тумаев, Е.А. Добрянин

Влияние параметров ветра на выдерживание режима 4D-навигации320

А.Г. Колесникова, Д.С. Стрельцов

Учебно-лабораторный комплекс «Бесплатформенная система ориентации на микромеханических датчиках первичной информации»322

А.Н. Хомячкова

Лабораторный комплекс для испытания систем малого космического аппарата.....324

В.В. Майоров

Стенд для калибровки датчиков потребительского класса на базе микроэлектромеханических систем для наноспутников формата CubeSat.....326

А.М. Столярова

Построение модели движения железнодорожного паромы с проверкой маневренных характеристик329

В.Д. Соломенцев

Система управления макетом одноосного гиросtabilизатора на датчике угловой скорости в среде LabView331

А.Л. Толстой

Определение всемирного времени на модернизированном пассажном инструменте.....334

А.Д. Клиновицкий

Трехосевой манипулятор порталного типа для ухода за культурными растениями338

М.И. Климов, Н.Ю. Кивва, А.Д. Васьков

Разработка инновационного бироторного двигателя.....341

Секция 10.

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ

Д.В. Ромаев, М.Р. Хидоятов

Измерения вертикальной координаты при высокоточных работах в режимах динамического позиционирования. Анализ показаний датчиков, основанных на различных физических принципах344

П.В. Васин, Е.В. Барина

Оценка погрешностей экспериментального определения масс-центровочных и инерционных характеристик наноспутника методом статистических испытаний347

М.С. Щербаков, С.А. Медведев

Анализ применения одноимпульсного маневрирования для поддержания инспекционного движения космического аппарата на высокоэллиптических орбитах351

Р.Б. Гончаров

Автоматизация проведения эксперимента по отладке системы ориентации сверхмалого космического аппарата типа CubeSat, основанной на инфракрасных датчиках355

А.А. Прутько

Алгоритм определения ориентации космического аппарата относительно орбитальной системы координат на участке выведения на орбиту359

Н.П. Старостин

Оптико-инерциальное позиционирование беспилотных летательных аппаратов362

Статистика конференций365

ОТ ПРОГРАММНОГО И ОРГАНИЗАЦИОННОГО КОМИТЕТОВ XXV ЮБИЛЕЙНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ»

С 21 по 24 марта 2023 г. в ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» состоялась XXV юбилейная 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»), Университета 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».

Конференция прошла преимущественно в очном формате. На платформе Webinar были организованы трансляции ключевых событий – лекций ведущих ученых, семинара «Физиологические основы навигации птиц», круглого стола АНУД, церемоний открытия и закрытия конференции. Докладчики, за редким исключением, принимали участие очно.

В работе конференции приняли участие 342 человека. В программу было включено 135 докладов, из которых заслушано 134. Россию представляли 46 организаций из 16 городов: Санкт-Петербург, Москва, Арзамас, Владивосток, Екатеринбург, Королев, Муром, Пермь, Раменское, Ревутов, Ростов-на-Дону Самара, Саратов, Серпухов, Сириус, Сургут, Тула. Всего в конференции приняли участие молодые ученые из 6 стран.

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

1. «Алгоритмы переориентации тела при помощи внутренних подвижных масс», представленная д.ф.-м.н., проф., академиком РАН Ф.Л. Черноушко (Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва);
2. «Методы повышения точности волнового твердотельного гироскопа», представленная заведующим кафедрой робототехники, мехатроники, динамики и прочности машин НИУ «МЭИ» д.т.н., проф. И.В. Меркурьевым;
3. «Оптико-электронные приборы ориентации и навигации», представленная заведующим отдела оптико-физических исследований Института космических исследований д.т.н. Р.В. Бессоновым.

Доклады на конференции были распределены по 10 секциям:

- | | |
|-----------|--|
| Секция 1 | БЕСПИЛОТНЫЙ ТРАНСПОРТ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ |
| Секция 2 | ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ |
| Секция 3 | НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ В ШКОЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ |
| Секция 4 | ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ |
| Секция 5 | ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ |
| Секция 6 | ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИБОРОВ НАВИГАЦИИ |
| Секция 7 | ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ |
| Секция 8 | ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ |
| Секция 9 | ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ |
| Секция 10 | ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ |

Ежегодно организуемая в рамках конференции секция «Навигация и управление движением в школьных проектах» неизменно вызывает значительный интерес у всех участников. Впервые была организована секция «Беспилотный транспорт и робототехнические системы», на которой был представлен приглашенный доклад заместителя генерального директора – директора Санкт-Петербургского филиала АО «НИИАС» Павла Александровича Попова.

В очередной раз в рамках конференции прошло собрание секции молодых ученых МОО «АНУД» в формате круглого стола – на тему «Рецензирование научных трудов как составляющая развития молодого ученого». Выступивший первым вице-президент АНУД член-корр. РАН О.А. Степанов отметил, что понятие «рецензирование» охватывает широкий круг деятельности: это не только подготовка рецензий на статьи, но и их редактирование, подготовка отзывов на диссертации, экспертиза различных грантов и проектов и многое другое. Были подняты вопросы выбора критериев оценки научных статей. Действительный член АНУД к.т.н. Б.С. Ривкин высказал мнение о том, что браться за рецензирование следует лишь в том случае, если являешься специалистом в данной узкой области, и рассказал о своем богатом опыте редактирования статей, публикуемых в журнале «Гироскопия и навигация». Член-корр. РАН Н.В. Кузнецов (СПбГУ) в своем выступлении рассказал о форматах рецензирования, применяемых в разных изданиях, и призвал молодых ученых участвовать в рецензировании и не стесняться задавать вопросы авторам. Выступивший далее д.т.н., проф. И.Б. Фуртат (ИПМаш РАН, Санкт-Петербург) рассказал о перспективах, которые дает работа по рецензированию статей. Это и рост авторитета ученого, и дополнительные возможности по публикации своих статей.

24 марта состоялся семинар «Физиологические основы навигации птиц» под руководством директора Зоологического института члена-корреспондента РАН, д.б.н., проф. Н.С. Чернецова. Семинар оправдал все ожидания – тема оказалась очень интересна участникам конференции и вызвала бурные обсуждения.

Параллельно с семинаром в рамках конференции прошел мастер-класс «Использование искусственного интеллекта для анализа и генерации временных рядов» под руководством д.ф.-м.н. М.А. Барулиной (Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов). На мастер-классе были рассмотрены вопросы по анализу и фильтрации временных рядов. По окончании участникам были выданы сертификаты о прохождении обучения.

По итогам конференции проведено традиционное награждение лучших докладчиков премиями памяти выдающихся ученых, работавших в ЦНИИ «Электроприбор»:

- премия имени д.т.н., проф. С.Ф. Фармаковского – Сергею Михайловичу Тарасову (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», научный руководитель – к.т.н. Н.В. Кузьмина) за доклад «Алгоритм определения погрешностей привязки данных автоматизированного астрономического универсала к шкале всемирного времени»;
- премия имени д.т.н., проф. Л.П. Несенюка – Михаилу Юрьевичу Лобачеву (СПбГУ, научный руководитель – чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. Н.В. Кузнецов) за доклад «Аналитическая оценка полосы захвата системы фазовой автоподстройки частоты».

В каждой секции авторы лучших докладов награждены дипломами и памятным подарками:

- дипломами I степени – 8 участников;
- дипломами II степени – 11;
- дипломами III степени – 9;
- дипломами за лучший студенческий доклад – 7;
- дипломами за лучший школьный доклад – 4.

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 118 докладов молодых ученых и обзорная лекция Ф.Л. Черноусько.

*Заместитель председателя программного комитета
к.т.н. Ю.А. Литвиненко*

УДК 517.977

Ф.Л. ЧЕРНОУСЬКО
(Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия)

АЛГОРИТМЫ ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ ТЕЛА ПРИ ПОМОЩИ ВНУТРЕННИХ ПОДВИЖНЫХ МАСС

Рассматриваются алгоритмы переориентации твердого тела при помощи внутренних подвижных масс. Предложено несколько вариантов алгоритмов, обсуждаются их свойства.

Введение. Как известно, изменение пространственной ориентации твердого тела может быть осуществлено при помощи вспомогательных масс, снабженных актюаторами и совершающих определенные движения относительно несущего тела. В случае одной подвижной массы, рассмотренном в работах [1, 2], оказывается, что движение этой массы проходит вблизи центра масс твердого тела, что может быть нежелательно с конструктивной точки зрения. Наличие нескольких подвижных масс позволяет разместить эти массы достаточно произвольным образом относительно тела, а также существенно ограничить области их движения. Предложено несколько способов управления движением внутренних масс с целью переориентации твердого тела [3–7].

Основная часть. Рассматривается система, состоящая из твердого тела P массы M и n материальных точек Q_i с массами m_i , $i=1, \dots, n$. Точки Q_i снабжены актюаторами и могут перемещаться относительно тела P . Они взаимодействуют с телом P , но не взаимодействуют друг с другом и с внешней средой. Предполагается, что внешние силы, действующие на систему, пренебрежимо малы. Это допущение справедливо для космических аппаратов, а также в случае быстрых поворотов тела вокруг центра масс.

Пусть в начальный момент времени $t=0$ система покоится. Обозначим через C центр масс твердого тела P и введем декартову систему координат $Cx_1x_2x_3$, связанную с телом P . Пусть $\mathbf{r}_i = CQ_i$ – радиус-вектор точки Q_i и $\dot{\mathbf{r}}_i$ – ее скорость относительно системы $Cx_1x_2x_3$. Тогда, используя законы сохранения количества движения и кинетического момента, получим уравнение движения системы в виде

$$\mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega} - (M + m)^{-1} \left(\sum_{i=1}^n m_i \mathbf{r}_i \right) \times \left[\sum_{i=1}^n m_i (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i + \dot{\mathbf{r}}_i) \right] + \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{r}_i \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_i + \dot{\mathbf{r}}_i) = 0, \quad m = \sum_{i=1}^n m_i.$$

Здесь \mathbf{J} – тензор инерции тела P относительно его центра масс C , $\boldsymbol{\omega}$ – угловая скорость тела P .

Исследуется задача управляемой переориентации тела P , то есть перевода его из начального состояния покоя при исходной ориентации тела в пространстве в конечное состояние покоя при заданной конечной ориентации, при помощи управляемых движений подвижных масс Q_i , $i=1, \dots, n$.

Положим

$$\mathbf{r}_i(t) = \mathbf{r}_i^0 + \boldsymbol{\rho}_i(t), \quad i=1, \dots, n,$$

где \mathbf{r}_i^0 – постоянные векторы, на которые наложено условие

$$\sum_{i=1}^n m_i \mathbf{r}_i^0 = 0,$$

а $\boldsymbol{\rho}_i(t)$ – переменные векторы, подлежащие определению.

Рассматриваются три варианта управления подвижными массами Q_i :

$$A: \rho_i(t) = \rho(t), \quad i = 1, \dots, n;$$

$$B: \rho_k(t) \neq 0, \quad \rho_i(t) = 0, \quad i \neq k, \quad i = 1, \dots, n;$$

$$C: \mathbf{r}_{i+3}(t) = -\mathbf{r}_i(t), \quad i = 1, 2, 3, \quad n = 6.$$

В вариантах А и В требуемая переориентация тела P достигается путем трех последовательных плоских поворотов тела вокруг осей Cx_j , $j = 1, 2, 3$. Для каждого поворота, например, вокруг оси Cx_j , в варианте А все массы Q_i вращаются синхронно по окружностям в плоскостях, перпендикулярных оси Cx_j . В варианте В только одна масса Q_k вращается по окружности в плоскости, перпендикулярной оси Cx_j , а остальные массы покоятся. Радиусы a_i этих окружностей могут быть сделаны достаточно малыми за счет увеличения числа оборотов N , причем справедлива оценка $a_i \sim 1/\sqrt{N}$. Число n масс Q_i в вариантах А и В целесообразно взять равным 4, а векторы \mathbf{r}_i^0 выбрать так, чтобы центр масс C тела P находился внутри тетраэдра с вершинами в точках \mathbf{r}_i^0 .

Вариант С обладает тем преимуществом, что позволяет осуществить любую заданную переориентацию тела P посредством одного плоского (Эйлера) поворота вокруг некоторой оси. Для этого три пары подвижных масс должны двигаться по некоторым окружностям в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Получена нелинейная система обыкновенных дифференциальных уравнений, решение которой описывает движение вспомогательных масс Q_i , $i = 1, \dots, 6$, обеспечивающее заданную переориентацию посредством плоского поворота.

Приведены результаты численного моделирования предложенных алгоритмов и визуализация полученных движений.

Заключение. Обсуждаются свойства и особенности рассмотренных алгоритмов переориентации при помощи вспомогательных подвижных масс. Предложенные алгоритмы могут представлять интерес для управления ориентацией космических аппаратов и других подвижных объектов.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 21-51-12004.

ЛИТЕРАТУРА

1. Черноусько Ф.Л. Изменение ориентации твердого тела при помощи вспомогательной массы. Доклады РАН. Физика, технические науки, 2020. Т. 490. С. 79-81.
2. Chernousko F.L. Two- and three-dimensional motions of a body controlled by an internal movable mass. Nonlinear Dynamics, 2020. V. 99. № 1. P. 793-802.
3. Черноусько Ф.Л. Управление ориентацией тела при помощи нескольких подвижных масс. Доклады РАН. Физика, технические науки, 2020. Т. 493. С. 70-74.
4. Chernousko F.L. Reorientation of a rigid body by means of internal masses. Nonlinear Dynamics, 2020. V. 102. P. 1209-1214.
5. Черноусько Ф.Л. Об использовании нескольких подвижных масс для переориентации тела. Доклады РАН. Физика, технические науки, 2022. Т. 503. С. 52-56.
6. Черноусько Ф.Л. Изменение ориентации тела при помощи трех пар подвижных масс. Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки, 2022. Т. 506. №2. С. 60-65.
7. Черноусько Ф.Л., Болотник Н.Н. Динамика мобильных систем с управляемой конфигурацией. М.: Физматлит, 2022. 464 с.

F.L.Chernousko (Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia). **Algorithms of body reorientation by means of internal auxiliary masses.**

Abstract. Algorithms of reorientation for a rigid body by means of internal auxiliary masses are considered. Several versions of algorithms are proposed, and their properties are discussed.

Секция 1.
БЕСПИЛОТНЫЙ ТРАНСПОРТ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

М.Д. КУЗНЕЦОВ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

УПРАВЛЕНИЕ КВАДРОКОПТЕРОМ С ГАРАНТИЕЙ НАХОЖДЕНИЯ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА В ЗАДАННЫХ ГРАНИЦАХ ПРОСТРАНСТВА СОСТОЯНИЙ

Предлагается робастный метод для задач управления беспилотным летательным аппаратом с учетом линеаризованной модели квадрокоптера. Основное полученное достижение — регулятор, гарантирующий нахождение выходных сигналов в заданном малом ограниченном множестве, образованном произвольными функциями. Метод применяется к модели квадрокоптера отдельно для каждой степени свободы. Результаты проверяются с помощью компьютерного моделирования в среде Matlab.

Введение. В работе исследуется возможность использования метода управления, предложенного в [1], на классе систем БПЛА с использованием модели квадрокоптера "QBall 2", который можно заменить на любой другой из доступных. Квадрокоптеры приобрели большую популярность за счет их вариативности в различных сферах жизни человека. Целью настоящей работы является реализация метода управления квадрокоптером по крену, тангажу на примере квадрокоптера «Qball 2». Полная линейная динамическая модель квадрокоптера и значения параметров соответствуют документации [2]. В практической части предлагаемой статьи все эксперименты проводятся с квадрокоптером «Qball 2». Линеаризованная динамическая система рассматривается в условиях неизвестных ограниченных возмущений и малых параметрических неопределенностей выходного сигнала. Предложен метод управления, обеспечивающий точное нахождение выходного сигнала в заданных пределах с нулевого момента времени.

Постановка задачи. Рассмотрим модель динамики квадрокоптера по крену/тангажу:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{L}{J} \Delta F, \\ y = x_1, \end{cases} \quad (1)$$

где x_1 – угловое положение (крен/тангаж), x_2 – угловая скорость, ΔF – разница между силами воздушной тяги от лопастных систем (винтов) квадрокоптера, L – расстояние между винтом и центром тяжести, J – осевой момент инерции, y – выходной сигнал квадрокоптера. Динамика воздушной тяги определяется величиной подаваемого напряжения на двигатели квадрокоптера:

$$\dot{F}_i = -\omega_i F_i + K_i \omega_i u_i, i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

где F_i – сила воздушной тяги от лопастной системы (винтов) квадрокоптера, ω_i и K_i – известные постоянные коэффициенты, выбранные согласно документации [2], u_i – входное напряжение двигателя постоянного тока, n – число лопастных систем у выбранного квадрокоптера.

Необходимо разработать способ управления, который гарантирует, что выходные сигналы (1) находятся в заданном ограниченном множестве.

Научный руководитель: к.т.н., с.н.с. Вражевский С.А.

$$Y = \{y \in R^v : \underline{g}_j(t) < y_j(t) < \overline{g}_j(t), j = \overline{1, v}\}, \forall t \geq 0, \quad (3)$$

где функции $\underline{g}_i(t)$ и $\overline{g}_i(t)$ ограничены вместе со своими первыми производными, y – выходной сигнал квадрокоптера, v – количество рассматриваемых степеней свободы. Эти функции выбираются в соответствии с целевыми требованиями к поведению системы [3].

Пусть выходному сигналу будет приведена в соответствие некоторая функция:

$$y = \Phi(\varepsilon, t) = g(t)S(\varepsilon), \quad (4)$$

где $S(\varepsilon) \in R$ некоторое функциональное преобразование, цель которого переход от задач с ограничениями (3)[1] к задачам без ограничений; $g(t) \in R$ определяет строгие ограничения для выходного сигнала объекта управления. Кроме того, функция $g(t) \neq 0$ и ограничена вместе со своей производной.

Рассмотрим функцию $S(\varepsilon) = \frac{\overline{r}e^\varepsilon + \underline{r}}{e^\varepsilon + 1}$, где $\overline{r}(t)$ и $\underline{r}(t)$ – некоторые заданные разработчиком

ограничения для выходного сигнала, тогда из (4) следует, что $\varepsilon = \ln \frac{rg(t) - y}{y - rg(t)}$. Таким образом,

предложенная функция $S(\varepsilon)$ обеспечивают следующее:

$$\begin{cases} \underline{rg}(t) < y(t) < \overline{rg}(t), g(t) > 0, \\ \overline{rg}(t) < y(t) < \underline{rg}(t), g(t) < 0. \end{cases} \quad (5)$$

Результаты моделирования. Для целей моделирования определим набор начальных ограничений состояний с помощью следующих функций:

- 1) $g(t) = (g_0 - g_\infty)e^{-kt} + g_\infty$, где параметры g_0 и g_∞ выбираются разработчиком,
- 2) $\overline{rg}(t) = \begin{cases} 2 \cos(t) + y(0) + 0.2, t \geq \pi, \\ y(0) + 0.2, 0 \leq t \leq \pi, \end{cases} \quad \underline{rg}(t) = \begin{cases} 2 \cos(t) + y(0) - 0.2, t \geq \pi, \\ y(0) - 0.2, 0 \leq t \leq \pi, \end{cases}$
- 3) $2 \cos(t) + y(0) + \delta < y(t) < 2 \cos(t) + y(0) - \delta$, где параметр δ выбирается разработчиком, в зависимости от решаемой задачи.

Рассмотрим закон управления:

$$u = K_1 y + K_2 \varepsilon, \quad (6)$$

где K_1 и K_2 должны быть выбраны разработчиками, исходя из требований устойчивости замкнутой системы. Подробные и строго обоснованные рекомендации для выбора матриц K_1 и K_2 представлены в работе [1]. Первое слагаемое в (6) обеспечивает устойчивость замкнутой системы, а второе слагаемое обеспечивает наличие выходного сигнала (4) точно в заданных диапазонах значений (5). Для рассматриваемого примера матрицы K_1 и K_2 определяются как

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.0096 & -0.0175 & 0.0682 & -0.0087 & 0.0120 & -0.0036 \\ -0.0096 & -0.0175 & -0.0087 & 0.0682 & 0.0120 & -0.0036 \\ 0.0114 & 0.0193 & 0.0123 & 0.0123 & 0.0588 & 0.0095 \\ 0.4554 & 0.7430 & 0.1399 & 0.1399 & -0.1338 & -1.2770 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

В ходе экспериментов было проведено моделирование с учетом воздействия внешних возмущений. Возмущение задается в виде

$$f(t) = 0.7 \sin(20t) + 0.4 \sin(101t) + 0.1 \quad (9)$$

и представлено на рисунке 1.

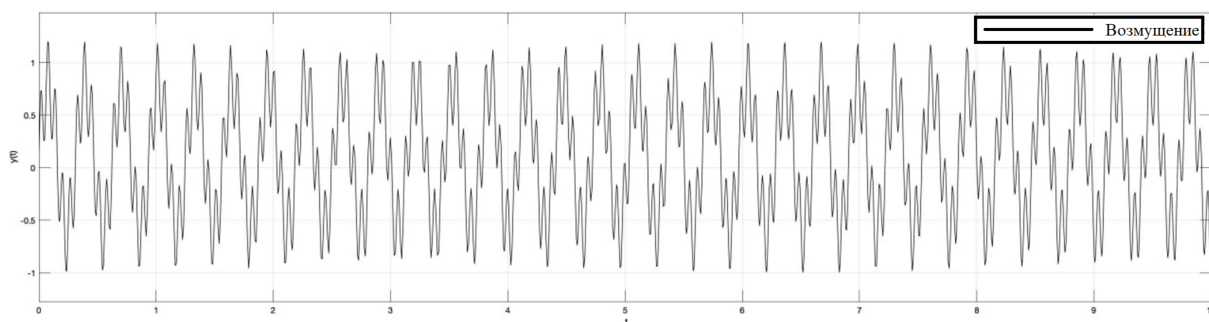


Рис. 1. Динамика сигнала возмущения

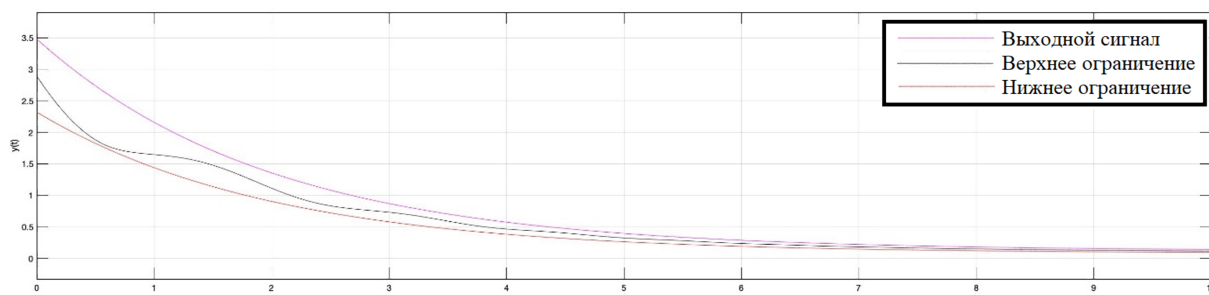


Рис. 2. Динамика по углу крена в экспоненциальных границах

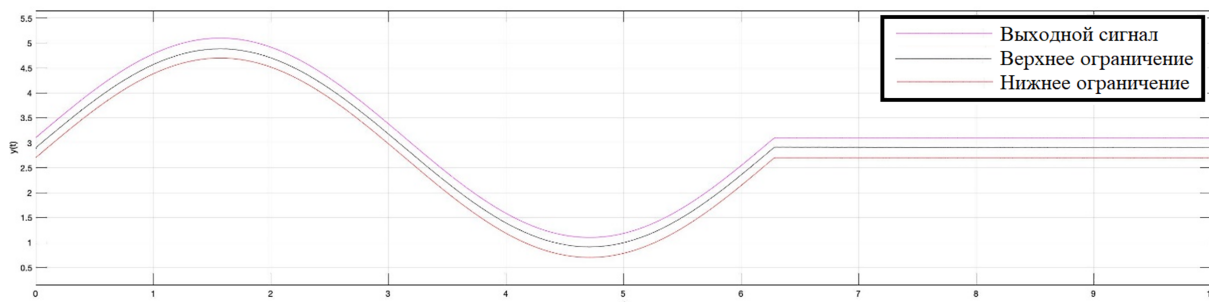


Рис. 3. Динамика по углу крена в комбинированных границах

На рисунке 2 показана динамика по углу крена при работе алгоритма управления с использованием экспоненциальных функций. Показателем эффективности этого алгоритма является то, что независимо от возмущения, выходной сигнал на всем времени моделирования находится строго внутри этих границ. На всем диапазоне моделирования выходной сигнал квадроконтера не пересекает заданных ограничений. На рисунке 3 приведены динамика по углу крена и результаты работы алгоритма при управляющих сигналах с малыми, сравнимыми с выходной величиной системы, амплитудами с использованием кусочно-непрерывных функций (пример 2 из набора ограничений).

Заключение. Разработан метод управления БПЛА по крену и тангажу. Алгоритм управления гарантирует наличие выходного сигнала в заданном ограниченном множестве, которое мо-

жет быть сформировано с использованием произвольных непрерывно дифференцируемых функций. Эффективность полученного метода продемонстрирована моделированием как с учетом внешних воздействий, так и без них, выходной сигнал не выходит за установленные ограничения на всем периоде моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **И. Б. Фуртат, П. А. Гушин.** Управление динамическими объектами с гарантией нахождения регулируемого сигнала в заданном множестве // Автоматика и телемеханика. 2021. № 4. С. 121–139.
2. "User manual QBall 2 for QUARC. Set Up and Configuration," Quanser inc., 2017.
3. **I.B.Furtat, V.V.Putov,** "Suboptimal control of aircraft lateral motion," IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), vol. 2, pp. 276-282, 2013.

M.D.Kuznetsov (ITMO University, Saint-Petersburg). **Quadrotor Control With a Guaranteed Presence of Output Signals Within the Given Borders of the State Space**

Abstract. The article proposes a new robust method for UAV control tasks, taking into account the linearized model of a quadcopter. The main achievement obtained is a controller with a guarantee of finding output signals in a given small limited set formed by arbitrary functions. The method is applied to the quadcopter model separately for each degree of freedom. The results are verified using computer simulations in the Matlab environment.

УДК 681.516.42

Г. Р. САЙПУЛАЕВ
(Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва)

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ МЕКАНУМ-КОЛЕС И СТРУКТУРЫ КОНТАКТНЫХ СИЛ НА ТОЧНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ-МАНИПУЛЯТОРОМ KUKA YOUBOT

Рассматривается динамика и управление роботом KUKA youBot, состоящего из механум-платформы и закрепленного на ней пятиосевого манипулятора. Разработана математическая модель динамики мобильного робота-манипулятора с учетом конструкции механум-колес, поликомпонентного контактного трения и взаимного влияния платформы и манипулятора. Предложен закон управления движением робота, обеспечивающий точное перемещение робота в требуемое положение. По результатам численного моделирования подтверждена работоспособность предложенного управления. Дальнейшие исследования предполагают более детальный анализ и синтез алгоритмов управления в рамках теорий оптимального или адаптивного управления.

Введение. Исследования мобильных роботов-манипуляторов, способных осуществлять всенаправленное движение, являются актуальными из-за их широкого применения в области складской логистики, медицины и при работе в стесненных пространствах. Для управления мобильными платформами с омни- или механум-колесами необходимо разработать кинематические и динамические модели движения указанных систем. В большинстве исследований для описания кинематики механум-колес используется их упрощенная математическая модель. При этом динамика всенаправленной платформы описывается с использованием неголономных связей – условий непроскальзывания точек контакта роликов с опорной поверхностью. Однако в работах авторов [1, 2] были построены модели динамики всенаправленной платформы с учетом конструкции механум-колес и поликомпонентного трения. Отметим, что в указанных работах пятиосевой манипулятор робота считался неподвижным относительно платформы.

Зачастую [3–5] управление манипулятором и мобильной платформой рассматривают по отдельности для упрощения математического описания движения системы. Это приводит к упущению динамических эффектов, возникающих из-за взаимного влияния манипулятора и мобильной платформы.

Предлагаемый доклад посвящен разработке связанной модели динамики мобильной всенаправленной платформы и подвижного манипулятора, установленного на ней, с учетом конструкции механум-колес и поликомпонентного контактного трения [6, 7]. Для построенной модели динамики предлагается закон управления, обеспечивающий приведение мобильного робота-манипулятора KUKA youBot в заданное положение.

Модель динамики робота-манипулятора. Уравнения динамики робота-манипулятора записываются в форме уравнений Маджи в виде [8]:

$$H^T (A(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + D\dot{q} + G(q) + F_{fr}(q, \dot{q})) = M, \quad (1)$$

где: q – вектор обобщенных координат; $A(q)$ – матрица инерционных сил; $C(q, \dot{q})$ – матрица центробежных и кориолисовых сил; D – диагональная матрица диссипативных сил; $G(q)$ – вектор сил тяжести; $F_{fr}(q, \dot{q})$ – вектор сил контактного трения; M – вектор управляющих мо-



Рис. 1. Мобильный робот-манипулятор KUKA youBot

ментов; H – матрица перехода от обобщенных координат к псевдоскоростям. При этом вектор обобщенных скоростей состоит из линейных скоростей \dot{x}_O, \dot{y}_O геометрического центра платформы, угловой скорости $\dot{\psi}$ платформы, скоростей вращения колес $\dot{\phi}_i$ ($i = 1, \dots, 4$) и контактирующих роликов $\dot{\gamma}_i$ ($i = 1, \dots, 4$) вокруг собственных осей, а также скоростей в сочленениях манипулятора $\dot{\theta}_i$ ($i = 1, \dots, 5$). Здесь и далее точкой обозначено дифференцирование по времени.

Управление платформой и манипулятором. Для управления движением платформой предлагается формировать управляющие моменты, создаваемые приводами колес, в виде:

$$M_{\phi_i} = -k_{\phi} \left(\dot{\phi}_i - \left(\tilde{V}^d s_{1i} \sin(\psi + s_{1i} \cdot 45^\circ) u_x + \tilde{V}^d \sin(\psi + s_{2i} \cdot 45^\circ) u_y + s_{3i} \tilde{\Omega}^d u_{\psi} \right) \right), \quad (2)$$

где: $u_x = \arctan\left(\frac{x_O^d - x_O}{10^{-4}}\right)$, $u_y = \arctan\left(\frac{y_O^d - y_O}{10^{-4}}\right)$, $u_{\psi} = \arctan\left(\frac{\psi^d - \psi}{10^{-4}}\right)$ – регуляризованные

функции знака, зависящие от невязок между требуемыми и текущими координатами центра платформы и угла курса платформы; $\tilde{V}^d, \tilde{\Omega}^d$ – программные значения, характеризующие линейную и угловую скорости платформы; а константы $s_{1i} = \pm 1, s_{2i} = \pm 1, s_{3i} = \pm 1$ характеризуют расположение механум-колес и направление контактирующих роликов; k_{ϕ} – коэффициент обратной связи. Верхний индекс « d » обозначает требуемые значения обобщенных скоростей.

Для управления движением манипулятора моменты, создаваемыми приводами звеньев манипулятора, предлагается формировать в виде пропорционально-дифференциального регулятора с компенсацией сил тяжести:

$$M_{\theta_i} = -k_{p\theta} (\theta_i - \theta_i^d) - k_{d\theta} (\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_i^d) + k_{\theta} G(q), \quad (3)$$

где: $k_{p\theta}, k_{d\theta}, k_{\theta}$ – коэффициенты обратной связи.

Результаты численного моделирования. По результатам численного интегрирования уравнений динамики (1) при управлении (2) и (3) была построена траектория движения геометрического центра платформы. По рис. 1 видно, что применение предложенного управления обеспечивает точное приведение робота в требуемое положение. Однако из-за конструкции колес и поликомпонентного трения перемещение робота в требуемое положение занимает больше времени, чем при рассмотрении упрощенных моделей механум-колес и использовании условий непроскальзывания.

Заключение. Разработана математическая модель динамики мобильного робота-манипулятора KUKA youBot с учетом конструкции механум-колес и поликомпонентного трения. Предложен закон управления движением робота, обеспечивающий точное приведение робота в требуемое положение. В рамках дальнейших исследований предполагается провести синтез законов для управляющих напряжений и моментов в рамках теорий оптимального или адаптивного управления.

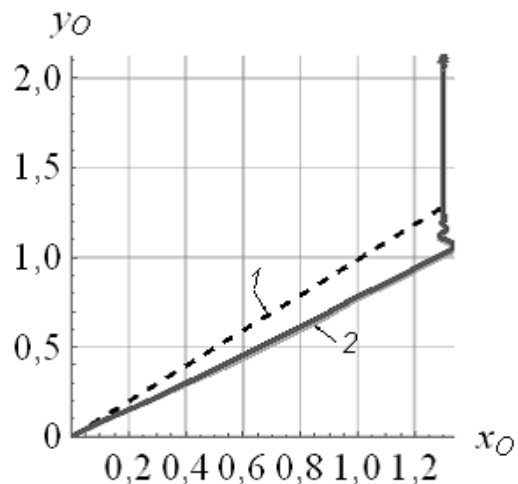


Рис. 1. Траектория геометрического центра платформы: 1 – неголономная модель; 2 – модель, учитывающая конструкцию механум-колес и поликомпонентное трение.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-21-00831, <https://rscf.ru/project/22-21-00831/>

ЛИТЕРАТУРА

1. **Adamov B.I., Saypulaev G.R.** Research on the dynamics of an omnidirectional platform taking into account real design of mecanum wheels (as exemplified by KUKA youBot). *Rus. J. Nonlin. Dyn.* 2020. Vol. 16. № 2. P. 291–307.
2. **Adamov B.I., Saypulaev G.R.** A study of the dynamics of an omnidirectional platform, taking into account the design of mecanum wheels and multicomponent contact friction. *2020 International Conference Nonlinearity, Information and Robotics (NIR)*. 2020. P. 1–6.
3. **Keiser B.** Torque control of KUKA youBot arm. *Master Thesis*. Zurich. 2013. 37 p.
4. **Di Napoli G., Filippeschi A., Tanzini M., Avizzano C.A.** A novel control strategy for youBot arm. *IECON 2016 – 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2016. P. 482–487.
5. **Abhishek V., Saha S.K.** Dynamic identification and model based control of an omni-wheeled mobile robot. *2016 4th International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)*. 2016. P. 595–600.
6. **Андронов В.В., Журавлев В.Ф.** Сухое трение в задачах механики. М.-Ижевск: Издательство «ИКИ», 2010. 184 с.
7. **Климов Д.М., Журавлев В.Ф.** Глобальное движение кельтского камня. *Изв. РАН. МТТ*. 2008. Т. 43, № 3, С. 8-16.
8. **Spong M.W., Hutchinson S., Vidyasagar M.** Robot modeling and control. *John Wiley & Sons*. 2020. 608 p.

G.R. Saypulaev (National Research University “MPEI”, Moscow). **Influence of the design of mecanum-wheels and the structure of contact forces on the accuracy of control of the mobile robot-manipulator KUKA youBot**

Abstract. The dynamics and control of the KUKA youBot robot, which consists of a mecanum-platform and a five-axis manipulator fixed on it, is considered. A mathematical model of the dynamics of a mobile robot-manipulator has been developed taking into account the design of the mecanum-wheels, multicomponent contact friction and the mutual influence of the platform and the manipulator. A robot motion control law is proposed that ensures precise movement of the robot to the required position. According to the results of numerical simulation, the operability of the proposed control is confirmed. Further research involves a more detailed analysis and synthesis of control algorithms within the framework of theories of optimal or adaptive control.

МАРСЕЛИНУ ЖУЛИУ ФЕРНАНДУ
(Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва)

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО МЕКАНУМ-РОБОТА СО ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМОЙ ЦВЕТОВОГО ЗРЕНИЯ ДЛЯ ПРЕСЛЕДОВАНИЯ ОБЪЕКТА

Разработан мобильный механум-робота со встроенной системой технического зрения для сопровождения подвижного объекта, положение которого определяется камерой и ультразвуковым датчиком. Предложен алгоритм сопровождения подвижного объекта. Проведён необходимый кинематический анализ для реализации управления вращением колёс.

Введение. Задача о слежении и следовании за объектом, а также связанные с ней методы машинного зрения, широко востребованы в мобильной робототехнике – в управлении автономными автомобилями, создании роботов-помощников для домашнего хозяйства, осуществлении мер по охране территорий и, чаще всего, транспортировке грузов.

Цель работы – создание прототипа мобильного робота, предназначенного для сопровождения подвижного объекта. Для обеспечения лучшей маневренности робота выбрана шасси, представляющая собой четырёхколёсную механум-платформу. Механум-колёса позволяют роботу перемещаться во всех направлениях без использования обычной системы рулевого управления [1].

Выбор комплектующих и их взаимодействие. Камера обнаружения и слежения *Pixy CMUCam5* используется для определения размера и координат объекта в обзоре камеры [2-3]. Результаты обнаружения отправляются на плату микроконтроллера *Arduino Mega* для обработки. Положение объекта в двухмерном виде (в обзоре камеры) определяет требуемое направление движения робота, которое реализуется четырьмя двигателями. Управление вращением каждого двигателя осуществляется отдельными драйверами *LD293 Motor shield*, управляемыми микроконтроллерами. Для определения расстояния между платформой и объектом используется ультразвуковой датчик *HC-sr04*. Измерительная информация также отправляется на плату микроконтроллера *Arduino Mega* для обработки. Питание осуществляется от батареи *Rexant 18650 Li-ion*. На рисунках ниже представлены: 3D-модель и сборка данного робота (рис. 1) и прототип робота (рис. 2)

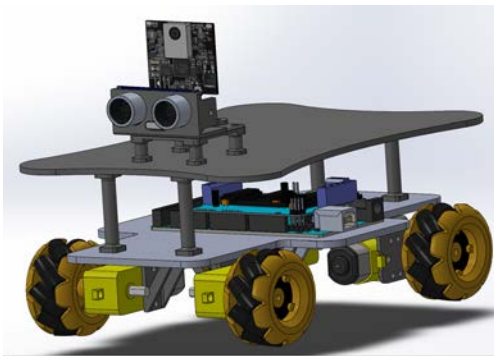


Рис. 1. 3D-Модель



Рис. 2. Прототип робота

Алгоритм управления роботом. Для прототипа робота предложен алгоритм кинематического управления, в соответствии с которым формируются желаемые компоненты продольной и боковой скорости движения механум-робота. При инициализации камеры из ее памяти удаляются все старые полученные ранее данные. Затем выполняется обнаружение объекта путём получения инфор-

руководитель: к.ф.-м.н., доцент Адамов Б.И.

мации о его координатах x и y на изображении (рис. 3) и (рис. 4). Здесь значение x представляет собой положение объекта на кадре по оси x (рис. 3). Если значение x меньше 109 пикселей, то робот должен двигаться влево. Если значение x больше 199 пикселей, то – вправо. Расстояние от робота до объекта измеряется дальномером. При значении x в диапазоне от 109 до 199 пикселей и расстоянии между роботом и объектом от 20 см до 50 см робот должен двигаться вперед. Если расстояние меньше 20 см, то – назад. Если все вышеперечисленные условия не соблюдены, робот останавливается и необходимо вмешательство человека.

По описанному алгоритму формируются желаемые компоненты скорости робота – продольная V_x и боковая V_y (рис. 6). Движение робота предполагается поступательным, а его требуемая угловая скорость $\omega_z = 0$.

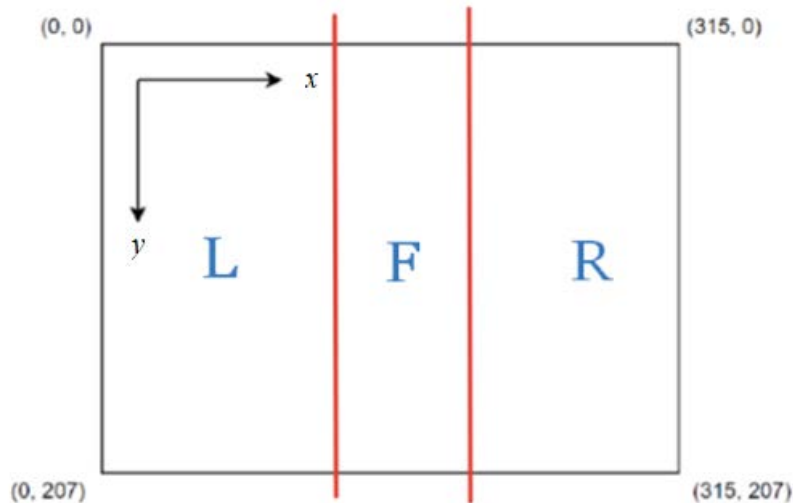


Рис.3 Координаты изображения связанных компонентов цвета с точки зрения камеры $L - x \in (0,109)$, $F - x \in (109,199)$, $R - x \in (199,315)$

Для распознавания объекта в кадре используется программное обеспечение (ПО) PixyMon [4]. PixyMon – это бесплатное ПО, разработанное создателями Pixy2. Оно предоставляет пользователю графический интерфейс, в котором отображаются данные с подключенной камеры Pixy, и окно настроек для регулировки общих параметров и параметров слежения. Примеры настроек: яркость, точность распознавания, минимальная частота обновления (кадр в секунду). На рисунке 4 показан пример вкладки настроек. Все параметры в этом окне могут повлиять на результат отслеживания. Примеры окна ПО при распознавании оранжевого шарика приведены на рисунке 5.

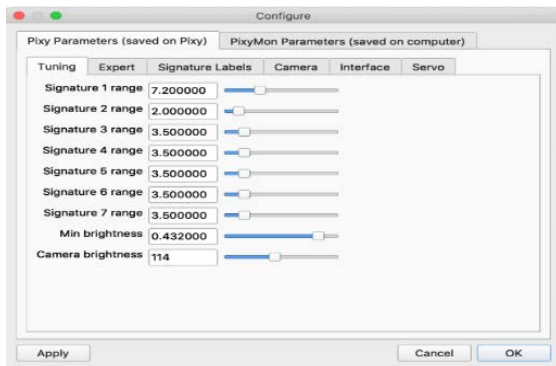
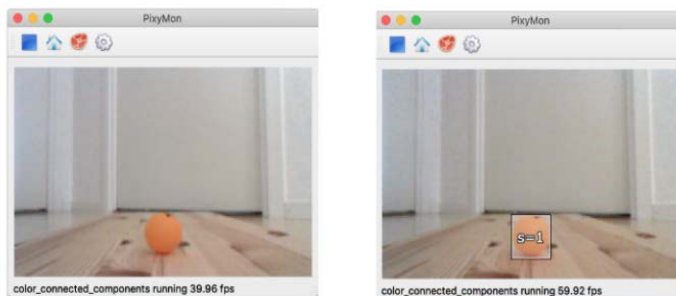


Рис. 4. Окно параметров PixyMon



Оранжевый шарик, не распознан Оранжевый шарик, распознан

Рис. 5. Окно съёмки PixyMon

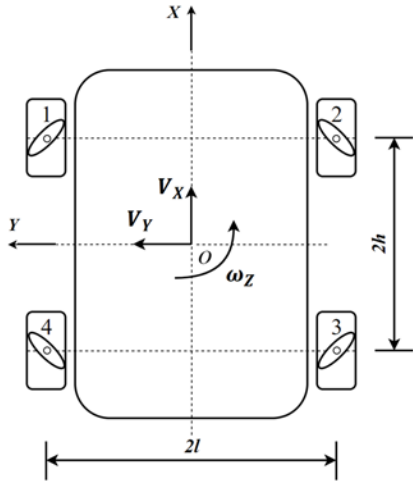


Рис. 6. Схема платформы робота

Управление вращением колес. Для исследуемого робота (рис.6) запишем кинематические соотношения, необходимые для кинематического управления данным роботом. Считаем, что скорость в точке контакта меканум-колеса P_i перпендикулярна оси его ролика:

$$\vec{V}_{P_i} \perp \vec{n}_i \Leftrightarrow (\vec{V}_{P_i}, \vec{n}_i) = 0,$$

где \vec{V}_{P_i} – вектор линейной скорости i -го колеса в точке контакта роликов и пола; \vec{n}_i – единичный вектор оси ролика. Выполним необходимые преобразования, получаем следующие выражения для скоростей вращения колёс:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_3 &= \frac{1}{R}(V_X - V_Y), \\ \dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_4 &= \frac{1}{R}(V_X + V_Y), \end{aligned} \quad (1)$$

где: R – Радиус колеса; $\dot{\varphi}_i$ – скорость вращения i -го колеса ($i = 1, \dots, 4$); V_X, V_Y – продольная и поперечная составляющие скорости; h – расстояние вдоль оси X – от геометрического центра робота до центра колеса; l – расстояние вдоль оси Y от геометрического центра робота до центра колеса; ω_Z – угловая скорость робота.

Выражения (1) используются для формирования требуемых скоростей вращения колёс по найденным желаемым значениям компонент скорости робота V_X, V_Y . Величины $\dot{\varphi}_i$ отрабатываются приводами колёс.

Заключение. Основным результатом работы является создание функционирующего прототипа мобильного меканум-робота с системой технического зрения. Подобраны комплектующие, разработаны и прототипированы элементы конструкции. Разработан алгоритм и программное обеспечение для управления движением прототипа робота. Проведён теоретический анализ кинематики платформы, на основании которого получены выражения для расчёта желаемых скоростей вращения колёс по заданным скоростям центра платформы.

ЛИТЕРАТУРА

1. **В.Е. Пон.** Wheels for a course stable selfpropelling vehicle movable in any desired direction on the ground or some other base, April 8 1975. US Patent 3,876,255. URL: <http://www.google.com/patents/US3876255>
2. **К. Anindyaguna, N. C. Basjaruddin, and D. Saefudin,** “Overtaking assistant system (OAS) with fuzzy logic method using camera sensor,” 2016 2nd Int. Conf. Ind. Mech. Electr. Chem. Eng. ICIMECE 2016, pp. 89–94, 2017, doi: 10.1109/ICIMECE.2016.7910420.
3. **М. F. Ahmad, H. J. Rong, S. S. N. Alhady, W. Rahiman, and W. A. F. W. Othman,** “Colour tracking technique by using pixy CMUcam5 for wheelchair luggage follower,” Proc. - 7th IEEE Int. Conf. Control Syst. Comput. Eng. ICCSCE 2017, vol. 2017-November, no. November, pp. 186–191, 2018, doi: 10.1109/ICCSCE.2017.828440.
4. <https://pixycam.com/>

Marcelino Julio Fernando (MPEI, Moscow). **Development of a mobile mecanum robot with a built-in color vision system for chasing a moving object**

Abstract. A mobile mecanum robot with a built-in vision system has been developed to accompany a moving object, the position of which is determined by a camera and an ultrasonic sensor. An algorithm for tracking a moving object is proposed. The necessary kinematic analysis was carried out to implement wheel rotation control.

УДК 681.51

А. Н. АЛЕКСЕЕВ, Е. С. ЗЕМЛЯНЫЙ, К. А. ЧЕКАНОВ
(АО «Раменское Приборостроительное Конструкторское Бюро», г. Раменское)

ПОСАДКА КРЫЛАТОГО БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ВЗЛЁТНО-ПОСАДОЧНУЮ ПОЛОСУ ПО ОСОБЫМ ТОЧКАМ

Рассматривается задача позиционирования беспилотного летательного аппарата на этапе посадки путём распознавания взлётно-посадочной полосы. Разработан алгоритм на основе технического зрения, позволяющий найти угловые точки полотна взлётно-посадочной полосы, а затем с помощью фотограмметрии определить координаты аппарата с точностью, необходимой для его автоматической посадки.

Введение. В последние годы возрос интерес к повышению автономности работы беспилотных летательных аппаратов (БЛА). В частности, это касается отказа от спутниковых навигационных систем на различных этапах полёта, включая посадку, из-за возможной постановки помех длительного действия. Решением данной проблемы может служить система технического зрения: БЛА оборудуется видеокамерой и на основе анализа её изображения производится посадка [1]. Такая система не подвержена искусственным помехам и достаточно компактна (не требует дополнительную наземную инфраструктуру) по сравнению с классическими курсоглиссадными средствами посадки. Работа посвящена решению задачи определения координат БЛА на основе методов технического зрения.

Техническое зрение в задаче посадки служит для поиска на изображении некоторых ориентиров, координаты которых заранее известны и записаны в память бортового вычислителя БЛА. В настоящей работе в качестве ориентиров выступают угловые (особые) точки полотна взлётно-посадочной полосы (ВПП): они удобны для детектирования на изображении (вокруг этих точек имеется характерный перепад яркости) и их географические координаты содержатся в аэронавигационных атласах аэродромов.

Для того, чтобы выполнять автоматическую посадку, точность определения координат должна соответствовать III категории [2]:

Таблица 1

Допустимые отклонения от глиссады

Категория	Высота принятия решений, м	Боковое отклонение, м	Продольное отклонение, м
I	60	7,7	5,1
II	30	5,0	2,5
III	15	3,7	1,3

Распознавание взлётно-посадочной полосы. На первом этапе нужно выделить область интереса на изображении, которая содержит контуры ВПП. Для решения этой задачи была выбрана нейронная сеть с архитектурой «YOLO 7». Нейросетевые архитектуры семейства «YOLO» показывают наилучшее быстроедействие среди других архитектур [3], поэтому они хорошо подходят для использования во встраиваемых системах. Обучающий датасет был собран с помощью открытого авиасимулятора «FlightGear» [4]: записывались видеоролики посадки, затем они разбивались на кадры, а далее эти кадры размечались и использовались в обучающей выборке.

На втором этапе, с помощью преобразования Хафа в предсказанной нейросетью области интереса, определялись боковые границы ВПП. Затем, для отыскания угловых точек ВПП, использовался детектор Харриса [5], который находит все контрастные углы на изображении, в результате чего получается облако точек. Чтобы выбрать только те точки, которые относятся к углам ВПП, применялся метод простого взвешивания [6] – предпочтение отдавалось точкам, расположенным наиболее близко к найденным границам ВПП и к границам области интереса. Точки, с наибольшим весом, назначались искомыми.

Расчёт собственных координат. Чтобы получить полное навигационное решение (координаты и углы ориентации) аппарата по известным пиксельным и линейным координатам ориентиров, следуя методу фотограмметрии [7], необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{x_{K1} - x_c}{f} = \frac{a_{31}(X_{K1} - X) + a_{32}(Y_{K1} - Y) + a_{33}(Z_{K1} - Z)}{a_{11}(X_{K1} - X) + a_{12}(Y_{K1} - Y) + a_{13}(Z_{K1} - Z)}, \\ \frac{(y_{K1} - y_c) \cdot \cos dx_1}{f} = \frac{a_{21}(X_{K1} - X) + a_{22}(Y_{K1} - Y) + a_{23}(Z_{K1} - Z)}{a_{11}(X_{K1} - X) + a_{12}(Y_{K1} - Y) + a_{13}(Z_{K1} - Z)}, \\ \dots \\ \frac{x_{Kn} - x_c}{f} = \frac{a_{31}(X_{Kn} - X) + a_{32}(Y_{Kn} - Y) + a_{33}(Z_{Kn} - Z)}{a_{11}(X_{Kn} - X) + a_{12}(Y_{Kn} - Y) + a_{13}(Z_{Kn} - Z)}, \\ \frac{(y_{Kn} - y_c) \cdot \cos dx_n}{f} = \frac{a_{21}(X_{Kn} - X) + a_{22}(Y_{Kn} - Y) + a_{23}(Z_{Kn} - Z)}{a_{11}(X_{Kn} - X) + a_{12}(Y_{Kn} - Y) + a_{13}(Z_{Kn} - Z)}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где x_{Ki}, y_{Ki} – пиксельные координаты ориентиров; i – номер ориентира; X_{Ki}, Y_{Ki}, Z_{Ki} – линейные координаты ориентиров в системе координат ВПП (X против направления посадки, Y вверх, Z дополняет до правой тройки); $a_{11} \dots a_{33}$ – элементы матрицы направляющих косинусов углов ориентации (неизвестны); x_c, y_c – координаты центра экрана фотоматрицы, f – фокус (фокусное расстояние оптической видеокамеры); dx_i, dy_i – левые части нечётных и чётных уравнений соответственно; X, Y, Z – координаты аппарата (неизвестные: X – продольная, Z – поперечная и Y – вертикальная составляющие).

Положим, что координаты аппараты совпадают с центром связанной системы координат БЛА. Поскольку неизвестные углы ориентации входят в систему через тригонометрические функции (направляющие косинусы), то система (1) решается численно. В представленной работе сделано допущение о том, что углы ориентации с высокой точностью рассчитывается в инерциальной навигационной системе. Тогда в системе (1) остаётся 3 неизвестных и её можно преобразовать:

$$\left\{ \begin{array}{l} (a_{11}dx_1 - a_{31}) \cdot (X_{K1} - X) + (a_{12}dx_1 - a_{32}) \cdot (Y_{K1} - Y) + (a_{13}dx_1 - a_{33}) \cdot (Z_{K1} - Z) = 0 \\ (a_{11}dy_1 - a_{21}) \cdot (X_{K1} - X) + (a_{12}dy_1 - a_{22}) \cdot (Y_{K1} - Y) + (a_{13}dy_1 - a_{23}) \cdot (Z_{K1} - Z) = 0. \\ \dots \end{array} \right.$$

Обозначим левый сомножитель каждого слагаемого как A_{ij} :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_{11} \cdot (X_{K1} - X) + A_{12} \cdot (Y_{K1} - Y) + A_{13} \cdot (Z_{K1} - Z) = 0 \\ A_{21} \cdot (X_{K1} - X) + A_{22} \cdot (Y_{K1} - Y) + A_{23} \cdot (Z_{K1} - Z) = 0. \\ \dots \end{array} \right.$$

Полученное выражение можно преобразовать к каноническому виду:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}X_{K1} & A_{12}Y_{K1} & A_{13}Z_{K1} \\ A_{21}X_{K1} & A_{22}Y_{K1} & A_{23}Z_{K1} \\ \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}.$$

В левой части явно выделяется матрица A , а в правой – матрица B . Решение с использованием метода наименьших квадратов (МНК) будет найдено в виде:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T \cdot B.$$

Заключение. В представленной работе описан алгоритм решения задачи позиционирования с помощью видеоизображения. Для оценки точности разработанного алгоритма проводилось моделирование с использованием авиасимулятора «FlightGear». Проведённый эксперимент показал, что предложенное решение на заключительном этапе планирования по глиссаде (на высоте принятия решений 15 м) обеспечивает погрешность 0,2 м по высоте и 0,4 м по боковому отклонению. Такие показатели удовлетворяют требованиям III категории точности, которые приведены в таблице 1.

ЛИТЕРАТУРА

1. Simon Scherer, Chinmaya Mishra and Florian Holzapfel, Extension of the capabilities of an automatic landing system with procedures motivated by visual-flight-rules, 33RD Congress of the international council of the aeronautical sciences, 2022, no. 33, pp. 11
2. Лукьянов В.В., Алексеев А.Н., Земляной Е.С., Чеканов К.А. Методика оценки точности посадки БЛА на взлетно-посадочную полосу // Автоматизация. Современные технологии. – 2022. – №12
3. YOLOv7 // Medium URL: <https://jonathan-hui.medium.com/yolov7-c9901eaa8e61> (дата обращения: 17.01.2023).
4. Introduction to FlightGear // FLIGHTGEAR FLIGHT SIMULATOR URL: <https://www.flightgear.org/about/> (дата обращения: 17.01.2023).
5. Детекторы углов // Хабр URL: <https://habr.com/ru/post/244541/> (дата обращения: 17.01.2023).
6. Семенов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В., Крянев А.В. Методы и модели принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. 2-е изд. М.: ЛЕНАНД, 2019. – 516 с.
7. Краснопецев Б.В. Фотограмметрия. – М.: УПП "Репрография" МИИГАиК, 2008. – 160 с.

A. N. Alexeev, E. S. Zemlyanyu, K. A. Chekanov (JSC «Ramenskoye Design Company», Ramenskoye). **Landing of a fixed-wing unmanned aircraft on the runway using keypoints.**

Abstract. The presented work describes the problem of positioning an unmanned aerial vehicle (UAV) at the landing stage by recognizing the runway. An algorithm based on computer vision (CV) has been developed that allows finding the corner points of the runway, and then using photogrammetry to determine the own coordinates of the UAV. The accuracy of the coordinates allows for automatic landing.

УДК 531.36

М. С. САЛИМОВ, Г. Р. САЙПУЛАЕВ
(Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва)

ПРОГРАММНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ДВУХКОЛЕСНОГО РОБОТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ПРИ РАЗНЫХ МОДЕЛЯХ ТРЕНИЯ

Проведено численное моделирование для трех моделей описания контактного взаимодействия двухколесного робота с опорной плоскостью: модель неголономной постановки задачи; модель, с использованием трения Кулона; модель поликомпонентного трения. Рассмотрено управление движением робота с помощью пропорционального дифференциального регулятора. Показано влияние модели контактного трения на точность выполнения программных движений при указанном способе управления.

Введение. Исследования движения мобильных колесных роботов актуальны ввиду широкого применения как в бытовой, так и в инженерной областях: роботы-пылесосы, колесные платформы с робототехнической системой. На движение колесных аппаратов существенно влияет трение. Предлагаемый доклад посвящен исследованию динамики двухколесного робота при описании контактного взаимодействия следующими моделями: неголономная модель, модель трения Кулона и модель поликомпонентного трения. При этом управление движением робота предлагается формировать в виде пропорционально-дифференциального (ПД) регулятора.

Постановка задачи. Рассматривается конструкция двухколесного робота с дифференциальным приводом, центр масс которого смещен относительно геометрического центра платформы по оси X на расстояние h_x , по оси Y – на расстояние h_y . Робот движется по горизонтальной шероховатой поверхности. К колесам приложены управляющие моменты M_1, M_2 . Расстояние между колесами равно L .

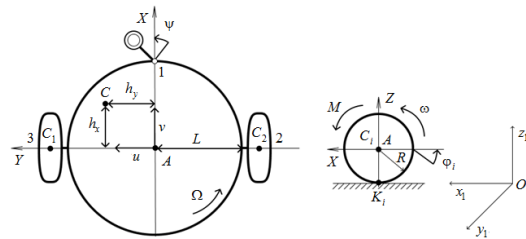


Рис. 1 Кинематическая схема робота

При рассмотрении движения робота в рамках неголономной модели, которое предполагает использование уравнений связи, характеризующие условие непроскальзывания колес относительно опорной плоскости, получаются следующие уравнения динамики робота:

$$\begin{aligned}
 m_1 \left[\dot{v} - h_y \dot{\Omega} - \Omega(u + h_x \Omega) \right] + 2m_k (\dot{v} - \Omega u) &= F_{\parallel 1} \cos \alpha_1 + F_{\parallel 2} \cos \alpha_2 - F_{\perp 1} \sin \alpha_1 - F_{\perp 2} \sin \alpha_2, \\
 m_1 \left[\dot{u} + h_x \dot{\Omega} + \Omega(v - h_y \Omega) \right] + 2m_k (\dot{u} + \Omega v) &= F_{\parallel 1} \sin \alpha_1 + F_{\parallel 2} \sin \alpha_2 - F_{\perp 1} \cos \alpha_1 - F_{\perp 2} \cos \alpha_2, \\
 \dot{\Omega} \left[J_{Cz} + 2J_{Kz} + m_1 (h_x^2 + h_y^2) + 2m_k L^2 \right] + m_1 \left[(\dot{u} + \Omega v) h_x - h_y (\dot{v} - \Omega u) \right] &= \\
 &= M_{C1} + M_{C2} + (F_{\parallel 2} \cos \alpha_2 - F_{\perp 2} \sin \alpha_2 - F_{\parallel 1} \cos \alpha_1 + F_{\perp 1} \sin \alpha_1) L, \\
 J_{Ky} \dot{\omega}_1 &= M_1 - M_{y1} - (F_{\parallel 1} \cos \alpha_1 - F_{\perp 1} \sin \alpha_1) R, \\
 J_{Ky} \dot{\omega}_2 &= M_2 - M_{y2} - (F_{\parallel 2} \cos \alpha_2 - F_{\perp 2} \sin \alpha_2) R,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где $F_{\parallel 1}, F_{\parallel 2}$ – две составляющие параллельной скорости скольжения v для двух колес; $F_{\perp 1}, F_{\perp 2}$ – две составляющие перпендикулярной скорости v для двух колес; M_{C1}, M_{C2} – слагаемые момента трения вращения для двух колес; $\dot{\Omega}$ – угловое ускорение платформы относительно вертикальной оси AZ ; $\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2$ – угловые ускорения колёс относительно осей их

вращения; J_{Cz} – момент инерции относительно центра масс; R – радиус колес; m_1 – масса платформы; m_k – массы колес; J_{Ky} и J_{Kz} – моменты инерции i -го колеса относительно оси y и z .

Для формирования управляющих воздействий будем использовать модель динамики робота, описанного в рамках неголономной механики [1].

Управляющие моменты M_1, M_2 на ведущих колёсах описываются уравнениями динамики двигателей постоянного тока для каждого из колес [2].

Движение двухколесного робота описываются разными уравнениями при использовании разных моделей контактного взаимодействия: неголономная модель [3], модель трения Кулона [4], модель поликомпонентного трения [1].

Результаты исследования. Проведем численное моделирование движения робота с дифференциальным приводом при использовании управления ПД регулятора.

Моделирование проводилось при $v(0) = 0,5$ м/с, $\omega(0) = 0,2$ 1/с, а в качестве программного движения было выбрано $v^d(t) = 0,5$ м/с, $\omega^d(t) = 0,2$ 1/с. Коэффициенты пропорционального дифференциального звена регулятора были выбраны из условия устойчивости.

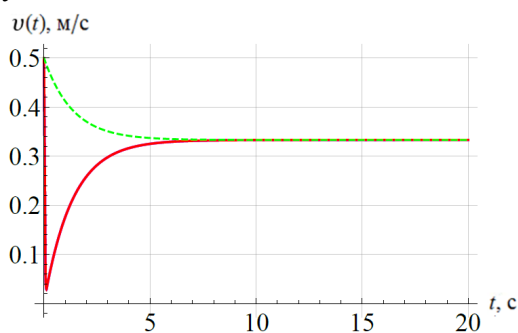


Рис. 2 Зависимость поперечной скорости

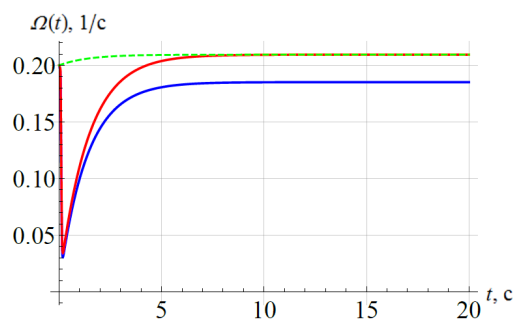


Рис. 3 Зависимость угловой скорости вращения платформы робота

где зеленая кривая – неголономная модель 1, красная кривая – модель 2 с трением Кулона, синяя кривая – модель 3 с поликомпонентным трением.

При использовании ПД регулятора (см. рис. 2 и 3) после окончания переходных процессов остаются статические ошибки в зависимостях линейной и угловой скорости движения платформы при рассмотрении моделей 1-3. При этом в модели 3 величина статической ошибки по угловой скорости вращения платформы робота больше, чем в моделях 1 и 2, что связано с учетом трения вращения и качения при описании динамики робота с помощью модели 3. Результаты моделирования показали, что использование управления в виде ПД регулятора имеет существенный недостаток в виде статической ошибки.

Заключение. Таким образом, результаты моделирования показали, что использование программного управления, полученного из неголономной модели 1, допустимо в моделях динамики робота, не учитывающих контактное трение колес, возникающее при учете комбинации их скольжения, вращения и качения. Но для более точного выполнения роботом программных законов движения необходимо принимать во внимание модель поликомпонентного трения при формировании управляющих воздействий.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Salimov M.S., Saypulaev G.R., Merkuriev I.V.** Four-dimensional Integral Model of Dry Friction on the Example of Wheel Movement / M.S.Salimov, G.R.Saypulaev, I.V.Merkuriev // *Journal of Physics: Conference Series, International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021)*, 7-8 October 2021, Vladivostok, Russia. – № 2096 (2021) 012043. – P. 1-11, doi:10.1088/1742-6596/2096/1/012043

2. **Alaci S., Ciornei F., Ciornei C.** Indetermination versus incompatibility in dynamic systems with dry friction / S.Alaci, F.Ciornei, C.Ciornei // *Journal of physics. conference series.* – 2020. – P. 1–6.
 3. **Буданов В. М., Девянин Е. А.** О движении колесных роботов / В.М.Буданов, Е.А.Девянин // Прикладная математика и механика. – 2003. – №2(67). – С. 244–255.
 4. **Salimov M.S., Saypulaev G.R., Merkuriev I.V.** Study of the Dynamics of a Two-Wheeled Robot with Allowance for the Four-Dimensional Dry Friction Model / M.S.Salimov, G.R.Saypulaev, I.V.Merkuriev // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability.* – 2022. – № 51. – P. 84–93, <https://doi.org/10.3103/S1052618822090163>
-

M.S.Salimov, G.R.Saypulaev (National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow). **Software control of the movement of a two-wheeled robot using a proportional differential regulator for different friction models**

Abstract. Numerical modeling has been carried out for three models describing the contact interaction of a two-wheeled robot with a reference plane: a model of non-holonomic formulation of the problem; a model using Coulomb friction; a model of multicomponent friction. The robot motion control using a proportional differential controller is considered. The influence of the contact friction model on the accuracy of program movements with the specified control method is shown.

УДК 004.021

А.С. ГИЗЗАТОВ, В.Ф. ИВАНОВ
(АО "НИИАС", Санкт-Петербург)

ПРИВЯЗКА КООРДИНАТ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА К ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ ПУТИ

Рассматривается алгоритм привязки координат железнодорожного подвижного состава к цифровой модели пути на основе данных, поступающих от интегрированной навигационной системы. Результатом работы алгоритма являются формируемые в реальном времени координаты подвижного состава, привязанные к центральной линии железнодорожного пути. Разработанный алгоритм находится на этапе тестирования с использованием реальных данных высокоточной системы позиционирования.

Введение. В современных системах управления подвижным составом (ПС) высокоточное позиционирование является важной обеспечивающей функцией [1]. Под системой позиционирования подразумевается интегрированная навигационная система, состоящая из набора датчиков, сервисов и алгоритмов, одним из которых будет алгоритм привязки координат ПС к цифровой модели пути (ЦМП) [2,3]. Одним из этапов работы системы позиционирования является привязка координат ПС к ЦМП. Несмотря на известные общие подходы в решении этой задачи в автотранспорте, в работе железнодорожного транспорта и его системы позиционирования имеется ряд особенностей, которые необходимо учитывать при разработке алгоритма. Предлагаемый доклад посвящен описанию разработанного алгоритма привязки координат к цифровой модели пути, особенностям его функционирования и результатам тестирования на реальных данных, собранных от высокоточной системы позиционирования ПС разных типов и эксплуатируемых в различных условиях.

Целью работы является разработка алгоритма привязки в реальном масштабе времени координат электропоезда к ЦМП.

Алгоритм привязки координат. Алгоритм должен решать следующие задачи:

- рассчитывать координаты ПС, используя данные высокоточной системы позиционирования и ЦМП в режимах привязки и счисления пути;
- определять номер занимаемого пути и его участка (рельсовой цепи);
- определять направление движения по стрелочному переводу;
- определять изменение направления движения по пути;
- рассчитывать расстояние до ближайших или заданных объектов железнодорожной инфраструктуры, занесенных в ЦМП.

Исходными данными для работы алгоритма является информация, поступающая от высокоточной системы позиционирования ПС [1]:

- вектор трехмерных (геодезических или геоцентрических) координат закрепленной точки на ПС с оценкой их точности;
- линейная скорость движения;
- кинематическое состояние (движение, остановка);
- информация о направлении перехода по стрелке (опционально).

Дополнительные требования, которые должен учитывать алгоритм:

- привязка должна осуществляться в трехмерном пространстве ввиду возможного движения ПС на разных высотных уровнях;
- возможность остановки и смены направления движения ПС в области стрелочного перевода;
- возможность привязки одновременно нескольких точек, закрепленных на корпусе ПС;
- незначительная нерегулярность поступления входных данных;
- возможность использования данных о направлении движения по стрелочному переводу.

Алгоритм содержит три основных этапа работы:

- 1) инициализация (начальная привязка);
- 2) привязка к участку центральной линии железнодорожного пути (геолинии ЦМП);
- 3) принятия решения о направлении прохождения стрелочного перевода (выбор геолинии ЦМП по направлению движения).

Обобщенная блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1.

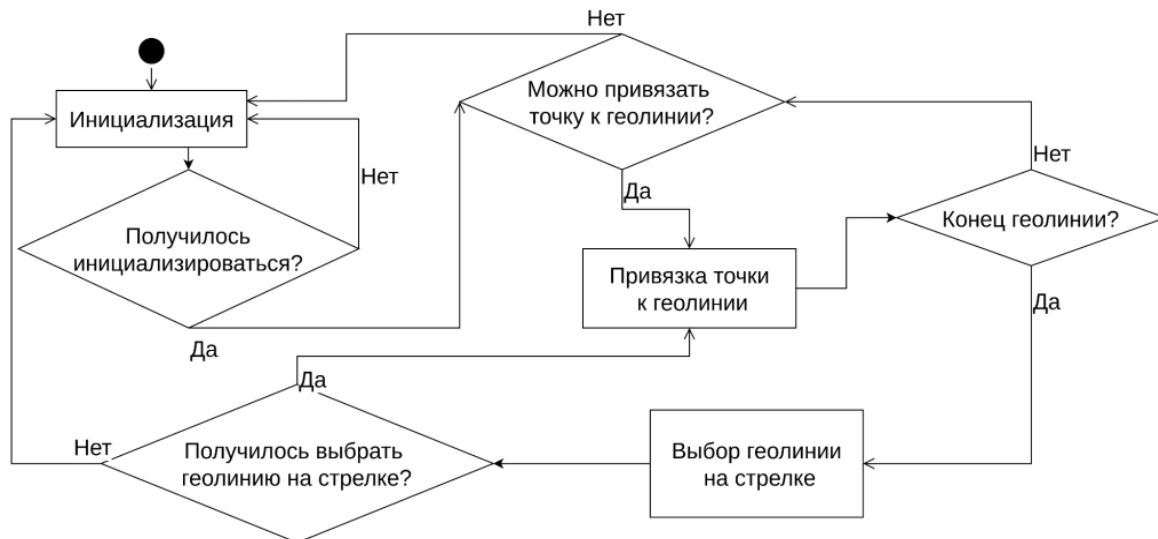


Рис. 1. Обобщенная блок-схема алгоритма

На первом этапе работы алгоритма определяется сегмент и геолиния ЦМП (включающая набор сегментов между парой стрелочных переводов или же между границами ЦМП и стрелочным переводом) на которых находится ПС, а также направление движения электропоезда по графу ЦМП. Особенностью этапа является принятие решения с учетом накапливаемых данных, которые нужны для инициализации алгоритма, и положения на ЦМП (стрелочный перевод или бесстрелочный участок пути).

На втором этапе вычисляются координаты ортогональной проекции на сегмент пути для координат точки ПС, что нужно для уточнения координат состава в пространстве, и определяется следующий сегмент пути по направлению движения.

На третьем этапе осуществляется принятие решения о направлении прохождения стрелочного перевода (прямо или по отклонению) с некоторой степенью достоверности, которая обеспечивается задаваемыми параметрами пространственного интервала, в котором будет приниматься решение, и критерием принятия решения. (Частным примером критерия для принятия решения может выступать информация, получаемая от детектора маневров, которая будет сопоставлять маневр и сегмент на стрелочном пререводе).

Заключение. В докладе представлен алгоритм привязки координат ПС к ЦМП, учитывающий необходимые особенности, связанные с движением ПС и функционированием бортовой высокоточной системы позиционирования. Алгоритм проходит отладку и тестирование с использованием реальных данных о движении ПС на сортировочной станции Октябрьской железной дороги и Московском центральном кольце, а также точных ЦМП. В перспективе разрабатываемый алгоритм будет использоваться в качестве штатного элемента программного обеспечения бортового программного обеспечения высокоточной навигационной системы.

Работа выполнена при поддержке АО «НИИАС».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Попов П.А., Иванов В.Ф.** Система высокоточного позиционирования беспилотного подвижного состава: Автоматика, связь, информатика. 2020. № 4. С. 16-20.
2. **Якушев Д.А.** Цифровая модель пути для беспилотного управления движением поездов: Автоматика, связь, информатика. 2021. № 4. С. 35-39.
3. **Щербаков В.В., Ковалева О.В., Щербаков И.В.** Цифровые модели пути - основа геодезического обеспечения проектирования, строительства (ремонта) и эксплуатации железных дорог: Геодезия и картография. 2016. № 3. С. 12-16

A.S. Gizzatov, V.F. Ivanov (AO NIIS, Saint Petersburg). **Binding the coordinates of the rolling stock to the digital track model.**

Abstract. The paper presents an algorithm for binding the coordinates of the rolling stock to the digital track model based on the data coming from the various sensors (navigation system). The aim of the work is to form coordinates during the movement of an electric train along railway tracks in real time. The above algorithm is in the process of testing on pre-recorded logs from the positioning system.

УДК 681.51

К. К. КОЗЮРА

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)

АЛГОРИТМ ОДОМЕТРИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ПРИВОДОМ АККЕРМАНА

Разработан алгоритм одометрии мобильного робота с приводом Аккермана. В качестве входных параметров для оценки положения робота используются скорости четырех колес и параметры неизменяемой геометрии колесной платформы. Проведено компьютерное моделирование, подтверждающее его работоспособность.

Введение. Задача одометрии является базовой в рамках навигации мобильных роботов. В настоящий момент она наиболее полно изучена на примере распространенного в мобильной робототехнике дифференциального привода [1]. Однако в ряде задач предпочтения отдаются другим типам приводов, так, в автомобилестроении широкое распространение получил привод Аккермана. Он позволяет обеспечить высокую устойчивость и управляемость на больших скоростях, поскольку его использование минимизирует осевое проскальзывание колес, при этом он позволяет ограничиться одним двигателем, в отличие от двух независимых для дифференциального привода.

В настоящий момент одометрия уже применяется в гражданском автомобилестроении [2–4] и в автоспорте [5]. Однако наиболее часто эти алгоритмы используют априорные данные зависимости углов поворота рулевых колес от рулевого воздействия. Поскольку большинство современных автомобилей оборудованы четырьмя датчиками скоростей колес, возникает вопрос о возможности использования этих данных для навигации. В докладе представлен алгоритм, решающий задачу счисления пути методом одометрии, применяя для расчетов данные о скорости четырех колес платформы.

Математическое описание алгоритма. Требуется получить оценку положения мобильного робота в декартовых координатах (x, y) с использованием метода счисления на основе данных о скорости колес и неизменяемой геометрии мобильного робота.

Угловая скорость эквивалентна для всех колес. Исходя из этого, для каждого колеса имеем:

$$V_i = R_i \times \omega, \quad (1)$$

где: V – линейная скорость колеса, R – радиус кривизны траектории колеса, ω – угловая скорость, i – номер колеса (заднее левое – L, заднее правое – R, переднее левое – FL, переднее правое – FR).

При равной ширине колеи осей имеем:

$$R_{FL} + (R_R - R_L) = R_{FR}, \quad (2)$$

где: R_L, R_R, R_{FL}, R_{FR} – радиусы кривизны траекторий заднего левого, заднего правого, переднего левого и переднего правого колес соответственно.

На рис. 1 схематично изображена геометрия Аккермана для четырехколесной платформы и виртуальные колеса, соответствующие велосипедной модели кинематики, позволяющей уменьшить количество требуемых для расчета траектории вычислений.

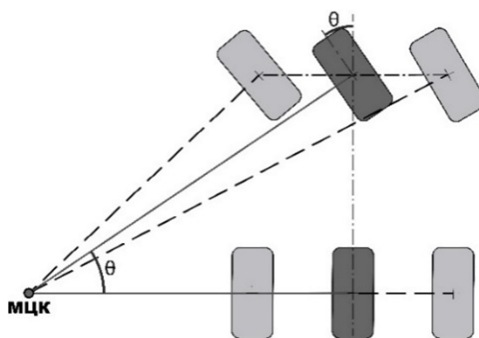


Рис. 1. Геометрия Аккермана

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Семакова А.А.

Далее в работе скорости четырех колес платформы приводятся к параметрам велосипедной модели. Угол θ – угол поворота виртуального рулевого колеса, МЦК – мгновенный центр кривизны траектории.

Тогда, для линейных скоростей колес с учетом геометрии платформы (рис. 1) и уравнений (1) и (2):

$$V_{FL} + (V_R - V_L) = V_{FR}, \quad (3)$$

где: V_L, V_R, V_{FL}, V_{FR} – линейные скорости заднего левого, заднего правого, переднего левого и переднего правого колес соответственно.

Для центра передней оси имеем:

$$V_{FX} = \sqrt{\frac{2 \cdot V_{FL}^2 + 2 \cdot V_{FR}^2 - (V_R - V_L)^2}{4}}, \quad (4)$$

где: V_{FX} – линейная скорость центра передней оси.

Тогда, с учетом неизменяемой геометрии колесной платформы, имеем:

$$\theta = \text{sgn}(V_R - V_L) \cdot \cos^{-1} \left(\frac{V_R + V_L}{2 \cdot V_{FX}} \right). \quad (5)$$

С учетом (5), уравнения, описывающие положение робота, с течением времени имеют вид:

$$x(T) = \frac{1}{2} \int_0^T (V_L(t) + V_R(t)) \cdot \cos(\alpha(t)) dt + x_0 \quad (6)$$

$$y(T) = \frac{1}{2} \int_0^T (V_L(t) + V_R(t)) \cdot \sin(\alpha(t)) dt + y_0 \quad (7)$$

$$\alpha(T) = \frac{1}{2L} \int_0^T \text{sgn}(V_R(t) - V_L(t)) (V_L(t) + V_R(t)) \cdot \tan \left(\cos^{-1} \left(\frac{V_R(t) + V_L(t)}{2 \cdot V_{FX}(t)} \right) \right) dt + \alpha_0, \quad (8)$$

где: $x(T), y(T)$ – оценка координат робота в момент времени T , x_0, y_0 – координаты робота в начальный момент времени. $\alpha(T)$ – оценка курсового угла в момент времени T , α_0 – курсовой угол в начальный момент времени, t – время, L – длина колесной базы.

Компьютерное моделирование. Для проверки корректности модели проведено моделирование в среде MATLAB с использованием пакета Vehicle Dynamics Blockset. Траектория движения модели мобильной платформы задавалась последовательностью точек с шагом не более 5 метров. Для управления движением использовался контроллер Stanley [6]. Источниками ошибок являлось дискретное во времени измерение скоростей и наличие в модели движения проскальзывания колес, не учитываемые в математической модели алгоритма. В процессе моделирования предполагалось, что известно истинное начальное положение.

Результаты моделирования приведены на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что на протяжении первых 15 секунд и приблизительно 100 метров оценка положения, полученная путем применения описанного алгоритма, сохраняет высокую степень достоверности, далее видно заметное отклонение полученной оценки от истинного положения вследствие накопления значимой погрешности угла. Аналогичные результаты были получены и при других параметрах моделируемого пути. Учитывая накапливаемую ошибку (евклидово расстояние между полученной оценкой и истинным положением) разработанный алгоритм может найти применение в составе гибридных навигационных систем [7].

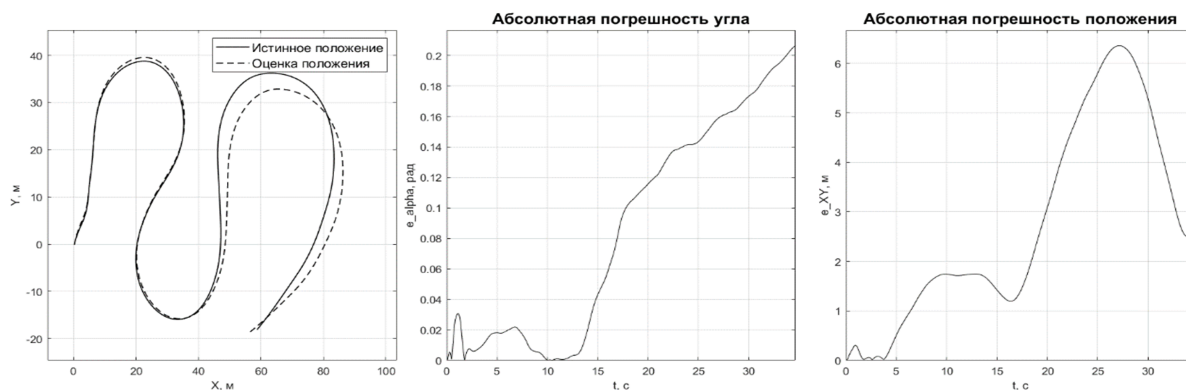


Рис. 2. Результаты моделирования алгоритма счисления пути на произвольной траектории

Заключение. Разработан алгоритм, решающий методом одометрии задачу счисления пути для мобильных роботов с приводом Аккермана, который использует для оценки положения данные о скорости четырех колес платформы. Проведено математическое моделирование, подтвердившее его работоспособность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Champion G., Bastin G., Dandrea-Novel B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots //IEEE transactions on robotics and automation. – 1996. – Т. 12. – №. 1. – С. 47-62.
2. Brunker A. et al. Odometry 2.0: A slip-adaptive EIF-based four-wheel-odometry model for parking //IEEE Transactions on Intelligent Vehicles. – 2018. – Т. 4. – №. 1. – С. 114-126.
3. Gupta A., Divekar R., Agrawal M. Autonomous parallel parking system for Ackerman steering four wheelers //2010 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research. – IEEE, 2010. – С. 1-6.
4. Patnaik A. et al. Design and Implementation of Path Trackers for Ackermann Drive based Vehicles //arXiv preprint arXiv:2012.02978. – 2020.
5. Weinstein A. J., Moore K. L. Pose estimation of Ackerman steering vehicles for outdoors autonomous navigation //2010 IEEE International Conference on Industrial Technology. – IEEE, 2010. – С. 579-584.
6. Hoffmann G. M. et al. Autonomous automobile trajectory tracking for off-road driving: Controller design, experimental validation and racing //2007 American control conference. – IEEE, 2007. – С. 2296-2301.
7. Ахмедов Д. Ш., Ибраев А. С. Использование одометрии для повышения точности инерциальной навигационной системы транспортного средства //Технические науки–от теории к практике. – 2017. – №. 5 (65). – С. 44-56

К.К. Koziura (Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University). **Odometry algorithm of a mobile robot with Ackerman drive**

Abstract. An algorithm of odometry of a mobile robot with an Ackerman drive has been developed. It uses the speed of the four wheels and the parameters of the immutable geometry of the wheel platform as input parameters for estimating the robot's position.

УДК 681.51

З. Х. НГУЕН, В. В. ПУТОВ
 (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
 им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ТИПА ТРИКОПТЕРА С ПОВОРОТНЫМИ ВИНТАМИ

Построена нелинейная математическая модель трикоптера с поворотными винтами. Разработана система управления в скользящих режимах с постоянными параметрами настройки регулятора и исследована динамика управляемой нелинейной модели при изменении в допустимых пределах аэродинамических коэффициентов.

Введение. В настоящее время одним из быстроразвивающихся видов роботов, являются беспилотные летательные аппараты (БПЛА). БПЛА создавались в военных целях, но сегодня использование БПЛА все больше распространяется на гражданскую деятельность. В гражданских областях системы БПЛА обычно используются в опасных зонах или в местах, где человеку сложно выполнять такие задачи, как поиск и поддержка в спасательных работах, аэрофотосъемка, наблюдение и предупреждение о лесных пожарах [1, 2], а также в ряде задач по исследованию ресурсов местности, картографированию, сбору данных, наблюдению за вулканами, прогнозированию погоды, мониторингу качества атмосферы и т.п. [3–5]. Особый интерес представляет новая малоисследованная разработка трикоптеров с поворотными винтами. Поэтому настоящий доклад посвящен построению полной нелинейной математической модели трикоптера, синтезу регуляторов на скользящих режимах с постоянной настройкой и компьютерному исследованию устойчивости модели при изменении ее неопределенных аэродинамических параметров.

Описание трикоптеров с поворотными винтами. Трикоптер с поворотными винтами имеет схожую конструкцию с конвертопланами Ми-30 [6] и БПЛА-конвертопланами серии ЭРА [7], спроектированными и разработанными в России (рис. 1). Механическая конструкция данного БПЛА с поворотными винтами имеет Т-образную форму и состоит из фюзеляжа с 6 исполнительными механизмами: 3 синхронных двигателя с постоянными магнитами, приводящие во вращение винты, которые в то же время могут независимо наклоняться с помощью 3 серводвигателей постоянного тока. Благодаря своей трансформируемой конструкции, трикоптеры с поворотными винтами могут взлетать и садиться вертикально, маневрировать на малых скоростях и совершать полеты на высокой скорости. Кроме того, поворотные винты позволяют выполнять не только поступательные маневры за счет наклона несущего винта, когда его фюзеляж остается в горизонтальном положении, но и взлет с места под углом 45 градусов с одновременным набором высоты и переходом в горизонтальный полет.

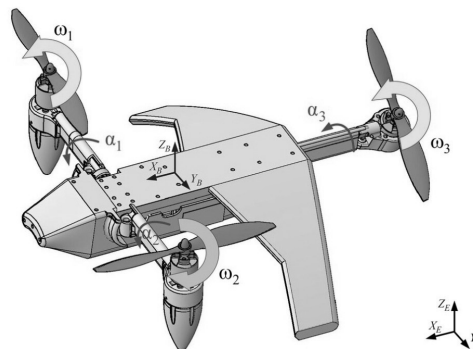


Рис. 1. Трикоптер с поворотными винтами

Построение математической модели. Динамика трикоптера с поворотными винтами может быть представлена математической моделью следующего вида:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G} = \mathbf{B}(\mathbf{q})\mathbf{H}\mathbf{u} + \mathbf{F}_d(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{F}_p, \quad (1)$$

где: $\mathbf{q} = [\xi^T \ \eta^T]^T \in \mathbb{R}^6$, $\xi = [x \ y \ z]^T$ – вектор координат центра масс трикоптера; $\eta = [\phi \ \theta \ \psi]^T$ – вектор углов ориентации трикоптера (углы крена ϕ , тангажа θ и рыскания ψ); $\mathbf{M}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_a & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_a \end{bmatrix}$ – симметричная матрица; $\mathbf{M}_a = m \mathbf{E}_{3 \times 3}$; m – масса трикоптера; $\mathbf{E}_{3 \times 3}$ – единичная матрица размера 3×3 ; $\mathbf{O}_{3 \times 3}$ – нулевая матрица размера 3×3 ; $\mathbf{J}_a(\mathbf{q}) = \mathbf{P}_{eb}^T \mathbf{J} \mathbf{P}_{eb}$ – симметричная матрица, где \mathbf{P}_{eb} удовлетворяют формуле $\mathbf{P}_{eb} \dot{\eta} = \boldsymbol{\Omega}$ – угловой скорости трикоптера в подвижной системе координат B , связанной с БПЛА; $\mathbf{J} = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$ – матрица момента инерции трикоптера;

$$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{J}_a - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\dot{\eta}^T \mathbf{J}_a) \end{bmatrix}; \mathbf{G} = [0 \ 0 \ mg \ 0 \ 0 \ 0]^T; \mathbf{B}(\mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{be} & \mathbf{O}_{3 \times 3} \\ \mathbf{O}_{3 \times 3} & \mathbf{E}_{3 \times 3} \end{bmatrix};$$

\mathbf{R}_{be} – матрица перехода из системы координат B в земную систему координат E ; $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ – матрица, зависящая от k_f и k_t – аэродинамических коэффициентов сил и моментов тяги и размеров трикоптера; $\mathbf{u} = [\omega_1^2 \sin(\alpha_1) \ \omega_2^2 \sin(\alpha_2) \ \omega_3^2 \sin(\alpha_3) \ \omega_1^2 \cos(\alpha_1) \ \omega_2^2 \cos(\alpha_2) \ \omega_3^2 \cos(\alpha_3)]^T$ – вектор входных воздействий, где ω_i – скорость вращения i -го винта, α_i – угол наклона i -го винта ($i = 1, 2, 3$); $\mathbf{F}_d(\dot{\mathbf{q}}) = [-\mathbf{R}_{be} \mathbf{d}_\xi \mathbf{D}_\xi(\dot{\mathbf{q}}) \ -\mathbf{d}_\eta \mathbf{D}_\eta(\dot{\mathbf{q}})]^T$ – вектор обобщенных сил и моментов сопротивления; $\mathbf{d}_\xi = \text{diag}(d_x \ d_y \ d_z)$ и $\mathbf{d}_\eta = \text{diag}(d_\phi \ d_\theta \ d_\psi)$ – матрицы коэффициентов аэродинамического сопротивления; $\mathbf{F}_p = [\mathbf{F}_c^T \ \boldsymbol{\tau}_c^T]^T \in \mathbb{R}^6$ – вектор обобщенных неизвестных возмущений.

Синтез управления в скользящем режиме. Синтез управления осуществляется на желаемой поверхности скольжения вида (2) [8-9]:

$$\mathbf{s}(t) = \dot{\mathbf{e}} + \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e}, \quad (2)$$

где $\mathbf{e}(t) = \mathbf{q}_d(t) - \mathbf{q}(t)$ – вектор ошибок слежения, $\mathbf{q}_d(t)$ – вектор желаемых траекторий трикоптера, $\boldsymbol{\Lambda}$ – диагональная числовая матрица с положительными собственными значениями.

В докладе закон управления на скользящем режиме, обеспечивающий экспоненциальную устойчивость уравнения ошибки, синтезируется на основе функции Ляпунова:

$$\mathbf{u} = [\mathbf{B}(\mathbf{q}) \mathbf{H}]^{-1} [\mathbf{M}(\mathbf{q})(\ddot{\mathbf{q}}_d + \boldsymbol{\Lambda} \dot{\mathbf{e}} + \varepsilon \text{sign}(\mathbf{s}) + \mathbf{K} \mathbf{s}) - \mathbf{F}_d(\dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}], \quad (3)$$

где ε , \mathbf{K} – параметры регулятора, которые нужно подбирать при синтезе управления; ε – положительное число; \mathbf{K} – симметричная, в частности, диагональная, числовая матрица с положительными собственными значениями.

Компьютерное моделирование и исследование движения. Моделирование системы управления нелинейной динамической модели в скользящем режиме при различных значениях аэродинамических коэффициентов выполнено в среде MATLAB/Simulink. В работе были выбраны следующие значения параметров закона управления в скользящем режиме: $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(2.5 \ 2.5 \ 2.5 \ 2.5 \ 2.5 \ 2.5)$, $\varepsilon = 5$, $\mathbf{K} = \text{diag}(25 \ 25 \ 25 \ 25 \ 25 \ 25)$. Результаты моделирования показаны на рисунках 2, 3, 4.

На рис. 2 показаны переходные процессы координат центра масс и углов ориентации трикоптера при номинальных значениях аэродинамических коэффициентов. Видно, что при этом си-

стема управления стабильно работает без перерегулирования, с высокой точностью и высоким быстродействием.

На рис. 3-4 показаны переходные процессы координат центра масс и углов ориентации трикоптера при увеличении и при уменьшении до 3 раз номинальных значений аэродинамических коэффициентов соответственно. При увеличении до 3 раз значений аэродинамических коэффициентов (рис. 3) точность регулирования уменьшается, а время регулирования увеличивается. При уменьшении до 3 раз значений аэродинамических коэффициентов (рис. 4) система управления трикоптером становится неустойчивой.

Таким образом, моделирование показало, что система управления трикоптером на скользящем режиме обеспечивает высокое качество переходных процессов при номинальных значениях параметров системы, но при изменении значений аэродинамических коэффициентов снижается качество системы управления трикоптером вплоть до неустойчивого состояния.

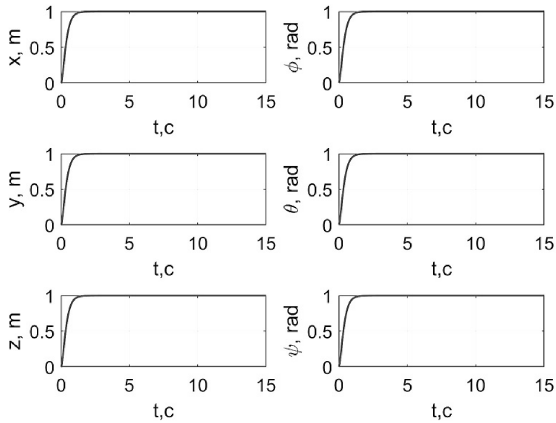


Рис. 2. Переходные процессы системы при номинальных значениях аэродинамических коэффициентов

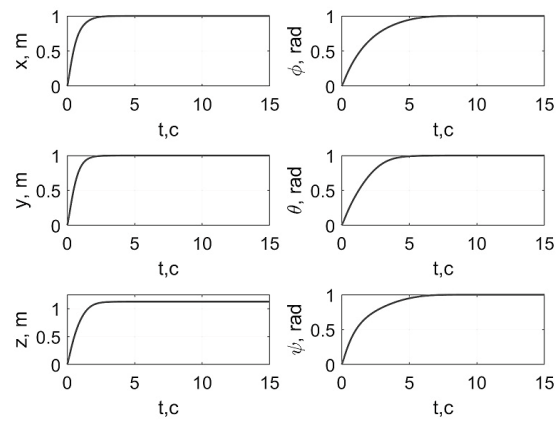


Рис. 3. Переходные процессы системы при увеличении до 3 раз значений аэродинамических коэффициентов

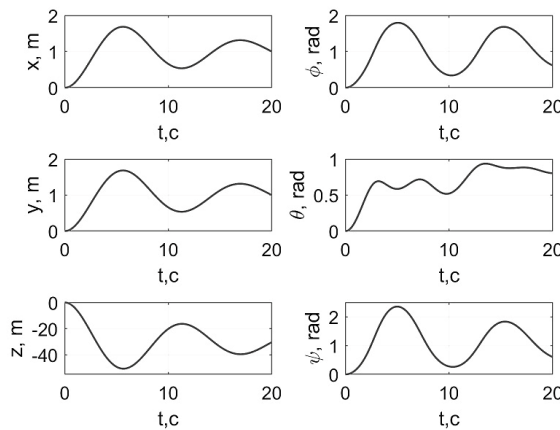


Рис. 4. Переходные процессы системы при уменьшении до 3 раз значений аэродинамических коэффициентов

Заключение. В работе построена математическая модель трикоптера с поворотными винтами. Разработана система управления трикоптером с использованием метода управления в скользящем режиме и исследовано его движение при различных значениях аэродинамических коэффициентов. На основе полученных результатов моделирования можно утверждать, что система управления трикоптером с нелинейными регуляторами с постоянными параметрами настройки регулятора удовлетворительно работает при известных постоянных значениях параметров системы, но при управлении в условиях неопределенности параметров не удовлетворяются требования улучшения летных характеристик и устойчивости движения при выполнении различных полетных заданий. Поэтому в дальнейших работах будут разрабатываться робастные адаптивные системы управления трикоптером с поворотными

винтами в условиях неопределенности параметров системы и влияния неизвестных аэродинамических возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **M. Okrent.** Civil UAV activity within the framework of European commission research, in Proceedings of The AIAA 3rd Unmanned Unlimited Technical Conference, Workshop and Exhibit, Chicago, IL, USA, September 2004, pp. 1–11.
2. **Nonami, K.** Prospect and recent research & development for civil use autonomous unmanned aircraft as UAV and MAV. J. Syst. Des. Dyn. 2007, 1, 120–128.
3. **P. Doherty.** Advanced research with autonomous unmanned aerial vehicles, in Proceedings of the 9th International Conference on The Principles of Knowledge Representation and Reasoning, Canada, June 2004, pp. 731–732.
4. **P. Vanblyenburgh.** UAVs: An overview, Air & Space Europe, vol. 1, no. 5-6, pp. 43–47, 1999.
5. **K. P. Valavanis, Ed.** Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy, ser. International Series on Intelligent Systems, Control, and Automation: Science and Engineering. Springer, 2007, vol. 33.
6. Конвертоплан Ми-30 (проект). [Электронный ресурс] – URL: <https://topwar.ru/20847-konvertoplan-mi-30-proekt.html> (дата обращения: 01/2023).
7. Беспилотные авиационные системы. [Электронный ресурс] – URL: https://files.sk.ru/navigator/company_files/1120970/1640282077_aeroXonewshortrus082021.pdf (дата обращения: 01/2023).
8. **Jinkun Liu.** Sliding Mode Control Using MATLAB. Academic Press. 2017.
9. **Андриевский Б.Р., Бобцов А.А., Фрадков А.Л.** Методы анализа и синтеза нелинейных систем управления. – М. Ижевск: Институт компьютерных исследований. 2018. - 336 с.

D. K. Nguyen, V. V. Putov (Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-Petersburg). **Simulation and study of the motion of unmanned aerial vehicles type tricopter with tilting propellers.**

Abstract. The non-linear mathematical model of a tricopter with rotary propellers is constructed. Besides, the control system with sliding mode controller is developed. The dynamics of the controlled non-linear model is investigated with a change in aerodynamic coefficients (within acceptable limits).

УДК 51.7

С. А. СУХОРУКОВ
(АО «НИИАС», Санкт-Петербург)

ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОЕЗДА НА ПЛАТФОРМАХ ОСТАНОВОЧНЫХ ПУНКТОВ ПО ДАННЫМ ЛИДАРА

Приводится алгоритм высокоточного позиционирования, базирующийся на непрерывно поступающих данных от лидара, колесной одометрии и цифровой модели пути. При подъезде к платформам на основе измерений формируются достоверные оценки координат электропоезда относительно реперного объекта – знака «Остановка первого вагона». Приведенный алгоритм проверен в процессе тестовых поездок и при испытаниях электропоезда Ласточка в составе системы позиционирования на московском центральном кольце (МЦК).

Введение. Одной из важнейших задач беспилотного электропоезда является точная остановка на платформах. Для этого требуется система позиционирования, обеспечивающая погрешность не превышающую 25 см при любых внешних условиях. Классические подходы в навигации базируются на использовании фильтров Калмана обрабатывающих данные от системы спутниковой навигации, инерциального модуля и колесной одометрии [1, 2]. Однако, спутниковая навигация не всегда обеспечивает высокую точность измерения координат и существенно зависит от доступности радионавигационных сигналов. Колесный одометр и инерциальные модули менее зависимы от внешних условий, но дают косвенную оценку координат и накапливают погрешность, обусловленную счислением.

В последние десятилетия бурное развитие получили алгоритмы визуальной и лидарной одометрии [3, 4], нашедшие широкое применение в мобильных роботах и автомобильном транспорте. При решении на их базе задачи позиционирования проявляются проблемы, характерные при обработке инерциальных измерений.

Предлагаемый доклад посвящен описанию алгоритма позиционирования на платформах остановочных пунктов, формирующего высокоточное навигационное решение в реальном времени. Для детектирования подъезда к платформе и инициализации привлекается информация от основной системы позиционирования. В обработке учувствуют лидарные измерения, координатная информация об объекте-репере знак «Остановка первого вагона», цифровая модель пути [5] и колесная одометрия.

Позиционирование электропоезда на платформах остановочных пунктов. *Целью исследования* является разработка алгоритма определения местоположения электропоезда на платформе при его торможении и остановке. Сформированная информация служит для контроля и уточнения решения от основной системы позиционирования.

Описание алгоритма. Алгоритм разделяется на два этапа: «Детекция подъезда» и «Инициализация и сопровождение знака», которые поочередно сменяют друг друга.

На этапе «Детекция подъезда» выполняется оценка расстояния до знака-репера по данным основной системы позиционирования. При преодолении определенного порога принимается решение о переходе к следующему этапу.

На этапе «Инициализация и сопровождение знака» сначала выполняется разовая инициализация, включающая в себя:

- восстановление траектории движения состава в локальной системе координат на основе цифровой модели пути;
- определение примерных локальных координат электропоезда;
- расчет координат центров передней и задней тележек головного вагона электропоезда и его ориентации;
- определение размеров и положения в пространстве первичной зоны знака-репера.

После инициализации выполняется итеративная оценка координат знака остановки (центра таблички) на основе лидарных данных, с коррекцией на кинематику состава. Для этого:

Научный руководитель: нач. отдела Иванов В.Ф.

- данные лидара, попавшие в первичную зону, переводятся в систему координат знака с учетом перемещения электропоезда;
- полученные точки добавляются к накапливающемуся стробу-буферу формируемой сцены наблюдаемого знака остановки;
- если центр знака еще не был определен, происходит кластеризация накопленных точек сцены и попытка определить кластер знака, иначе, если центр уже был определен ранее, то производится его уточнение по вторичной зоне знака-репера;
- если новое положение знака удалось вычислить, то рассчитывается расстояние до него, координаты электропоезда, погрешность и достоверность оценок, в противном случае оценка позиции не производится.

При выходе из зоны контроля знака происходит обратный переход к этапу «Детекции подъезда». Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 1.

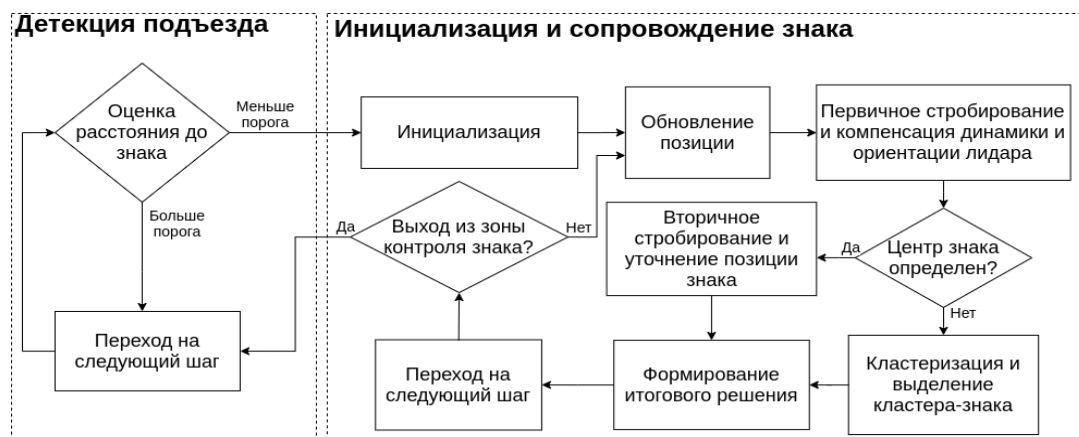


Рис. 1. Блок-схема алгоритма

Заключение. Представленный разработанный алгоритм позиционирования электропоезда на платформах остановочных пунктов по данным лидаров позволяет обеспечить выполнение требований технического задания к высокоточной системе позиционирования. Высокая точность определения координат (среднеквадратичное отклонение менее 4 см) подтверждается результатами тестовых поездок электропоезда и испытаниями системы позиционирования на МЦК в различных условиях эксплуатации.

Работа проводилась при поддержке АО «НИИАС»

ЛИТЕРАТУРА

1. Новиков П.В., Шейпак А.А., Герди В.Н., Новиков В.В., Енин В.Н. Алгоритм навигации наземных транспортно-технологических средств на основе данных интегрированной инерциально-спутниковой системы навигации и одометра, Известия МГТУ «МАМИ». - 2017. - Т. 11. - №2. - С. 31-39
2. Sun Z., Tang K., Wang X., Wu M., Guo Y., High-Speed Train Tunnel Navigation Method Based on Integrated MI-MU/ODO/MC Navigation. Appl. Sci. 2021, 11, P. 3680.
3. Xu Wei and Fu Zhang, FAST-LIO: A Fast, Robust LiDAR-Inertial Odometry Package by Tightly-Coupled Iterated Kalman Filter. IEEE Robotics and Automation Letters 6 (2020) P. 3317-3324.
4. Aqel, M.O.A., Marhaban, M.H., Saripan, M.I. et al. Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications. SpringerPlus 5, 1897 (2016).
5. Розенберг И.Н., Дулин С.К., Якушев Д.А., Разработка технологии создания высокоточной трехмерной цифровой модели пути на основе методов сбора пространственных данных системой мобильного лазерного сканирования, ИСУЖТ-2018 труды седьмой научно-технической конференции. 2018. С. 113-116.

S.A. Sukhorukov (AO NIIAS, Saint Petersburg). **Electrical train navigation based on lidar data.**

Abstract. The paper presents the high-precision positioning algorithm based on continuously incoming lidar measurements. The main goal of the work is to form reliable estimates of the train coordinates at the entrance to the platforms relative to the reference object – the stop sign. The proposed algorithm has been tested on the experiments with electrical train, in summer and winter conditions.

В АВТОРСКОЙ РЕДАКЦИИ
УДК 004.896, 007.52, 004.93'11

М. МОХРАТ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

АЛГОРИТМ ДЛЯ 3D РЕКОНСТРУКЦИИ ВНУТРЕННЕГО ПРОСТРАНСТВА НА ОСНОВЕ ГЛУБОКОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ, ОСНОВАННЫЙ НА МЕТОДЕ MULTI-VIEW STEREO

В работе представлен алгоритм, целью которого является выполнение качественной реконструкции трехмерных сцен внутри помещений с использованием больших наборов данных. Предложено использование надежной и стабильной монокулярной визуально-инерциальной SLAM-системы (системы одновременной локализации и картирования), а также надежного и геометрически согласованного алгоритма оценивания глубины на базе метода Multi-View Stereo (MVS). Особенностью этого метода является использование дополнительных метаданных для оценки глубины исходного монокулярного изображения. Предложенный алгоритм трехмерной реконструкции сцены качественно превосходит результаты использования метода масштабированной монокулярной оценки глубины.

Введение. Трехмерное картирование является важным компонентом во многих важных приложениях, таких как, например, автономная робототехника, AR/VR-приложения, трехмерная реконструкция наблюдаемой сцены и др. Сама трехмерная реконструкция обычно выполняется путем непрерывной обработки и интеграции информации о расстоянии (глубине), получаемой от таких датчиков, например, как камеры глубины или лидары, или даже от глубоких нейронных сетей, строящих вероятностные (прогнозные) карты глубины изображений. Картирование является частью трехмерной реконструкции, которая используется для построения и визуализации трехмерных сцен/объектов из двумерных изображений. Совершенствование методов трехмерного картирования необходимо для автономных мобильных роботов, которые могут использоваться в промышленной среде, в сфере логистики и т.п. Качественное трехмерное отображение сцены в реальном масштабе времени является одной из основных задач в области компьютерного зрения и робототехники. В связи с этим требуется как улучшение существующих алгоритмов, так и разработка новых методов для повышения качества трехмерного картирования.

Основной результат. В ходе исследования был проведен анализ разных методов трехмерной реконструкции. Классические методы создания трехмерных реконструкций из изображений обычно вычисляют глубину для каждого изображения, а затем проводят реконструкцию поверхности. Другим методом трехмерной реконструкции сцены в реальном масштабе времени является трехмерная реконструкция из карт глубины с использованием объемного представления усеченного знакового поля расстояния. В современных подходах с использованием методов глубокого обучения отказываются от оценки глубины. Вместо этого выполняется извлечение двумерных признаков изображения из ключевых кадров, а затем эти признаки проецируются обратно в трехмерное пространство для получения четырехмерного пространства признаков. Однако, использование трехмерных сверток делает их вычислительно сложными и требующими большого объема памяти, что приводит к невозможности их использования в режиме реального масштаба времени.

В данной работе используется метод последовательных монокулярных изображений MVS (Multi-View Stereo), с помощью которого происходит процесс оценки глубины каждого изображения, а затем выполняется слияние глубин и реконструкция самой поверхности. В работе представлена двумерная сверточная нейронная сеть и оценка ошибки реконструкции сцены, основанная на плоскостном сглаживании реконструкции и геометрических потерях. Такое сочетание геометрических метаданных при оценке ошибки позволяет качественно оценивать глубины поверхности.

Научный руководитель: д.т.н., профессор Колюбин С.А.

Для работы алгоритма предполагается, что монокулярная камера откалибрована и ее внутренние параметры известны. Положение камеры в пространстве необходимо оценивать с помощью визуально-инерциальной одометрии. Все подходы MVS используют только цветные изображения и их положения в качестве входных данных, отбрасывая дополнительную информацию, такую как, например, направление просмотра и оценку относительных пространственных координат. В этой работе был выбран один из лучших алгоритмов для решения этой задачи – SimpleRecon [1], где было сделано расширение оценки ошибки и на сопоставление изображений, которое использует легкодоступные метаданные для создания более качественных карт глубины. Такое расширение реализуется через принудительное использование определенных дополнительных каналов метаданных. Эти каналы кодируют информацию о трехмерных отношениях между изображениями, используемыми для построения оценки ошибки, позволяя нейронной сети лучше понимать относительную важность каждого исходного изображения для оценки глубины каждого конкретного пикселя.

В работе усовершенствовано получение высококачественной трехмерной реконструкции сцены. Основное внимание уделено использованию монокулярной системы визуально-инерциальной одометрии DMVIO [2] для обеспечения позиционирования камеры, что значительно повышает итоговую точность трехмерных реконструированных карт.

В ходе работы был выполнен ряд экспериментов, позволивших сравнить текущий уровень развития трехмерной реконструкции сцен с полученными в исследовании результатами. Была проведена оценка глубины кадров на основе модели LeReS [3] с последующим вычислением параметров масштабирования и сдвига для восстановления метрической глубины на основе использования разреженной информации от визуально-инерциальной SLAM-системы (системы одновременной локализации и картирования). Важным достоинством предлагаемого подхода является отсутствие необходимости в восстановлении метрической глубины, поскольку в случае использования системы MVS, которая использует как внутренние, так и внешние параметры камеры, а также пространственные координаты изображений, результаты представляют собой сразу метрическую глубину. Экспериментальная апробация проводилась на наборе данных VOID [4]. В экспериментальных исследованиях использовалось восемь исходных изображений для каждого опорного изображения с 64 плоскостями глубины.

Заключение. Представленное решение на основе подхода MVS способно генерировать более точные трехмерные карты, чем масштабированная монокулярная оценка глубины по количественным и по качественным показателям. Разработанный алгоритм имеет возможность сохранения геометрической согласованности ключевых кадров набора данных, что важно для крупномасштабной трехмерной реконструкции.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Sayed, J. Gibson, J. Watson, V. Prisacariu, M. Firman, and C. Godard, "SimpleRecon: 3d reconstruction without 3d convolutions," in Proceedings of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2022.
2. L. von Stumberg and D. Cremers, "DM-VIO: Delayed marginalization visual-inertial odometry," IEEE ICRA, vol. 7, no. 2, pp. 1408-1415.
3. Wong, X. Fei, S. Tsuei, and S. Soatto, "Unsupervised depth completion from visual inertial odometry," IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 5, no. 2, pp. 1899–1906, 2020.
4. W. Yin, J. Zhang, O. Wang, S. Niklaus, L. Mai, S. Chen, and C. Shen, "Learning to recover 3d scene shape from a single image," 2020.

M. Mohrat (ITMO University, St. Petersburg). **Algorithm for DNN-based 3D reconstruction of indoor environments based on Multi-View Stereo method.**

Abstract. The paper presents a procedure that aims to perform better 3D reconstruction on large indoor datasets by using a more robust and stable monocular visual-inertial SLAM system and a more robust and geometrically consistent depth estimator using Multi-View Stereo MVS, which constructs a higher efficient cost volume that uses additional metadata to estimate the depth of the original monocular image. This 3D reconstruction procedure outperforms both quantitatively and qualitatively the results of using a scaled monocular depth estimation.

В АВТОРСКОЙ РЕДАКЦИИ
УДК 629.05

Ж. МАХМУД, А.А. ПЕНЬКОВСКИЙ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

СИСТЕМА РОБАСТНОЙ ВИЗУАЛЬНО-ИНЕРЦИАЛЬНО-КОЛЕСНОЙ ОДОМЕТРИИ ДЛЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

В данной работе предлагается система для повышения робастности и точности визуальной одновременной локализации и картирования применительно к колесным роботам. Повышение качества оценивания траектории движения достигается как за счет робастного комплексирования данных камер с колесными энкодерами, так и за счет применения новой модели надежности визуальных маркеров. Результаты экспериментов показывают высокую робастность системы при работе в сложных визуальных условиях.

Введение. Для решения задач навигации применительно к мобильным роботам критически важным компонентом является точное оценивание собственного движения. Как правило, на борту колесных мобильных роботов источниками измерительной информации выступают камеры, инерциальные датчики и колесные энкодеры. Рабочая среда мобильных роботов зачастую включает подвижные объекты, изменяющиеся условия освещения и бедную визуальную текстуру. Кроме того, алгоритмы визуально-инерциальной одометрии применительно к колесным роботам показывают низкое качество работы при движении робота по плоскости с постоянным ускорением.

В данной работе предлагается система визуально-инерциально-колесной одометрии для мобильных роботов. Повышение качества оценивания собственного движения агента достигается путем формулировки задачи оценивания состояния робота на $SE(2)$ многообразии в предположении о планарности движения, а также посредством внедрения адаптивного алгоритма M-оценивания, нивелирующего влияние динамических объектов на основе информации, предоставляемой алгоритмом нейросетевой семантической сегментации изображений. Предложенная система апробирована на публичном наборе данных TUM RGB-D [1], который включает сцены с подвижными объектами, а также на авторской сенсорной установке на колесном мобильном роботе.

Методология. Архитектура предлагаемой системы включает в себя четыре основных потока: поток отслеживания, поток локального картирования, поток замыкания петли и поток глобальной оптимизации.

На этапе предварительной обработки информации в потоке отслеживания выполняется обработка изображений с извлечением визуальных признаков. Данные инерциальных и колесных датчиков подвергаются процедуре предварительного интегрирования между последовательными визуальными кадрами. Для использования семантической информации о среде интегрирован модуль семантической сегментации, входными данными для которого являются цветные изображения, а выходными данными - семантически размеченные изображения. В результате, каждой ключевой точке на изображении присваивается семантическая метка, которая представляет априорную информацию о степени надежности соответствующего визуального маркера в трехмерном пространстве.

Комплексирование информации с данными колесных энкодеров выполняется в потоках локального картирования и глобальной оптимизации. Для этого положения каждого визуального кадра параметризуются в пространстве $SE(2)$. Задача оценивания состояния агента формулируется в виде задачи оптимизации факторного графа состояний агента в скользящем окне заданного размера. В постановке оптимизационной задачи основными являются два вида ограничений: 1) геометрическая невязка между фактическими координатами ключевой точки, выделенной на плоскости изображения, и проекцией соответствующей точки из трехмерного простран-

Научный руководитель: д.т.н., профессор Колубин С.А.

ства на данную плоскость; 2) одометрическая невязка между фактическим текущим положением агента в пространстве и предсказанным текущим положением агента на основе положения в предыдущий момент времени. Преимуществом данной формулировки оптимизационной задачи на практике выступает сокращение дрефта оцененной траектории движения агента, а также легковесность оптимизационной процедуры за счет редуцирования избыточных оцениваемых переменных состояния агента.

Для сокращения влияния подвижных объектов на процедуру оценивания состояния агента предлагается адаптивный алгоритм М-оценивания. Он спроектирован с применением функции Баррона [2], которая генерирует функции потерь из широкого класса алгоритмов М-оценивания (L1-норма, функция Хубера, функция Коши и др.). Вырождение в определенную функцию потерь достигается посредством регулирования величины гиперпараметра, определяющего форму результирующей функции потерь. Значение данного гиперпараметра определяется на основе априорной семантической информации об объектах окружения с применением байесовской фильтрации для учета несовершенства результата семантической информации. Таким образом, при определенных значениях гиперпараметра влияние подвижных объектов окружения полностью исключается посредством применения подходящей функции потерь, отсеивающий anomalously высокие ошибки визуальных измерений, вызванные динамическими объектами.

Результаты экспериментов. Экспериментальная апробация разделена на две части: 1) валидация предлагаемого адаптивного алгоритма М-оценивания; 2) тестирование работоспособности всей системы в сложных визуальных условиях. Для проведения первой части экспериментов выбран набор данных TUM RGB-D, содержащий сцены с динамическими объектами. Адаптивный алгоритм М-оценивания внедрен в существующую систему визуальной одометрии ORB-SLAM2 [3]. Результаты тестирования сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Результаты тестирования адаптивного алгоритма М-оценивания на наборе данных TUM RGB-D

Название последовательности	RMSE, м	
	ORB-SLAM2	ORB-SLAM2 + адаптивный М-оценщик
fr3_w_h	0,351	0,054
fr3_w_rpy	0,662	0,124
fr3_w_st	0,090	0,009
fr3_w_xyz	0,459	0,014

Для проведения второй части экспериментов изготовлена собственная сенсорная установка, включающая камеру со встроенным инерциальным измерительным блоком. Данная установка жестко закреплена к колесному мобильному сервисному роботу, обладающему колесными энкодерами. Для проведения экспериментов записаны две последовательности: 1) *courier_1*, содержащая сцены с недостаточным освещением и подвижными объектами; 2) *courier_2*, отличающаяся от первой сценами с искусственным созданием условий бедной визуальной текстуры путем закрытия камеры на пути движения агента. Результаты экспериментов сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты тестирования системы на пользовательском наборе данных

Название последовательности	RMSE, м			
	Колесная одометрия	ORB-SLAM3 [4] (стерео)	ORB-SLAM3 (стерео-инерциальный)	Предлагаемая система
<i>courier_1</i>	1,647	2,514	3,161	0,513
<i>courier_2</i>	2,138	Сбой	Сбой	0,278

Заключение. В работе разработана система робастной визуально-инерциально-колесной одометрии для колесных мобильных роботов, функционирующих внутри помещений. Результаты экспериментов показывают высокую робастность системы как в средах с подвижными объектами, так и в сложных визуальных условиях. Направлениями дальнейших исследований

являются повышение робастности к возможным пробуксовкам колесного робота, а также повышение вычислительной эффективности системы за счет сокращения затрат на нейросетевую обработку изображений.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Sturm, N. Engelhard, F. Endres, W. Burgard and D. Cremers. A benchmark for the evaluation of RGB-D SLAM systems. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. 2012. pp. 573-580
2. J. T. Barron. A General and Adaptive Robust Loss Function. *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2019. pp. 4326-4334
3. R. Mur-Artal and J. D. Tardós. ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. *IEEE Transactions on Robotics*. 2017. Vol. 33. no. 5. pp. 1255-1262
4. C. Campos, R. Elvira, J. J. G. Rodríguez, J. M. M. Montiel and J. D. Tardós. ORB-SLAM3: An Accurate Open-Source Library for Visual, Visual-Inertial, and Multimap SLAM. *IEEE Transactions on Robotics*. 2021. Vol. 37. no. 6. pp. 1874-1890

J. Mahmoud, A.A. Penkovskiy (ITMO University, St. Petersburg). **Robust Visual-Inertial-Wheel-Odometry System for Indoor Mobile Robots.**

Abstract. In this work we propose a system for increasing robustness and accuracy of visual SLAM as applied to wheeled robots. An improvement of the quality of motion trajectory estimation is achieved both through robust fusion of camera data with wheel encoders and through the usage of a new visual landmark reliability model. The experimental results show high robustness of the system when operating in difficult visual conditions.

УДК 681.5

А. А. ШАБАШОВ, А. А. ПЛОТНИКОВ
(АО АНПП «ТЕМП-АВИА» и АПИ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, г. Арзамас)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ СИНТЕЗА КОНТУРА СТАБИЛИЗАЦИИ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА ОСНОВЕ КВАЗИЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ С ИЗМЕНЯЮЩИМИСЯ ПАРАМЕТРАМИ

В работе предлагается методика разработки адаптивного контура стабилизации беспилотного летательного аппарата, динамика которого существенно зависит от множества параметров. Предлагаемая методика заключается в использовании аппарата квазилинейных моделей с изменяющимися параметрами, тензорной алгебры и техники выпуклой оптимизации.

Введение. Построение современных систем управления беспилотных летательных аппаратов предполагает комплексное использование перспективных методов и технологий. Традиционные подходы создания систем управления часто не в состоянии обеспечить растущих требований к качеству управления, поскольку не учитывают множества различных факторов, воздействующих на систему. Для обеспечения высоких показателей качества систем управления по быстродействию, устойчивости и точности при значительной вариации параметров объектов управления и условий внешней среды, требуется применение новых концепций построения систем управления.

В работе предлагается методика построения адаптивного контура стабилизации беспилотного летательного аппарата на основе использования аппарата квазилинейных моделей с изменяющимися параметрами (quazi-Linear Parameter Varying – qLPV) и тензорной алгебры [1].

Методика синтеза. Основной задачей является представление исходной нелинейной динамики беспилотного летательного аппарата в виде qLPV модели в форме пространства состояний [2]. Это позволяет применять инструменты выпуклой оптимизации, в частности, эффективные алгоритмы на основе техники линейных матричных неравенств (ЛМН). Использование тензорной алгебры в виде тензорных произведений (Tensor Product – TP) позволяет привести qLPV-представление в политопную форму, что дает возможность применения указанных алгоритмов [3].

Разработка квазилинейной модели с изменяющимися параметрами. На начальном этапе исходная система записывается в виде qLPV:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A(\theta)x(t) + B(\theta)u(t), \\ y(t) &= C(\theta)x(t) + D(\theta)u(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где: $x(t)$ – вектор состояния; $y(t)$ – вектор выхода; $u(t)$ – вектор управления; $A(\theta)$, $B(\theta)$, $C(\theta)$, $D(\theta)$ – матрицы системы; t – время; θ – вектор варьируемых параметров. Отличительной особенностью этой системы является вектор θ , который может содержать как внешние параметры, так и внутренние (элементы вектора $x(t)$).

Затем производится генерация меняющейся по параметрам θ комбинации линейных инвариантных по времени (стационарных) моделей с использованием TP. Результатом преобразования является каноническая форма политопной или qLPV моделей, основанная на разложении многомерной системы по сингулярным значениям [4]. Поэтому модель (1) может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = S(\theta) \begin{pmatrix} x(t) \\ u(t) \end{pmatrix} = \left(S \prod_{r=1}^{|R|} w_r(\theta) \right) \begin{pmatrix} x(t) \\ u(t) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

Научный руководитель: профессор, д. ф.-м. н. Пакшин П.В.

где: S – тензор, построенный из линейных стационарных матриц систем $S_r = \begin{pmatrix} A_r & B_r \\ C_r & D_r \end{pmatrix}$, которые соответствуют вершинам выпуклого политопа; $r = 1, \dots, R$ – номер вершины; R – количество вершин; $w_r(\theta) \in [0 \ 1]$ – весовая функция разложения со свойством $\sum_{r \in R} w_r(\theta) = 1$; \boxtimes – знак тензорного произведения.

Постановка задачи синтеза. Пусть дана система (2). Требуется найти управление вида

$$u(t) = \left(\sum_{r \in R} w_r(\theta) F_r \right) x(t), \tag{3}$$

гарантирующее устойчивость замкнутой системы

$$\dot{x}(t) = \left(\sum_{r \in R} w_r(\theta) A_r + \sum_{r \in R} w_r(\theta) B_r F_r \right) x(t), \tag{4}$$

где: F_r – искомые стационарные матрицы регулятора. Матрицы F_r вычисляются с использованием техники выпуклой оптимизации в результате решения ЛМН, рассматриваемых далее.

Применение техники выпуклой оптимизации. В настоящей работе используется метод размещения полюсов на основе аппарата ЛМН, который позволяет расположить собственные числа матрицы замкнутой системы (4) в определенной области в левой комплексной полуплоскости для обеспечения желаемых свойств функционирования контура стабилизации.

Пусть заданы ограничения вида

$$\begin{cases} \alpha < \operatorname{Re} z < \beta \\ |\operatorname{Im} z| < \omega \end{cases}, \tag{5}$$

описывающие прямоугольную комплексную область (рис. 1), которые равносильны следующим системам ЛМН:

$$\begin{aligned} -z - \bar{z} + 2\alpha < 0 & \quad \leftrightarrow \quad -z - \bar{z} + 2\alpha < 0 \\ z + \bar{z} - 2\beta < 0 & \quad \leftrightarrow \quad z + \bar{z} - 2\beta < 0 \\ -(z - \bar{z})^2 - 4\omega^2 < 0 & \quad \leftrightarrow \quad \begin{bmatrix} -2\omega & z - \bar{z} \\ \bar{z} - z & -2\omega \end{bmatrix} < 0 \end{aligned}, \tag{6}$$

где $z \in \mathbb{C}$, а \bar{z} – комплексно-сопряженная z .

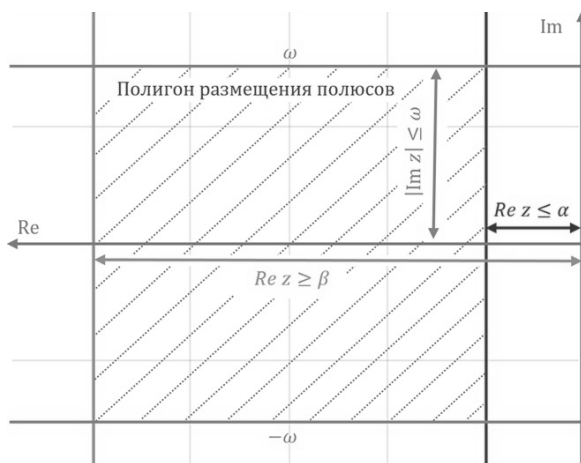


Рис. 1. Область на комплексной плоскости, формируемая ограничениями (5)

Для заданной области можно совершить переход от комплексной переменной z к системам ЛМН, связывающим функцию Ляпунова и искомые матрицы регулятора F_r [5]:

$$(1, z, \bar{z}) \leftrightarrow (X, A_r X + B_r Y_r, X A_r^T + Y_r^T B_r^T), \quad (7)$$

где X – функция Ляпунова: $X = X^T > 0$; $Y_r = F_r X$.

Совместное решение R систем ЛМН вида (6) (с учетом перехода (7)) относительно X, Y_r позволит учесть движение системы по выпуклой оболочке и получить матрицы усиления (4) в следующем виде:

$$F_r = Y_r X^{-1}. \quad (8)$$

Их адаптация к вариациям параметров θ осуществляется за счет применения того же ТР разложения, что и для qLPV модели. Это гарантирует устойчивость и управляемость системы стабилизации (4) при использовании регулятора (3).

Заключение. Полученные на текущем этапе результаты с использованием программного приложения SeDuMi [6] для решения ЛМН показали, что разработанная методика представляется эффективной для синтеза многомерной системы стабилизации беспилотного летательного аппарата. Оказалось, что ключевую роль здесь играет расположение вершин политопной модели [7], поэтому продолжение исследований планируется в направлении совершенствования техники построения этой модели. Кроме того, предполагается применение других алгоритмов решения ЛМН.

ЛИТЕРАТУРА

1. Baranyi P., Yam Y., and Varlaki P.: Tensor Product Model Transformation in Polytopic Model-based Control, CRC Press, Florida, 2013.
2. Сидорюк М. Е. Построение робастного алгоритма управления для подавления боковых автоколебаний модели самолета на трехступенном шарнире в аэродинамической трубе // Ученые записки ЦАГИ, 2014, №6, с. 87-99.
3. Jiang T., Lin D. Tensor Product Model-Based Gain Scheduling of a Missile Autopilot. Trans. Japan Soc. Aero. Space Sci. Vol. 59, No. 3, pp. 142–149, 2016.
4. Chao Z., Huang L., Needell D. HOSVD-Based Algorithm for Weighted Tensor Completion // J. Imaging 2021, 7, 110.
5. Chilali M., Gahinet P. H_∞ Design with Pole Placement Constraints: an LMI Approach. Automatic Control, IEEE Transactions on. 41. 358–367, 1996.
6. Sturm J. Using SeDuMi 1.02, A MATLAB toolbox for optimization over symmetric cones // Optimization Methods and Software. Vol. 11, No. 1-4, pp. 625–653, 1999.
7. Baranyi P. TP-Model Transformation-Based-Control Design Frameworks. Springer International Publishing Switzerland, 2016.

A.A. Shabashov, A.A. Plotnikov (JSC AR&PE “TEMP-AVIA” and API of NNSTU n.a. R.E. Alekseev, Arzamas). **Development of a method for synthesis of the stabilization loop of an unmanned aerial vehicle on the basis of a quasi-linear-parameter-varying model.**

Abstract. The paper proposes a method for developing an adaptive stabilization loop for an unmanned aerial vehicle, the dynamics of which significantly depend on many parameters. The proposed methodology consists in using the apparatus of quasi-linear models with changing parameters, tensor algebra and convex optimization techniques.

УДК 681.51

Д. П. МИХАЙЛОВ, А.А. ЦУКАНОВ, А.И. ЗАКИЕВА, Е.В. ИЛАТОВСКАЯ
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАЛЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ С УПРАВЛЯЕМЫМ ВЕКТОРОМ ТЯГИ

Беспилотные летательные аппараты получают все большее распространение. Одной из перспективных конструкций являются квадрокоптеры с управляемым вектором тяги. В рамках работы создана математическая и компьютерная модели квадрокоптера и построена система управления, обеспечивающая требуемые показатели качества и устойчивость квадрокоптера к воздействию ветра.

Введение. С помощью беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) решается ряд научных и прикладных задач, связанных с экологией, метеорологией, зоологией, сельским хозяйством, геологией, исследованиями климата и поиском полезных ископаемых. Часто используется спасательными и специальными службами.

Алгоритмы управления стандартным многороторным БПЛА, использующие различные методы для достижения результата, основаны на одной идее: горизонтальная тяга, которая приводит к изменению направления полета, может быть получена только при наклоне корпуса устройства. Очевидным недостатком такого управления является то, что даже в условиях прямолинейного движения устройству приходится преодолевать большее аэродинамическое сопротивление при наклоне корпуса, чем при горизонтальном расположении корпуса, а это означает, что необходимо увеличивать тягу, что приводит к большому расходу заряда аккумуляторов. Этого можно избежать, изначально расположив винты под углом к корпусу, но тогда устройство сможет двигаться без наклона корпуса только в одном направлении. В продолжение этой идеи появилась концепция БПЛА с управляемым вектором тяги. При том же энергопотреблении устройство с управляемым вектором тяги сможет развивать более высокую скорость и иметь большую эффективность, за счет меньшего воздушного сопротивления.

В работе представлена разработка системы управления квадрокоптера с управляемым вектором тяги винтов и решаются следующие задачи: описание математической модели; моделирование поведения квадрокоптера и создание системы управления БПЛА.

Математическая модель. Описана математическая модель квадрокоптера с управляемым вектором тяги, общий вид направления осей квадрокоптера с управляемым вектором тяги представлена на рисунке 1, система дифференциальных уравнений, описывающих квадрокоптер с управляемым вектором тяги представлена в системе уравнений (1). Вывод системы уравнений выходит за рамки этой статьи, уравнения выведены с использованием [1] и [2], а полный синтез системы уравнений содержится в работе [3].

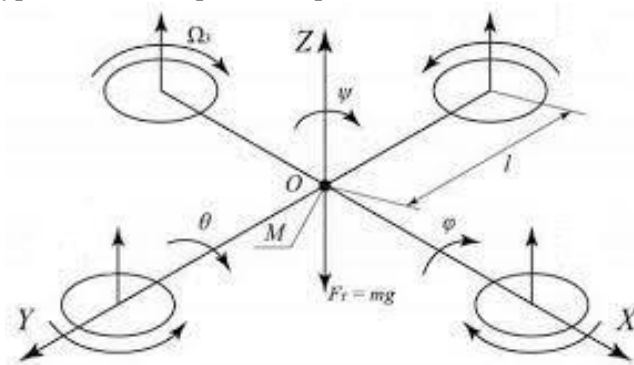


Рис. 1. Направления осей и сил квадрокоптера с управляемым вектором тяги в общем виде

Научный руководитель: к.т.н., доцент каф. Филатов Д.М.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_x(t)}{dt} = \frac{1}{m}(F_{M_x}(t) + F_{D_x}(t) + F_{O_y}(t)) - g \cdot \sin(\theta) + v_y(t) \cdot \omega_z(t) - v_z(t) \cdot \omega_y(t), \\ \frac{dv_y(t)}{dt} = \frac{1}{m}(F_{M_y}(t) + F_{D_y}(t) + F_{O_x}(t)) + g \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\varphi) - v_x(t) \cdot \omega_z(t) + v_z(t) \cdot \omega_x(t), \\ \frac{dv_z(t)}{dt} = \frac{1}{m}(F_{M_z}(t) + F_{D_z}(t) + F_{O_z}(t)) + g \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\varphi) + v_x(t) \cdot \omega_y(t) - v_y(t) \cdot \omega_x(t), \\ \frac{d\omega_x(t)}{dt} = \frac{1}{I_x}(M_{M_x}(t) + M_{D_x}(t) + M_{O_x}(t)) + (I_y - I_z) \cdot \omega_y(t) \cdot \omega_z(t), \\ \frac{d\omega_y(t)}{dt} = \frac{1}{I_y}(M_{M_y}(t) + M_{D_y}(t) + M_{O_y}(t)) + (I_z - I_x) \cdot \omega_x(t) \cdot \omega_z(t), \\ \frac{d\omega_z(t)}{dt} = \frac{1}{I_z}(M_{M_z}(t) + M_{D_z}(t) + M_{O_z}(t)) + (I_x - I_y) \cdot \omega_x(t) \cdot \omega_y(t), \end{array} \right. \quad (1)$$

где φ и θ – углы поворота корпуса квадрокоптера относительно плоскости горизонта по осям x и y соответственно; v и ω – линейные и угловые скорости квадрокоптера; F и M – соответственно силы и моменты сил действующих на квадрокоптер со стороны двигателей (индекс M), сопротивления воздуха (индекс D), внешних возмущений (индекс O); I – тензоры инерции; индексы x, y, z – означают проекции соответствующих векторных величин на оси декартовой системы координат, связанной с корпусом квадрокоптера; t – время; m – масса квадрокоптера; g – ускорение свободного падения.

Важно упомянуть о двух допущениях: первое – двигатель моделируется как инерционное (апериодическое) звено первого порядка, на вход которого подается заданное значение угловой скорости, а на выходе мы получаем текущее (измеренное) значение угловой скорости вращения, второе – квадрокоптер моделируется как твердое тело и представляет собой жесткую (недеформируемую) раму постоянной массы, симметричную по трем основным осям, с прикрепленной к ней в одной плоскости группой винтов, в которой также расположен центр масс БПЛА [4].

Описание системы управления. Кратко опишем основные задачи стоящие перед системой управления. Контроллер полета должен сгенерировать 8 сигналов: 4 задания скорости вращения и 4 угла поворота для каждого из двигателей, таким образом, чтобы квадрокоптер: 1) оставался в стабильном состоянии (угловые скорости и углы ориентации должны стремиться к нулю, а в состоянии равновесия должны быть равны нулю); 2) совершал полет по заданному маршруту, таким образом, что несоответствие между текущими координатами вертолета и заданными должно стремиться к нулю. Первая задача имеет наивысший приоритет, вторая является второстепенной [5, 6].

Контроллер полета представлен в виде суммы 6 контроллеров, работающих по следующим каналам управления: крен, тангаж, рыскание (курс), высота полета, положение в пространстве. Контроллер отслеживает не только сами углы и координаты, но и скорости, а также ускорения. Настройка и отладка системы управления выходят за рамки этой работы [7].

Моделирование полета. Система дифференциальных уравнений, отражающих математическую модель квадрокоптера, была перенесена в программный пакет Matlab/Simulink.

Проведена серия симуляций работы полученной системы управления при разных заданиях и внешних воздействиях, часть из них представлены ниже. В качестве показателей качества работы системы принято отклонение от задания не более 5%.

На рисунке 2 представлено поведение квадрокоптера со следующим заданием: взлет и полет по окружности радиусом 10 м [8, 9, 10]. Видно, что квадрокоптер следует по заданной траектории с задержкой в одну секунду.

На рисунке 3 представлено поведение квадрокоптера при изменении массы объекта. Моделирование показывает, что система обладает робастностью и справляется с изменением массы (50%, 200%) БПЛА.

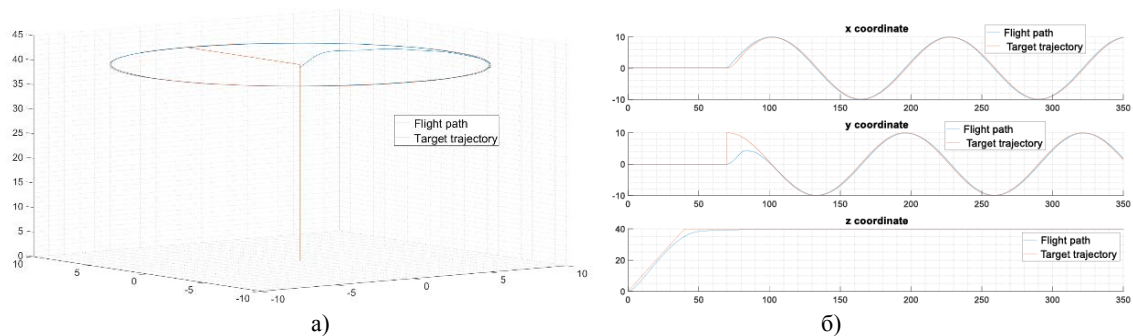


Рис. 2. а) траектория полета квадрокоптера б) переходные процессы в хуз координатах

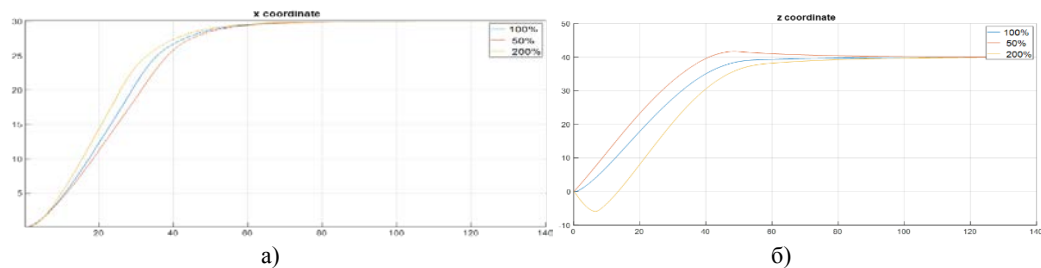


Рис. 3. Реакция СУ на изменение массы объекта а)х – координата б)z- координата

Заключение. В результате проведенных исследований были достигнуты следующие результаты: описана математическая модель квадрокоптера; разработана система управления; проведено моделирование работы этой системы. Система протестирована при движении по различным траекториям, исследована устойчивость системы при изменении массы БПЛА. Дальнейшая работа будет направлена на создание физического прототипа квадрокоптера с управляемым вектором тяги.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Savitsky A.V., Pavlovsky V.E.**, Quadcopter model and neural network control algorithm. V.M. Keldysh. 2017
2. **Tayebi, A. and McGilvray S.**, (2006), "Attitude Stabilization of a VTOL Quadrotor Aircraft", IEEE Transactions on control systems technology, Vol. 14, pp. 562–571.
3. **Tsukanov A.A., Filatov D.M.**, Small multirotor uav thrust vector control system, 2022
4. **N. Bucki and M. W. Mueller**, "Design and Control of a Passively Morphing quadcopter," in 2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2019, pp. 9116–9122.
5. **Markus Ryll, Davide Bicego and Antonio Franchi**. Modeling and Control of FAST-Hex: a Fully-Actuated by Synchronized-Tilting Hexarotor 2016 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Daejeon, South Korea
6. **Sergey V. Semendyaev**. Quadcopter with thrust vector control based on scotch yoke, Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT)
7. **G. Scholz, G. F. Trommer**. Model control of quadcopters with rotary rotors. (Institute of Systems Optimization; Institute of Technology; ITMO University, St. Petersburg, Russia)
8. **Oscar Oscarson**, Design, Modeling and Control of an Octocopter, Royal institute of technology 2015
9. **Markus Mikkelsen**, Development, Modelling and Control of a Multirotor Vehicle, Umeå University
10. **Hoffmann G. M., Huang H., Waslander S. L., Tomlin C. J.**, "Quadrotor Helicopter Flight Dynamics and Control: Theory and Experiment," AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit 20 - 23 August 2007, Hilton Head, South Carolina.

D.P. Mikhailov, A.A. Tsukanov, A.I. Zakieva, E.V. Ilatovskaya (ETU "LETI", Saint-Petersburg). **Small multirotor UAV thrust vector control system**

Abstract. Unmanned aerial vehicles (UAVs) are becoming more and more popular. One of the promising designs of UAVs are devices with a controlled thrust vector. As part of this work, a mathematical and computer model of a quadcopter was created and a control system (CS) was built that provides the required quality indicators. SU is resistant to wind and changes in the parameters of the object.

УДК 629.05

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

АЛГОРИТМ РОБАСТНОЙ НЕЛИНЕЙНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЛЯ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛЬНО-ИНЕРЦИАЛЬНОЙ ОДОМЕТРИИ В ДИНАМИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Большинство алгоритмов визуально-инерциальной одометрии основано на предположении о статичности окружения, которое нарушается в реальных условиях функционирования. Предлагается алгоритм робастной оптимизации для систем визуально-инерциальной одометрии применительно к динамическим средам. Результаты экспериментов показывают преимущества предлагаемого алгоритма над классическими решениями.

Введение. Алгоритмы визуальной и визуально-инерциальной одометрии составляют основную часть современных систем автономной навигации мобильных роботов. На сегодняшний день разработано большое количество систем на основе комплексирования данных камер различных типов с другими бортовыми датчиками. Такие алгоритмы демонстрируют приемлемую точность в простых сценариях функционирования робототехнических платформ вне и внутри помещений, однако в более сложных сценариях, таких как сцены с подвижными объектами, помимо шумов сенсоров проблемой являются аномальные измерения. Большинство существующих алгоритмов задействуют методы семантической сегментации изображений [1, 2], существенно сокращающие вычислительную эффективность системы, или алгоритмы детектирования динамических объектов с применением дорогостоящих камер глубины и 3D-лидаров [3, 4].

В работе предложен алгоритм нелинейной численной оптимизации для систем визуально-инерциальной одометрии, функционирующих в сценах с подвижными объектами. В основе предлагаемого решения лежит математический аппарат теории робастного оценивания [5], не требующий информации от алгоритмов нейросетевой обработки изображений и первичной информации о глубине сцены, обычно предоставляемой камерами глубины. Алгоритм апробирован на публичном наборе данных, содержащем сцены с динамическими объектами.

Постановка задачи. Задача визуально-инерциальной одометрии состоит в оценивании положения агента, обладающего набором датчиков, включающим камеру и инерциальный измерительный блок. При получении изображения в момент времени k выполняется извлечение ключевых точек, составляющих набор измерений камеры z_k . Вместе с тем, к моменту времени k относительно кадра $k-1$ агент принимает данные u_k инерциального блока, включающие линейные ускорения и угловые скорости. Классическая постановка задачи визуально-инерциальной одометрии является задачей поиска оптимального вектора состояния агента x_k , минимизирующего функционал, составленный на основе невязок по измерениям камеры и инерциального измерительного блока [6]:

$$x_k = \arg \min \left(\sum_{k \in K} C_I^{(k)} + \sum_{k \in K} \sum_{j \in J} C_V^{(k,j)} \right), \quad (1)$$

где: $C_I^{(k)}$ – невязка по индивидуальному накопленному набору измерений инерциального блока между $k-1$ и k кадрами; $C_V^{(k,j)}$ – невязка по измерению j камеры для кадра k .

Невязка по измерению камеры представляет собой геометрическую невязку между фактическими координатами ключевой точки, выделенной на плоскости изображения, и проекцией соответствующей точки из трехмерного пространства на эту плоскость. Невязка по измерениям инерциального блока обусловлена ограничениями, накладываемыми на основе результатов численного интегрирования показаний инерциального датчика.

Минимизируемый функционал вида (1) определяется оцениваемым вектором состояния x_k системы, элементы которого в задаче визуально-инерциальной одометрии включают положе-

Научный руководитель: д.т.н., профессор Колубин С.А.

ние и ориентацию агента в трехмерном пространстве, вектор линейной скорости, относительные преобразования между камерой и инерциальным блоком, погрешности акселерометра и гироскопа, заданные винеровскими последовательностями (random walk).

Методология. Классическая постановка задачи вида (1) включает в себя квадратичные функции от переменных вектора состояния. Для решения сформулированной задачи используется метод наименьших квадратов, который является чувствительным к аномально высоким значениям локальных компонент целевого функционала. Последнее в задачах визуальной инерциальной одометрии имеет отношение к выбросам, возникающим вследствие наличия подвижных объектов в окружении [7].

Для повышения робастности к выбросам предлагается применение визуальной невязки следующего вида:

$$C_V^{(k,j)} = \omega_l \cdot \left\| \hat{z}_l^{C_j} - \pi \left(T_{I_j}^{C_j} \cdot T_W^{I_j} \cdot p_l^W \right) \right\|^2 + \lambda_{\omega_l} \Phi(\omega_l, \mu), \quad (2)$$

где: $\hat{z}_l^{C_j}$ – положение l -й ключевой точки на плоскости изображения; $\pi(\cdot)$ – модель проецирования камеры, которая отображает 3D точку p_l^W в глобальной системе координат W на плоскость изображения с использованием j -го положения одометрии $T_W^{I_j}$ и внешнего преобразования $T_{I_j}^{C_j}$ из инерциальной системы координат I_j в систему координат камеры C_j ; ω_l – весовой коэффициент; $\|\cdot\|^2$ – L2-норма; λ_{ω_l} – регуляризатор, $\Phi(\omega_l, \mu)$ – функция потерь компоненты регуляризации; μ – контролирующий параметр.

Компонента регуляризации в (2) определяется на основе заданной функции потерь, которая в общем виде является невыпуклой. Это может привести к выходу на плато возможных решений в ходе оптимизационной процедуры. Следовательно, процедура минимизации полного энергетического функционала системы выполняется в чередующейся манере с изменением степени выпуклости функции потерь компоненты регуляризации посредством изменения значения контролирующего параметра μ . Это позволяет снизить влияние выбросов в данных на процесс оптимизации вектора состояния и решить проблему нулевых градиентов на границах плато.

Результаты экспериментов. За основу для проведения экспериментов взята система Visual-Inertial Navigation System (VINS) [8]. Модуль чередующейся оптимизации с регуляризацией по визуальной невязке добавлен в алгоритм оценивания траектории движения. Для проведения экспериментов выбран автономный (моно) инерциальный режим. В качестве среды для проведения экспериментов выбран синтетический набор данных VIODE [9]. Этот набор данных включает последовательности, моделирующие условия, варьирующиеся в зависимости от степени динамичности окружения по количеству подвижных объектов.

Таблица 1 содержит результаты тестирования работы классической системы VINS и ее предлагаемого модифицированного варианта. В качестве численной метрики точности оценки траектории выбрана метрика Root Mean Squared Error (RMSE), показывающая отклонение оцененной траектории от истинной.

Таблица 1

Результаты тестирования алгоритмов на наборе данных VIODE

Название последовательности	RMSE, м	
	VINS классический	VINS модифицированный
parking_lot/1_low	1,45	0,36
parking_lot/2_medium	4,92	0,65
parking_lot/3_hard	Сбой	0,69
city_day/1_low	0,22	0,47
city_day/2_medium	0,66	0,34
city_day/3_hard	0,84	0,24

Заключение. Разработан алгоритм нелинейной численной оптимизации для систем визуально-инерциальной одометрии применительно к сценам с подвижными объектами. Предлагаемое решение не требует алгоритмов нейросетевой обработки изображений и дорогостоящих камер глубины. Результатом внедрения предложенной методологии робастной нелинейной оптимизации в систему визуально-инерциальной одометрии стало повышение точности восстановления траектории движения агента в средах с подвижными объектами. Направления дальнейших исследований включают глубокий анализ влияния настройки параметра, контролирующего форму функции потерь в компоненте регуляризации, с целью выявления баланса между точностью оценивания траектории и временем оптимизации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhao, Xiongwei et al. "OFM-SLAM: A Visual Semantic SLAM for Dynamic Indoor Environments." *Mathematical Problems in Engineering* 2021 (2021): 1-16.
2. Chao Yu, Zuxin Liu, Xinjun Liu, Fugui Xie, Yi Yang, Qi Wei, Qiao Fei. DS-SLAM: A Semantic Visual SLAM towards Dynamic Environments. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)* (2018). p. 1-7.
3. B. Bescos, J. M. F'acil, J. Civera, and J. Neira, "DynaSLAM: Tracking, mapping, and inpainting in dynamic scenes," *IEEE RA-L*, pp. 1-8, 2018.
4. Yang, D.; Bi, S.; Wang, W.; Yuan, C.; Wang, W.; Qi, X.; Cai, Y. DRE-SLAM: Dynamic RGB-D Encoder SLAM for a Differential-Drive Robot. *Remote Sens.* 2019, 11, 380.
5. Black, M.J., Rangarajan, A. On the unification of line processes, outlier rejection, and robust statistics with applications in early vision. *Int J Comput Vision* 19, 57–91 (1996).
6. Geneva, Patrick et al. "OpenVINS: A Research Platform for Visual-Inertial Estimation." *2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (2020): 4666-4672.
7. A. Penkovsky, M. Mohrat, J. Mahmoud and S. Kolyubin, "Robust Visual-Inertial Odometry for Ground Robots in Dynamic Environments," *2023 30th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, Saint Petersburg, Russian Federation, 2023, pp. 1-4.
8. T. Qin, P. Li, and S. Shen. Vins-mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator. *IEEE Transactions on Robotics*. 2018. Vol. 34. no. 4, pp. 1004–1020.
9. K. Minoda, F. Schilling, V. Wüest, D. Floreano and T. Yairi. VIODE: A Simulated Dataset to Address the Challenges of Visual-Inertial Odometry in Dynamic Environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2021. Vol. 6. no. 2. pp. 1343-1350.

A.A. Penkovskiy (ITMO University, St. Petersburg). **Robust Nonlinear Optimization Algorithm for Visual-Inertial-Odometry System in Dynamic Environments.**

Abstract. Most visual-inertial odometry algorithms are based on the static world assumption, which is violated in real-world scenarios. We present a robust optimization algorithm for visual-inertial odometry systems as applied in dynamic environment. The experimental results show the superiority of the proposed algorithm over the conventional solutions.

УДК 681.51

Н. И. КАВОНКИН

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
им В.И. Ульянова (Ленина) «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

СТЕНД ДЛЯ ОТЛАДКИ АЛГОРИТМОВ УДАЛЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДОВ

Рассматривается вопрос программно-аппаратного обеспечения процессов отладки алгоритмов управления движением судов. Так как использование симуляторов зачастую не обеспечивает необходимой полноты исследования, предложен стенд, позволяющий на этапах проектирования и отладки алгоритмов управления автономными судами совместить удобство применения подходов имитационного моделирования.

Введение. Рост вычислительных мощностей современных электронно-вычислительных машин (ЭВМ) позволяет применять в бортовых системах всё более совершенные алгоритмы управления, вплоть до оценок обстановки в реальном времени с использованием машинного зрения, однако сколь бы не был идеален алгоритм, несовершенства в технологии принятия решений будут приводить к необходимости получения команд от человека.

Перспективным направлением в судостроении являются беспилотные суда [1], такие устройства, в зависимости от поставленных задач, разрабатываются с телеуправлением, навигацией по геолокации, или системами машинного зрения. При разработке таких систем для сокращения времени и затрат удобно использовать моделирование процессов на компьютере [2]. Однако, зачастую при полностью контролируемых лабораторных экспериментах программные устройства управления движением показывают идеальные результаты, но в реальных условиях могут происходить сбои [3]. Поэтому необходимо изучать поведение таких устройств в условиях, наиболее приближенных к будущим рабочим условиям, но при этом не создающих опасности травматического развития событий.

Целью работы является разработка стенда для отладки алгоритмов удалённого управления движением судов. Предполагается использование комплекса на различных этапах синтеза алгоритмов управления от проверки работоспособности концептуальных прототипов до испытаний их работы в реальных условиях.

Требования к стенду. Управляющие сигналы к стенду могут формироваться от органов телеуправления, алгоритмов навигации по маршруту и динамического позиционирования и систем управления с использованием компьютерного зрения. Алгоритмы, формирующие такой сигнал, могут располагаться как на борту управляемого судна, так и удалённо, на ЭВМ осуществляющей обработку и отображение текущих параметров работы стенда. Сигналы управления и телеметрии формируются согласно стандарту IEC 61162-1 [4].

Передача команд и сопутствующей информации между пультом управления и макетом судна должна осуществляться посредством беспроводного широкополосного соединения стандарта IEC 802.11 xx. Для проведения испытаний важно наличие резервных каналов связи. Первый для проверки поведения алгоритма в условиях потери соединения и переключения на резервный метод передачи данных. Второй – для экстренного возврата макета судна при проведении испытаний в реальных условиях.

В процессе отладки алгоритмов управления движением важно, чтобы телеметрические данные и команды, отправляемые в обе стороны, можно было восстановить для определения причин потенциальных сбоев. Так как сбой может быть вызван, в том числе ошибками передачи данных, запись должна осуществляться на обоих концах соединения.

Научный руководитель: д.т.н., доцент Бубнов Е.А.

Результаты и особенности реализации. С использованием [5-8] была разработана и зарегистрирована следующая программа для ЭВМ «Программа моделирования движения судна с учетом ветро-волновых возмущений», которая реализует модель движения судна согласно стандарту IEC 62065 [9].

Программа при инициализации устанавливает параметры модели движения (максимальные скорости, максимальные ускорения, начальные состояния моделируемого объекта, его рулевой и двигательной подсистем, а также окружающей среды) из конфигурационного файла или использует значения по умолчанию. Для решения дифференциальных уравнений движения судна, приведенных в IEC 62065 [9] применяется метод Рунге-Кутты 4-ого порядка точности. В результате работы программы формируются текущие координаты судна относительно точки старта, проекции компонент скорости на координатные оси, связанные с судном и угол рысканья.

При помощи библиотек OpenGL [10] и GLFW [11] разработан интерфейс, реализующий возможности:

- наблюдения за параметрами модели движения или макета судна,
- задания управляющих сигналов с помощью органов управления входящих в комплекс (джойстик и клавиатура),
- наблюдения за траекторией судна,
- протоколирования коммуникационных сообщений.



Рис. 1. Общий вид стенда отладки алгоритмов удалённого управления движением судов

Стенд предполагает несколько режимов работы:

- программная эмуляция движения судна – первоначальная отладка алгоритма;
- программно-аппаратное моделирование (данные о положении органов управления поступают с неподвижного макета судна) – для отладки управления и обратных связей по датчикам;
- управление макетом судна, для испытаний «на воде» – испытания работоспособности в реальных условиях.

Заключение. Разработан стенд, позволяющий проводить отладку алгоритмов управления движением в контролируемых условиях, оценивать влияние ошибок датчиков на работу алгоритмов управления, изучать поведение системы в реальных условиях «на воде». Таким образом, очередное исследование алгоритмов удалённого управления беспилотным судном в рамках отладочного стенда и макета судна в дальнейшем позволит ускорить разработку таковых.

(Работа проводилась по внутренней НИР СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Володин А.Б., Преснов С.В., Якунчиков В.В.** На пути к автономному судоходству, Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 355–363.
2. **Маматов Е.М., Боева А.В., Михайлюк Е.А., Ядута А.З.** 2019. Применение системнообъектного имитационного моделирования в задачах разработки и апробации алгоритмов управления движением беспилотных транспортных средств. Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 46 (4): 741–753. DOI 10.18413/2411-3808-2019-46-4-741-753
3. **Янчин И.А., Петров О.Н.** К вопросу об автономных и безэкипажных судах: вызовы и преимущества для отрасли информационных технологий и телекоммуникаций // T-Comm. 2020. №11. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-ob-avtonomnyh-i-bezekipazhnyh-sudah-vyzovy-i-preimuschestva-dlya-otrasli-informatsionnyh-tehnologiy-i-telekommunikatsiy> (дата обращения: 06.02.2023).
4. **IEC 61162-1** Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Digital interfaces – Part 1: Single talker and multiple listeners.

5. Глушков С. В., Мажирин И. А., Тюльканов А. К. Математическая модель движения судов с нестандартным движительно-рулевым комплексом, Вестник МГТУ. 2018. Т. 21, № 4. С. 548-557.
6. Юдин Ю.И., Сотников И.И. Математические модели плоскопараллельного движения судна. Классификация и критический анализ, Вестник МГТУ. 2006. Т. 9, № 2. С. 200-208..
7. Лукомский Ю. А., Чугунов В. С. Системы управления морскими подвижными объектами. Учебник.—Л: Судостроение, 1988. —272 с.
8. Справочник по теории корабля. В3-х т.Т.3.Л.: Судостроение, 1985. 544с.
9. IEC 62065 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems - Track control systems - Operational and performance requirements, methods of testing and required test results.
10. OpenGL 4.5 Reference Pages [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://registry.khronos.org/OpenGL-Refpages/gl4/> , свободный
11. GLFW3Documentation [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.glfw.org/docs/latest/>, свободный.

N.I. Kavonkin (ETU «LETI», Saint-Petersburg). **Stand for debugging algorithms for remote control of vessel motion.**

Abstract. For unmanned ships, the problem of testing control algorithms is relevant; the use of simulators often does not provide the necessary completeness of the study. The described stand allows combining the convenience of using simulators and scale models at the initial stages of development.

УДК 623.09

А.А.ЧЕРНИКОВ
(МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва)

ПОРТАТИВНЫЙ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС КОНТРОЛЯ ПОЛЕТОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассматривается проблема контроля полетов малых беспилотных летательных аппаратов. Предлагается разработанный компактный переносной комплекс обнаружения и противодействия. Приведены результаты полевых испытаний, которые показали эффективность созданного прототипа комплекса.

Введение. Широкое распространение и доступность различных моделей беспилотных летательных аппаратов привело к тому, что данный вид авиационной техники может быть использован для несанкционированного доступа на охраняемые объекты или закрытые территории. Зачастую обнаружить такие летательные аппараты достаточно сложно в силу их маленького размера, а для предотвращения их беспрепятственного перемещения необходимо использовать специальное оборудование, использующее узконаправленные антенны.

В этой связи задача автоматизации обнаружения и предотвращения беспрепятственного доступа беспилотных летательных аппаратов актуальна для задачи охраны больших территорий, городской инфраструктуры, школ, больниц, производств и других важных объектов.

Изучив информацию о современных беспилотных летательных аппаратах, которые активно используются в различных сферах деятельности, а также о имеющихся средствах противодействия им, выяснилось, что конструкции антенн в наиболее распространенных системах противодействия имеют узкую диаграмму направленности. Другими словами, эти средства предназначены для защиты только от визуально обнаруженных беспилотных летательных аппаратов и требуют специальной подготовки от оператора. Кроме того, в их составе отсутствует автоматизированная станция обнаружения.

Таким образом, настоящая работа посвящена разработке универсального малогабаритного переносного программно-аппаратного комплекса для обнаружения и противодействия беспилотным летательным аппаратам.

Разработка портативного программно-аппаратного комплекса контроля полетов беспилотных летательных аппаратов. Для разработки станции обнаружения были изучены основные тактико-технические характеристики квадрокоптеров фирмы DJI и Autel, которые в настоящее время массово применяются для аэро- и фотосъемки, мониторинга местности и других задач. На основе полученных данных были сделаны следующие выводы:

1. все беспилотные летательные аппараты используют общепринятые диапазоны для управления и передачи видеосигналов;
2. алгоритм управления построен таким образом, что при ухудшении качества связи в рабочем диапазоне, аппаратура автоматически переходит на запасной диапазон;
3. для устойчивого полета и удержания в точке используется приемник GPS/GLONASS, также он используется для возвращения в точку взлёта и движения по заранее заданному маршруту;
4. как правило, в алгоритме управления заложено что:
 - при пропадании связи с пультом управления беспилотный летательный аппарат автоматически возвращается в точку взлёта с использованием координат GPS/GLONASS;
 - при пропадании связи с пультом управления и отсутствии сигнала с приёмника GPS/GLONASS беспилотный летательный аппарат по заданной программе осуществляет аварийную посадку;
 - при пропадании связи с пультом управления и отсутствии сигнала с приёмника GPS/GLONASS беспилотный летательный аппарат возвращается в точку взлёта по изображению местности, над которой он пролетел.

На основе этих выводов был предложен программно-аппаратный комплекс контроля полетов беспилотных летательных аппаратов, состоящий из компактных станции обнаружения и станции противодействия, и соответствующего программного обеспечения.

После изучения основных технических характеристик наиболее применяемых серийных беспилотных летательных аппаратов выяснилось, что единственным способом их обнаружения является радиоразведка — приём и анализ передаваемых радиосигналов [1]. Наиболее подходящим для этих целей является анализатор спектра, позволяющий вести контроль наличия сигналов в необходимом диапазоне частот [2]. Такой анализатор спектра лег в основу станции обнаружения.

Управление анализатором осуществляется с помощью аналоговых измерительных приборов. Дополнительно в программно-аппаратной части комплекса предусмотрена возможность использовать мобильное приложение дистанционного контроля за состоянием мониторинга, а также получать уведомления об обнаружении беспилотного летательного аппарата на мобильное устройство сотрудника, осуществляющего охрану объекта или территории.

Станция обнаружения неспособна противостоять беспилотным летательным аппаратам, нарушающим границы контролируемых территорий. Для решения этой проблемы была разработана станция противодействия. Оборудование станции противодействия размещается во влагонепроницаемом герметичном кейсе из ABS пластика, в котором установлены:

1. аккумуляторная батарея;
2. генераторы помех;
3. пассивный радиатор для охлаждения генераторов помех;
4. три специальные антенны [3, 4] в верхней части кейса.

Станция противодействия не имеет в своём составе модуля подавления GPS/GLONASS сигналов, что позволяет снизить ее размер и пользоваться этими системами на охраняемой территории. Основная задача станции — не подпустить часто применяемые квадрокоптеры DJI, AUTEL и им подобные к охраняемым территориям на близкое расстояние, а также предотвратить проникновение беспилотных летательных аппаратов в зоны запрета полетов.

Были проведены испытания программно-аппаратного комплекса, которые показали следующие результаты:

- более десяти различных моделей FPV квадрокоптеров упали на землю;
- DJI Mavic 3 вернулся в точку взлета.

Заключение. В работе представлен автоматизированный портативный комплекс радиоразведки и противодействия беспилотным летательным аппаратам, изготовленный с использованием бюджетных общедоступных комплектующих. Управление программно-аппаратным комплексом может осуществляться, как с помощью приборной панели, так и с помощью планшета или мобильного устройства. Результаты испытаний показали высокую эффективность применения комплекса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беньковский З.** Любительские антенны коротких и ультракоротких волн. М.: Радио и связь, 1983. 480 с.
2. **Малинин Р.М.** Справочник радиолюбителя - конструктора. М.: Энергия, 1965. 655 с.
3. **Ротхаммель К.** Антенны. М.: Транспортная компания, 2021. 656 с.
4. **Яковлев А.Ф.** Широкодиапазонные направленные антенные решётки из вибраторных элементов. Спб.: НИЦ Связи ВМФ, 2007. 141 с.

A.A.Chernikov (The Bauman Moscow State Technical University, Moscow). **Requirements to formatting the papers of the Conference of Young Scientists “Navigation and Motion Control”.**

Abstract. The paper considers the problem of countering unmanned aerial vehicles used in combat operations and has developed a complex of intelligence and counteraction to them. As part of the work, field tests were conducted, which showed the effectiveness of the implemented prototypes. A comparison with similar systems has been made.

Секция 2.
ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 531.383-1:537.2

Е.Д. ИВАНОВА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

**ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ЭЛЕКТРОДОВ ПОДВЕСА
НА УХОДЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА**

Предложен метод оценки вторичных уведящих моментов бескарданного электростатического гироскопа, связанных с геометрией электродов подвеса. Исследовано их влияние на уходы гироскопа. Проведены численные оценки вторичного дрейфа.

Введение. В базовой модели ухода электростатического гироскопа (ЭСГ) [1-3] учтены основные (первичные) моменты сил, действующих на сферический ротор, взвешенный в поле электрического подвеса, которые обусловлены отклонением формы ротора от правильной сферы, а также осевой и радиальной составляющими дисбаланса. Однако для обеспечения в приборах повышенной точности требуется учитывать вторичные моменты, к числу которых относятся моменты, связанные с отклонениями электродов от нормального положения.

Целью работы является исследование влияния геометрии электродов подвеса на уходы электростатического гироскопа и проведение численных оценок дрейфа.

Подход к оценке вторичных моментов. В электростатическом подвесе ротор находится во взвешенном состоянии под действием пондеромоторных сил электрических полей, создаваемых системой электродов.

Момент пондеромоторных сил, действующих по нормали n к поверхности тела S , относительно центра масс ротора может быть найден по формуле [4]:

$$M = \iint_S f(\vartheta, \varphi)[r, n]dS, \quad (1)$$

где: r – радиус-вектор, проведенный из центра масс в точку поверхности ротора гироскопа, $f(\vartheta, \varphi)$ – плотность сил на поверхности, определяемой углами ϑ и φ (r, ϑ, φ – сферические координаты в жестко связанной с телом системе координат с началом в его центре масс).

В случае сферичного ротора, у которого центр масс совпадает с центром геометрии, нормаль n , в направлении которой действуют силы, совпадает с радиус-вектором r , проведенным из центра масс в точку поверхности ротора. Так, векторное произведение $[r, n]$ становится равным нулю, вследствие чего уведящий момент также обращается в ноль.

Плотность пондеромоторных сил, действующих со стороны каждого i -го двойного электрода ($i=1\dots 6$), определяется формулой [4]:

$$f_i = \frac{1}{2} \varepsilon_0 V_i^2 d_i^{-2}, \quad (2)$$

где ε_0 – электрическая постоянная, V_i – напряжения на электродах подвеса, d_i – рабочий зазор между ротором и электродом.

Напряжения на противоположных электродах подвеса, расположенных на оси с номером j ($j=1\dots 3$), при наличии опорного напряжения V_0 имеют вид [5]:

$$V_{2j-1} = V_0 + V_j; \quad (3)$$

$$V_{2j} = V_0 - V_j, \quad (4)$$

где V_j – напряжение управления на соответствующей оси подвеса.

При идеальной сборке подвеса и абсолютно сферичном роторе, расположенном в его центре, плотности пондеромоторных сил, создаваемых на поверхности ротора каждым электродом, одинаковы, т.е. $f_{2j-1} = f_{2j} = f_0$. Поскольку подвес бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ) состоит из кубика и шести вставных электродов, при сборке этого устройства возникают перекосы электродов подвеса, которые могут вызвать неравномерность рабочего зазора между электродами и ротором и, как следствие, изменение значений пондеромоторных сил.

Для решения поставленной задачи использовался программный комплекс компьютерного инженерного анализа, построенный на методе конечных элементов (МКЭ). В основе данного метода лежат две главные идеи: дискретизация исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций.

Решение задачи в программном комплексе может быть описано следующим образом. На основе трехмерной геометрической модели ротора с шестью парами электродов была построена конечно-элементная модель и заданы исходные данные. Затем на противоположные электроды были поданы напряжения, имеющие различные полярности на внутреннем и внешнем элементах. Далее с использованием заданных уравнений (1) и (2) осуществлялся численный расчет электростатической задачи.

В работе решение задачи проводится в двух постановках: при равномерном и неравномерном зазоре между ротором и электродами.

Результаты численных оценок. При равномерном зазоре интегрирование всех элементарных пондеромоторных сил, действующих со стороны электрода на ротор:

$$F_k = f_k \cdot dS_k, \quad (5)$$

где: f_k – плотность пондемоторной сил на k -ом конечном элементе; S_k – площадь k -ого конечного элемента; k – номер конечного элемента, дает результирующую силу $F = 10^{-2}$ Н. Это позволяет получить при осевом дисбалансе $a = 0,04$ мкм дрейф ω_{op} , равный $0,4^\circ/\text{ч}$. Для применения в навигационных системах этот дрейф может быть уменьшен на два порядка за счет алгоритмической компенсации.

Рассмотрен случай, когда зазоры между электродами и ротором неравномерны и отличаются на 10% относительно исходной величины 30 мкм. То есть зазор с одной стороны равен 33 мкм, а с другой – 27 мкм. За счет перекоса электродов возникает дополнительное силовое воздействие, вызывающее дополнительный дрейф, который может быть рассчитан путем интегрирования элементарных сил и составляет порядка 10^{-2} °/ч. Эту величину в большинстве применений БЭСГ необходимо учитывать программным путем.

Заключение. Предложен численный метод оценки вторичных уведящих моментов БЭСГ. Проведена оценка уходов, связанных с погрешностями сборки подвеса, а именно с неправильным положением электродов. В результате анализа определены численные оценки дрейфа гироскопа. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при перекосе одной пары противоположных электродов относительно одной из осей возникающие дополнительные пондеромоторные силы создают дрейф гироскопа, который необходимо учитывать в существующей модели дрейфа для различных применений.

Разработанный метод позволит в дальнейшем провести оценку и других вторичных моментов, например, связанных с несимметрией площадей электродов и неидеальностью их сфер.

ЛИТЕРАТУРА

1. Буравлев А.П., Ландау Б.Е., Левин С.Л. О модели дрейфа ЭСГ для БИНС // Судостроительная промышленность, №30, 1992.
2. Буравлёв А.П., Ландау Б.Е., Левин С.Л., Романенко С.Г. Модель дрейфа бескарданного электростатического гироскопа и идентификация ее параметров // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент-№1(13), 2002.

3. **Ландау Б.Е.** Электростатический гироскоп со сплошным ротором. СПб: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. 150 с.
4. **Мартыненко Ю.Г.** Движение твёрдого тела в электрических и магнитных полях. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 368 с.
5. **Буравлёв А.П.** Экспериментальные исследования партии приборов БЭСГ-М (Отчёт № 31/78 от 29.12.2008 г.). 38 с.

E.D. Ivanova (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg). **Influence of the suspension electrodes geometry on electrostatic gyro drifts**

Abstract. The paper proposes a method of estimating the secondary error torques of a gimballess electrostatic gyro, concerned with the suspension electrodes geometry. The influence of the error torques on the gyro drifts is studied. Numerical evaluation of the secondary drift is performed.

УДК 681.51

Е. А. ЯКУШИНА, В. В. СВЯТЫЙ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург)

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАБОТУ МАЯТНИКОВОГО КОМПЕНСАЦИОННОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Исследуется влияние температурных изменений на работу и выходные характеристики маятникового компенсационного акселерометра. Предложено конструктивное решение, позволяющее минимизировать влияние изменений температуры на параметры акселерометра без внедрения системы термостабилизации.

Введение. Точность решения навигационной задачи подвижных объектов в большей степени зависит от точности работы инерциальных модулей, основой которых являются акселерометры и гироскопы. В основе работы всех акселерометров лежит один принцип: измерение отклонения инерционной массы под действием внешних сил. Чувствительным элементом (далее – ЧЭ) акселерометра является инерционная масса, выполненная на элементах различного конструктивного исполнения. Изменение температуры приводит к изменению геометрических размеров элементов конструкции, их взаимодействию и оказывает влияние на выходные параметры прибора. Настоящая работа посвящена исследованию влияния температурных изменений на маятниковый компенсационный акселерометр с металлическим торсионом в качестве упругого подвеса и поиску конструктивных решений, позволяющих минимизировать это влияние.

Маятниковый компенсационный акселерометр с металлическим торсионом. Использование металлического торсиона в конструкции маятникового компенсационного акселерометра позволяет упростить конструкцию, технологию производства и сборки с сохранением точностных параметров прибора [1-5] по сравнению с кварцевыми или кремниевыми акселерометрами. Кроме того, металлический торсион обеспечивает возможность подачи питания на обмотку датчика момента без дополнительных токоподводов.

В исследуемом приборе торсион представляет собой тонкую пружину плоского или круглого сечения, растянутую в корпусе прибора с закрепленным на ней ЧЭ, имеющим степень свободы по углу поворота вокруг оси торсиона (рис. 1). Осевая и радиальная жесткость подвеса обеспечиваются габаритными размерами и усилием натяжения торсиона. Кроме упрощения конструктивного решения, использование торсиона позволяет обеспечить достаточную прочность и жесткость подвеса при меньших упругих моментах, соответственно, обеспечить высокую точность и малый порог чувствительности: на 2 порядка меньше, чем у акселерометров на кварцевом подвесе [2,5]. К недостаткам такого подвеса стоит отнести сложность конструирования подвижной части с малой массой с целью обеспечения радиальной жесткости и прочности подвеса в условиях линейных, ударных и вибрационных перегрузок. Именно поэтому упругий подвес на торсионе нашел успешное применение в жидкостных приборах, где необходимый диапазон измеряемых ускорений, надежность, ударо- и виброустойчивость обеспечиваются заполнением объема прибора жидкостью. Жидкость компенсирует вес подвижной части и обеспечивает необходимое демпфирование угловых и линейных перемещений.

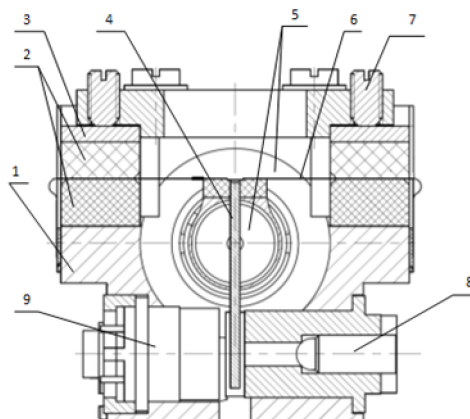


Рис. 1. Конструкция маятникового компенсационного акселерометра с металлическим торсионом:

- 1 – корпус, 2 – керамические пластины крепления торсиона, 3 – прижимная пластина (пружина), 4 – ЧЭ, 5 – магнитопровод датчика момента (МДМ), 6 – торсион ЧЭ, 7 – прижимной винт, 8 – светодиод, 9 – фотодиод.

Выбор основных конструктивных параметров торсиона. Достоинство использования упругих элементов заключается в простоте изготовления, достижения высоких классов точности выполнения геометрических размеров, чистоты обработки. Однако на этапе проектирования важно обеспечить следующие параметры [6-9]:

- наличие большой контактной площади в местах крепления;
- минимальное изменение усилия поджатия торсиона при изменении температуры окружающей среды и во времени;
- незначительные влияния температуры окружающей среды на качество крепления растяжки на её физические свойства;
- отсутствие локальных концентраций напряжений в местах заделки торсиона;
- конструкция крепления должна обеспечивать простоту операции закрепления и центрирования торсиона, а также равномерность распределения по ней сжимающих напряжений и другие.

В исследуемых приборах для крепления металлического торсиона был выбран метод зажатия между керамическими пластинами, что позволяет осуществить равномерное распределение усилия крепления по всей площади контакта и использовать торсион для подачи питания на обмотку датчика момента. На макетных образцах, корпусные детали которых выполнены из алюминиевых сплавов, растяжение корпуса, вызванное ростом температуры, увеличивает жесткость торсиона, так как температурный коэффициент линейного расширения корпуса (далее – ТКР) отличен от ТКР торсиона. Как итог, при испытаниях выявлена существенная зависимость параметров приборов от температуры окружающей среды.

Кроме того, по результатам термоциклирования было рассчитано, что при температурных изменениях прижимное усилие непостоянно: при понижении температуры оно вызывает смятие и деформацию растяжки, а при повышении температуры прижимное усилие уменьшается, что приводит к выскальзыванию торсиона, уменьшению его жесткости и, соответственно, к нестабильности параметров прибора. Подтверждение выше представленных зависимостей было получено при моделировании с использованием конечных элементов, что также позволило оценить величину растяжения торсиона при разных ТКР ЧЭ, выявить и оценить изменения усилия крепления и предложить следующие решения:

1. Использовать для корпусных деталей акселерометра материалы с близкими значениями ТКР к ТКР торсиона, например, для материала корпуса ЧЭ использовать сплав 3БНХТЮ (ТКР = $15,1 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$), в то время как ТКР серебряно-платиновых торсионов равен $15,0 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$. Замена материала позволит уменьшить изменение жесткости торсиона, вызванное продольной температурной деформацией.

2. Для стабилизации прижимного усилия крепления торсиона при изменении температуры использовать пружинные шайбы, позволяющие демпфировать возникающие изменения прижимного усилия.

3. Для предотвращения смятия торсиона под действием прижимного усилия на керамические пластины, в местах крепления торсиона нанести слой металла, например, меди. Твердость меди ниже твердости материала торсиона, дополнительный слой обжимает торсион и позволяет избежать возникновения дополнительных механических напряжений. Величина слоя покрытия должна составлять не более 35 % процентов от толщины торсиона, чтобы при воздействии прижимного усилия между слоями меди оставался зазор. Если величина медного слоя превышает половину толщины торсиона, то под воздействием усилия обжатия накладки могут упереться друг в друга, не обеспечив заданного усилия крепления торсиона.

Приборы с предложенными выше улучшениями запущены в производство, результаты экспериментальных исследований будут получены после проведения конструкторских испытаний.

Заключение. Проведено исследование температурного влияния на возникающие ошибки в показаниях маятникового компенсационного акселерометра и предложено конструкционное решение, позволяющее уменьшить этот эффект. В частности, использование материалов с близким значением ТКР позволяет уменьшить возникновение дополнительных перенапряже-

ния или ослаблений, а использование пружинной шайбы даст возможность стабилизировать прижимное усилие.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Асс Б.А.** Детали и узлы авиационных приборов и их расчет. Москва: ОБОРОНГИЗ, 1960. с. 285-288 с.
2. **Варганова Л. Г.** Компенсационный маятниковый акселерометр, 2 559 641 С2, март 27, 2015.
3. **Евстифеев М. И.** Упругие подвесы инерционных тел в точном приборостроении // Гирокопия и навигация. 2007. №2, С. 63-76
4. **Коновалов С.Ф. Никитин Е А.** Гироскопические системы. Проектирование гироскопических систем. Ч. III. Акселерометры, датчики угловой скорости, интегрирующие гироскопы и гиринонтеграторы. Москва: Высшая школа, 1980. 128 с.
5. **Нахов С. Ф.** Опыт проектирования и изготовления блоков измерителей линейного ускорения на кварцевых маятниковых акселерометрах с аналоговой и цифровой системами управления. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2021. 240 с.
6. **Матвеев В.В.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Санкт-Петербург: ГНЦ РФ ОАО "Концерн" ЦНИИ "Электроприбор", 2009. 280 с.
7. **Новицкий В.Г.** Цифровые приборы с частотными датчиками. Ленинград: Энергия, 1970. 424 с.
8. **Осадчий Е. П.** Проектирование датчиков для измерения механических величин. Москва: Машиностроение, 1979. 480 с.
9. **Пономарёв С.Д.** Расчет упругих элементов машин и приборов. Москва: Машиностроение, 1980. 326 с.

E. A. Yakushina, V. V. Svyatyi (CSRI Electroprigor, Saint-Petersburg). **Temperature effect on pendulum compensating accelerometer operation**

Abstract. The study presented in this work is about temperature effect on pendulum compensating accelerometer operation and its characteristics. As a result of research to minimize the gap, caused by temperature deformation, split washer can be used in construction of string fixing.

УДК 531.768

О. Г. АНДРЕАСЯН, С. О. ВАСЕЦКИЙ

(АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения», Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРО-ОПТО-ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Исследованы прочностные характеристики чувствительного элемента микро-опто-электромеханического акселерометра. Проведено моделирование системы с помощью программного пакета «APM-FEM» ПО «КОМПАС-3D». Получены значения собственных частот чувствительного элемента (59511,6 рад/с), а также его максимальные смещения при различных значениях угловых скоростей (до 310 нм). Подготовлена конструкторская документация на детали микро-опто-электромеханического акселерометра.

Введение. Микро-опто-электромеханический (МОЭМ) акселерометр для определения параметров движения использует зависимость коэффициента отражения света структурой «среда-зазор-среда» от величины зазора [1-3].

Существует множество способов реализации чувствительного элемента (ЧЭ) МОЭМ-акселерометра [4, 5]. Настоящая работа посвящена исследованию с помощью конечно-элементного моделирования прочностных характеристик ЧЭ для безкомпенсационного МОЭМ-акселерометра, выполненного из кварцевого стекла КУ-1.

Исследование прочностных характеристик ЧЭ. Одним из основных вариантов реализации пластины является вариант с односторонним закреплением инерционной массы [2].

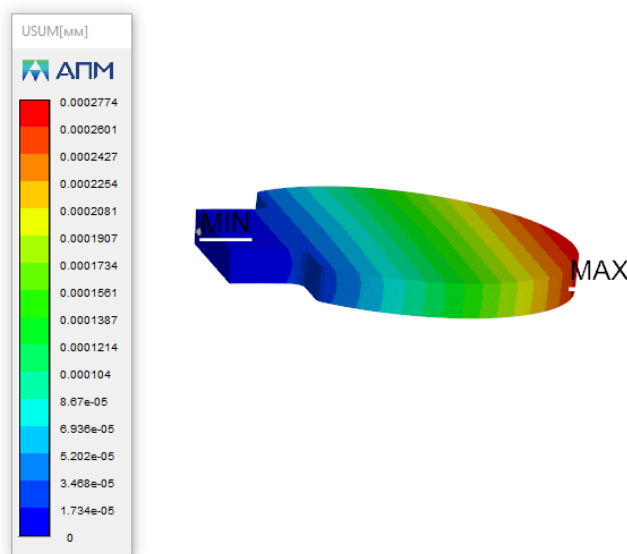


Рис. 1. Деформация ЧЭ типа «консольная балка» при перегрузке 100 g

Для определения возможности использования такой конфигурации ЧЭ было решено исследовать пластину на прогиб при перегрузке 100 g. Исследование проводилось с помощью программного пакета «APM-FEM», встроенного в программное обеспечение «КОМПАС-3D». Результаты исследования показали наличие деформаций около 300 нм, что соответствует поставленным требованиям – до 500 нм (Рис. 1).

Для выбора геометрических параметров пластины, необходимо провести прочностной и деформационный анализ конструкции при наличии внешних сил, а также исследовать влияние на надёжность и чувствительность акселерометра.

На первом этапе был проведён анализ на собственные частоты конструкции. Первая мода реализуется на частоте

59511,6 рад/с. Полученные значения будут использованы для более точного определения смещения чувствительного элемента.

На втором этапе, проведен анализ максимальных отклонений ЧЭ в зависимости от величины угловой скорости (0-1200 град/с).

Сила Кориолиса, возникающая в инерциальной системе при наличии линейного ускорения и угловой скорости, определяется по следующей формуле:

$$F_k = -2m\Omega\omega_m \cos(\omega t), \quad (1)$$

Научный руководитель: к.т.н., заместитель начальника отдела Кузнецов П.С.

где: $m = 17$ мг – масса системы, Ω – угловая скорость, вектор которой перпендикулярен вектору линейного ускорения, $\omega = 59511,6$ рад/с – частота первичных колебаний, $y_m = 370$ мкм – амплитуда первичных колебаний, t – время.

Полученная расчетная зависимость силы Кориолиса от времени для угловой скорости $\Omega = 20,94$ рад/с приведена на рис. 2.

Поскольку нам необходимо будет далее анализировать именно максимальные отклонения системы, то расчётах будем использовать только максимальное по модулю значение – 15,7 мН.

Полученная по результатам моделирования зависимость смещения ЧЭ от величины угловой скорости (0–1200 град/с) приведена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, при заданных размерах ЧЭ, полученные смещения для максимальной угловой скорости 1200 град/с составляют примерно 310 нм, что входит в необходимый диапазон, обусловленный требованиями к устройству акселерометра (± 500 нм).

Заключение. Таким образом, в ходе выполнения работы исследованы прочностные характеристики чувствительного элемента МОЭМ-акселерометра.

На основе результатов моделирования были получены значения собственных частот чувствительного элемента, а также его максимальные смещения при различных значениях угловых скоростей.

Составлен комплект конструкторской документации на элементы акселерометра. Чертежи отправлены на изготовление.

В дальнейшем планируется получить детали датчика, произвести его сборку, а также исследовать его характеристики.

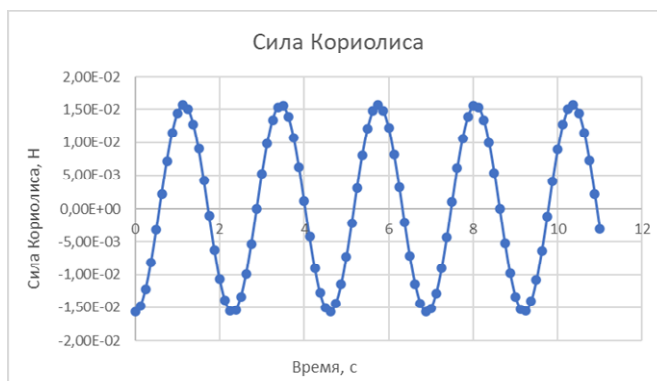


Рис. 2. Зависимость силы Кориолиса от времени

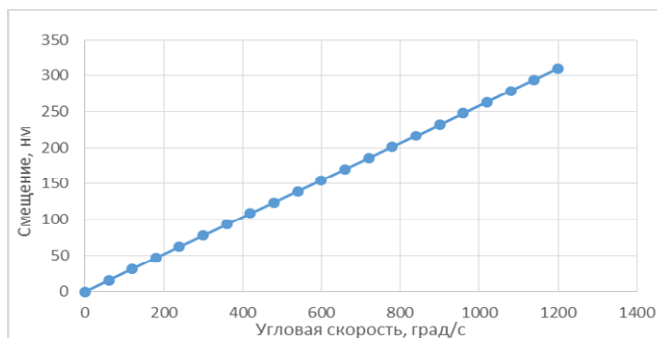


Рис. 3. Зависимость смещения балки от угловой скорости

ЛИТЕРАТУРА

1. **Крекотень Ф.В.** Современные МЭМС гироскопы и акселерометры //Петербургский журнал электроники. – 2011. – №. 1. – С. 81-96.
2. **Бакмачев А.** Инерциальные МЭМС-датчики и модули европейских производителей. Обзор новинок // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2014. – №. 2. – С. 38-49.
3. **Сысоева С.** Введение в High-End сегменты применений МЭМС-технологии. «Компоненты и технологии», №10/2012, с. 15-22.
4. **Бусурин В.И., Шток К.В., Звей Нэй Зо.** Преобразователи давления и силы на основе оптического туннельного эффекта // Приборы. 2010. №2. с1-5.
5. **Борн М., Вольф Э.** Основы оптики. М.: Наука, 1983. 721 с.

O. G. Andreyan, S. O. Vasetsky (JSC State Research Institute of Instrument Engineering, Moscow). **Strength characteristics of the sensing element of a micro-opto-electromechanical accelerometer research**

Abstract. The strength characteristics of the sensitive element of a micro-opto-electromechanical accelerometer have been studied. The system was modeled using the APM-FEM software package and KOMPAS-3D software. The values of the natural frequencies of the sensitive element (59511.6 rad/s), as well as its maximum displacements at various values of angular velocities (up to 310 nm), were obtained. Design documentation has been prepared for the parts of the micro-opto-electromechanical accelerometer.

УДК 537.853

В. С. ИГУМНОВА, А. В. ЛУКИН

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург)

НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА КОНТУРА ПЕРВИЧНЫХ КОЛЕБАНИЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ПРИ ДЕЙСТВИИ СИСТЕМ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ И АВТОМАТИЧЕСКОЙ РЕГУЛИРОВКИ УСИЛЕНИЯ

Проводится исследование двух реализаций систем фазовой автоподстройки частоты, работающих совместно с системой автоматической регулировки усиления для управления первичными колебаниями высокочастотных микромеханических резонаторов на примере гироскопа RR-типа. Рассмотрен контур первичных колебаний с элементами управления, к математической модели которой применён метод осреднения для получения эволюции движения в медленных переменных. Представлены выходные характеристики систем управления, а также динамика чувствительного элемента по первичной оси. Проведено сравнение двух систем фазовой автоподстройки частоты по таким характеристикам, как быстродействие и полоса захвата в рабочем режиме.

Введение. Принцип работы микромеханического вибрационного гироскопа состоит в передаче механической энергии между двумя формами колебаний чувствительного элемента, вызванной действием сил инерции Кориолиса [1, 2]. В простейшем случае чувствительный элемент состоит из одной подвижной массы - твердого тела, подвешенного на упругих подвесах - с двумя ортогональными рабочими формами колебаний (рисунок 1). В режиме измерения угловой скорости электростатическим двигателем возбуждаются гармонические колебания по первичной оси. В линейном приближении амплитуда вызванных силой Кориолиса вторичных колебаний пропорциональна величине компоненты угловой скорости подвижного объекта вдоль оси чувствительности датчика. Высокие требования к стабильности работы резонансных датчиков, в частности чувствительных элементов микромеханических вибрационных гироскопов, приводят к необходимости применения систем управления с обратной связью, обеспечивающих постоянство амплитуды колебаний резонатора и его частотную настройку на резонанс. Первая из названных задач, как правило, решается с помощью системы автоматической регу-

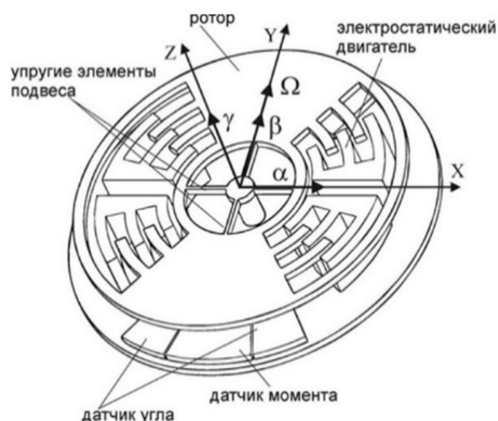


Рис. 1. Схема чувствительного элемента микромеханического вибрационного гироскопа RR-типа [2]

лирования усиления [2, 4]. Для решения второй задачи широкое распространение получили системы фазовой автоподстройки частоты [5, 6]. Качественное исследование динамики механически линейного резонатора при совместном действии систем автоматической регулировки усиления (АРУ) и фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) выполнено в [7–9].

Предлагаемый доклад посвящен исследованию нелинейной динамики первичных колебаний высокочастотного микромеханического вибрационного гироскопа при действии различных реализаций системы ФАПЧ, работающей совместно с системой АРУ.

Постановка задачи и результаты. В качестве примера конкретной конструкции приведем чувствительный элемент микромеханического

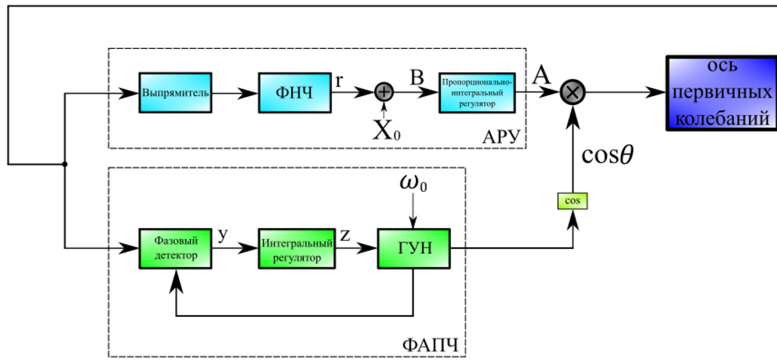


Рис. 2. Схема систем ФАПЧ и АРУ

Схема ФАПЧ содержит фазовый детектор, который внутри себя имеет фильтр нижних частот (ФНЧ), регулятор и опорный генератор, управляемый напряжением (ГУН). Схема представляет собой замкнутую систему управления, задача которой состоит в обеспечении требуемой разности фаз между выходным сигналом преобразователя емкость-напряжение

датчика перемещений резонатора и опорным сигналом ГУН. Амплитудный канал, реализующий схему АРУ, состоит из амплитудного детектора и пропорционально-интегрального регулятора.

Рассмотрим контур первичных колебаний гироскопа с учётом так называемой геометрической нелинейности, вызванной конечностью поля деформаций элементов упругого подвеса при движении подвижной массы. Математическая модель контура первичных колебаний в системе ФАПЧ-АРУ для двух рассматриваемых случаев описывается следующими системами уравнений [8–10]:

$$\begin{aligned}
 \ddot{\gamma} + c_d \dot{\gamma} + \omega_\gamma^2 \gamma + \beta \gamma^3 &= A \cos \theta, \\
 \dot{\theta} &= \omega_0 + K_{VCO} z, \\
 \dot{z} &= K_I^{PLL} y, \\
 \dot{y} &= \lambda^{PLL} (K_G \gamma \cos \theta - y), \\
 A &= K_p (X_0 - r) + B, \\
 \dot{B} &= K_I^{AGC} (X_0 - r), \\
 \dot{r} &= \lambda^{AGC} \left(\frac{\pi}{2} |\gamma| - r \right);
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Математическая модель с оригинальной ФАПЧ

$$\begin{aligned}
 \ddot{\gamma} + c_d \dot{\gamma} + \omega_\gamma^2 \gamma + \beta \gamma^3 &= A \cos \theta, \\
 \dot{\theta} &= \omega_0 + K_{VCO} (z + K_p^{PLL} K_G (\gamma - r \sin \theta) \cos \theta), \\
 \dot{z} &= K_I^{PLL} K_G (\gamma - r \sin \theta) \cos \theta, \\
 A &= K_p (X_0 - r) + B, \\
 \dot{B} &= K_I^{AGC} (X_0 - r), \\
 \dot{r} &= \lambda^{AGC} \left(\frac{\pi}{2} |\gamma| - r \right);
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Математическая модель с модифицированной ФАПЧ

где: γ - амплитуда первичных колебаний, J_γ - момент инерции вокруг оси Z , b_γ - коэффициенты демпфирования системы по оси первичных колебаний, $k_{\gamma 1}, k_{\gamma 3}$ - линейные и кубические компоненты жесткости упругого подвеса, $c_d = b_\gamma / J_\gamma$, $\omega_\gamma^2 = k_{\gamma 1} / J_\gamma$, $\beta = k_{\gamma 3} / k_{\gamma 3}$. Параметры контуров ФАПЧ и АРУ: θ - фаза ГУН ($\omega = \dot{\theta}$ - мгновенная частота ГУН), z - сигнал управления ГУН, y - выходной сигнал фазового детектора, ω_0 - собственная (свободная) частота ГУН, K_{VCO} - пропорциональный коэффициент усиления ГУН, K_I^{PLL} - интегральный коэффициент усиления регулятора, K_G, λ^{PLL} - коэффициент передачи и частота полюса ФНЧ в системе ФАПЧ, A - выходной сигнал схемы АРУ, B - сигнал управления АРУ, r - оценка текущей амплитуды колебаний, K_p, K_I^{AGC} - пропорциональный и интегральный коэффициенты регулятора схемы АРУ, λ^{AGC} - частота полюса ФНЧ АРУ, X_0 - требуемая (заданная) амплитуда стационарных колебаний.

Для сравнения оригинальной и модифицированной ФАПЧ проведена серия численных экспериментов для разных значений свободной частоты ГУН.

Результаты моделирования системы для исходного случая (при частоте $f_0 = 8093$ Гц) представлены на рисунке 3. Параметры механической системы получены путем математического моделирования и натурных испытаний для гироскопа разработки АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор»: $Q = 60000$ - добротность вокруг оси Z , $f_\gamma = 8093,77$ Гц - собственная частота вращения вокруг оси Z .

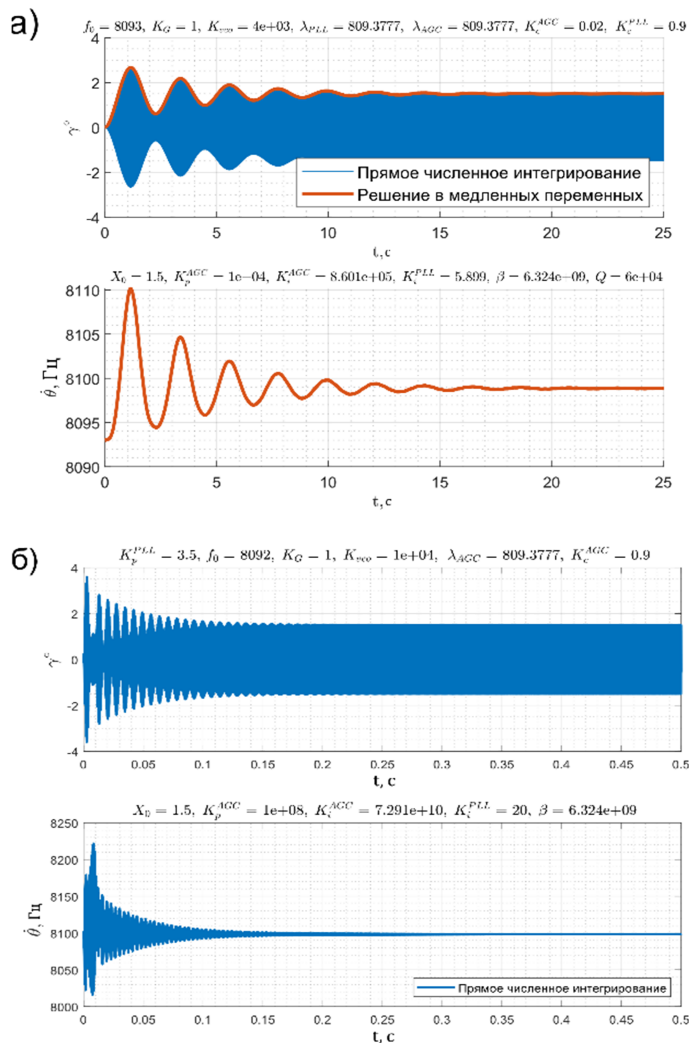


Рис. 3. Зависимость амплитуды первичных колебаний и частоты ГУН от времени для а) оригинальной и б) модифицированной ФАПЧ

Из рисунка 3 видно, что обе системы выходят на заданную частоту ГУН и амплитуду колебаний. Для оригинальной системы время выхода в рабочий режим составляет 25 с, для модифицированной – 0,5 с.

По результатам серии численных экспериментов установлено, что для оригинальной системы полоса захвата в рабочую область имеет диапазон $[-7 \text{ Гц}; +5 \text{ Гц}]$ от исходного значения свободной частоты, для модифицированной схемы ФАПЧ – в диапазоне $[-2 \text{ Гц}; +35 \text{ Гц}]$.

Заключение. В работе рассмотрены различные реализации систем фазовой автоподстройки частоты, работающих совместно с системой автоматической регулировки усиления для управления первичными колебаниями высокочастотного гироскопа RR-типа. Представлены выходные характеристики систем управления, а также динамика чувствительного элемента по первичной оси. Проведено сравнение двух систем ФАПЧ по таким характеристикам, как быстродействие и полоса захвата в рабочий режим.

Работа проводилась при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-71-10009

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Н.В. и др. Оценка влияния архитектуры ФАПЧ на характеристики микромеханических гироскопов // Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30. – №. 1. – С. 116.
2. Евстифеев М.И. и др. Результаты испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях. – 2011. – Т. 72. – №. 1. – С. 49.
3. Zhu H. et al. Drive mode control for MEMS gyroscopes with electrostatically tunable structure //2013 International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale. – IEEE, 2013. – С. 273-276.
4. Nesterenko T. G. et al. Amplitude control system of drive-mode oscillations of MEMS gyroscopes //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 516. – №. 1. – С. 012009.
5. Wu H. et al. Stability analysis of MEMS gyroscope drive loop based on CPPLL //2011 Asia Pacific Conference on Postgraduate Research in Microelectronics & Electronics. – IEEE, 2011. – С. 45-48.
6. Demir A., Hanay M. S. Phase-locked loop based resonant sensors: A rigorous theory and general analysis framework for deciphering fundamental sensitivity limitations due to noise //arXiv preprint arXiv:1903.06497. – 2019.
7. Park S. et al. Oscillation control algorithms for resonant sensors with applications to vibratory gyroscopes //Sensors. – 2009. – Т. 9. – №. 8. – С. 5952-5967.
8. Indeitsev D. A. et al. Nonlinear dynamics of MEMS resonator in PLL-AGC self-oscillation loop //Nonlinear Dynamics. – 2021. – Т. 104. – С. 3187-3204.
9. Indeitsev D. A. et al. Analysis of imperfections sensitivity and vibration immunity of MEMS vibrating wheel gyroscope //Nonlinear Dynamics. – 2021. – Т. 105. – С. 1273-1296.
10. Park S. et al. Oscillation control algorithms for resonant sensors with applications to vibratory gyroscopes //Sensors. – 2009. – Т. 9. – №. 8. – С. 5952-5967.

V.S. Igumnova, A.V. Lukin (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University). **Nonlinear dynamics of the primary oscillation circuit of the mems gyro under the action of pll and automatic gain control systems**

The paper considers two implementations of PLL systems operating together with the automatic gain control system for controlling the primary oscillations of high-Q MEMS resonators through an example of an RR-type gyro. The primary oscillation circuit with control elements is considered. An averaging method is applied to the mathematical model of this circuit in order to obtain the evolution of motion in slow variables. Output characteristics of the control systems are presented, as well as the dynamics of a sensing element for the primary axis. Two PLL systems are compared by such parameters as the response time and the lock-in range.

УДК 681.2-2

Н. В. МОЖГОВА, А. В. ЛУКИН

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург)

О МОДАЛЬНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В СИСТЕМЕ СЛАБОСВЯЗАННЫХ МИКРОБАЛОЧНЫХ РЕЗОНАТОРОВ ПРИ ЭЛЕКТРОТЕПЛОМ ВОЗБУЖДЕНИИ

Проведено исследование динамики параметрически возбуждаемых изгибных колебаний двух слабо связанных балочных микрорезонаторов при электротеплом возбуждении. Получено установившееся гармоническое распределение температуры в объеме резонаторов в частотной области. Выведена система уравнений механически связанных балочных резонаторов с учетом осаждающей частицы на один из них, а также неодинаковости массово-инерционных характеристик резонаторов. С помощью асимптотических методов нелинейной динамики получены уравнения в медленных переменных, которые были исследованы методами теории бифуркаций. Показана возможность использования рассматриваемой системы в качестве чувствительного элемента микромеханического детектора массы.

Введение. Сильная зависимость спектральных характеристик микро-/наноэлектромеханических систем (МЭМС/НЭМС) от физических и эксплуатационных параметров, а также от параметров среды широко используется в радиочастотных переключателях, фильтрах [1], резонансных акселерометрах [2] и гироскопах [3, 4], датчиках угла [5], а также в биохимических датчиках газа и массы [6, 7], для которых была продемонстрирована чувствительность порядка зептограмм (10–21 г) [8]. В то время как первые резонансные МЭМС в основном работали в линейном режиме, в последние годы нелинейные резонаторы вызвали значительный интерес из-за их потенциала для улучшения характеристик [9–11]. В частности, было показано, что устройства с параметрическим возбуждением обладают многими полезными свойствами [12]. В наиболее изученных и широко используемых устройствах с электростатическим приводом параметрическое возбуждение колебаний достигается за счет модуляции эффективной электростатической жесткости, регулируемой напряжением [11]. Недостатком таких систем является необходимость расположения электрода в непосредственной близости к чувствительному элементу, что понижает надежность и повышает риск реализации неустойчивости по механизму схлопывания. В настоящей работе параметрическое возбуждение колебаний достигается за счет пропускания переменного (гармонического) электрического тока через балку [13], что приводит к джоулевому электротермическому нагреву балки и генерации зависящей от времени осевой силы, модулирующей эффективную жесткость балки. Также всё большее распространение в современной индустрии МЭМС находит использование коллективных динамических свойств чувствительных элементов, что позволяет улучшить выходные характеристики широкого класса датчиков физических величин [14]. Слабая механическая связь между резонаторами позволяет использовать явление модальной локализации колебаний двух резонаторов [15, 16]. Целью работы является построение аналитической модели динамики связанных резонаторов с учетом электротеплового механизма возбуждения колебаний и неодинаковости массово-инерционных характеристик резонаторов и исследование параметрических колебаний системы для выявления эффекта их локализации, который может быть использован для детектирования массы частицы, осаждающей на один из резонаторов.

Модель связанных микрорезонаторов. В работе рассматривается система из двух заделанных с двух сторон микробалочных резонаторов (рис. 1), связанных механически через тонкую упругую перемычку, изгибная жёсткость которой много меньше изгибной жесткости резонаторов. Резонаторы имеют равные длины $L_1 = L_2 = L$ и ширины $b_1 = b_2 = b$, а для учета неодинаковости толщин введен параметр $n_{\%} = \frac{h_2}{h_1} - 1$. Предполагается, что $h_{12} \ll L$ и что прогибы резонаторов $w_{1,2}$ в процессе

Научный руководитель: инженер-исследователь Попов И.А.

колебаний много больше их толщин $h_{1,2}$, так что модель учитывает растяжение средней плоскости. Резонаторы изготовлены из изотропного упругого материала плотности ρ и с модулем Юнга E . Параметрические колебания возбуждаются путем неравномерного по длине и времени нагрева микробалочных элементов вследствие протекания электрического тока J гармонического вида (1):

$$J = \frac{V_{DC} + V_{AC} \cos \omega t}{\rho_e L}, \quad (1)$$

где: V_{DC} – амплитуда постоянной компоненты напряжения, V_{AC} и ω – амплитуда и частота переменной компоненты напряжения, ρ_e – удельное сопротивление материала балки, t – время.

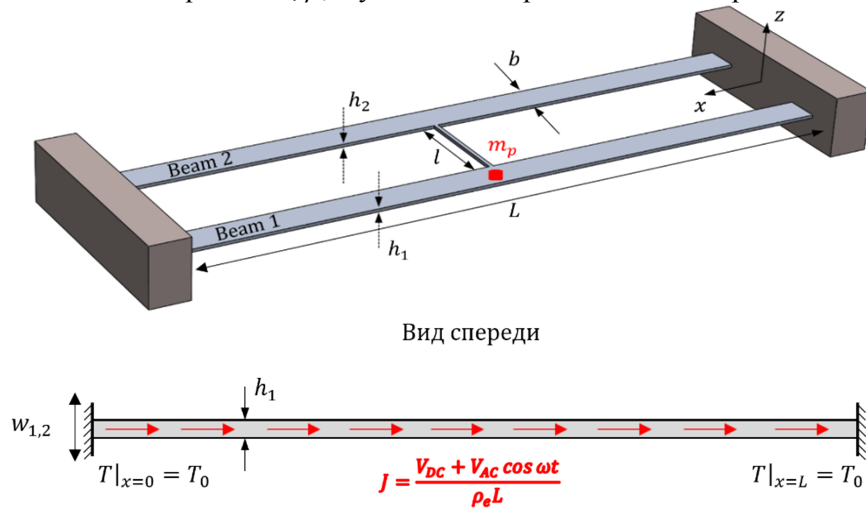


Рис. 1. Модель слабосвязанных микрорезонаторов с иллюстрацией механизма возбуждения

Тепловая задача. Важным предварительным этапом для параметрического анализа нелинейной динамики рассматриваемой системы является нахождение распределения температуры в объеме резонаторов. Нестационарное одномерное уравнение теплопроводности по оси балки $x \in [0, L]$:

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2} - \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{1}{k} Q(x, t), \quad \text{ГУ: } T|_{x=0} = T_0, \quad T|_{x=L} = T_0, \quad (2)$$

где: $\alpha = \frac{k}{\rho c}$ – температуропроводность, k – коэффициент теплопроводности, ρ – плотность, c – удельная теплоемкость материала, x – координата вдоль оси балки, $T(x)$ – температура в точке x , T_0 – отсчетная температура, t – время, $Q(x, t) = J^2 \rho_e$ – объемное тепловыделение в балке вследствие протекания тока, ГУ – граничные условия.

Статическая компонента установившегося распределения температуры T_s в балке записывается в форме:

$$T_s(x) = -\frac{V_{DC}^2 + \frac{1}{2}V_{AC}^2}{2k\rho_e L^2} (x^2 - Lx) + T_0. \quad (3)$$

Установившееся гармоническое распределение температуры \tilde{T}_d в балке может быть найдено в частотной области, для этого задача записывается в комплексной форме как сумма двух гармоник \tilde{T}_{d1} и \tilde{T}_{d2} с частотами ω и 2ω соответственно [17]:

$$\tilde{T}_d(x, \omega) = \tilde{T}_{d1}(x, \omega) + \tilde{T}_{d2}(x, 2\omega),$$

$$\frac{\partial^2 \tilde{T}_{d1}}{\partial x^2} - \sigma_1^2 \tilde{T}_{d1} = -\frac{1}{k} \tilde{Q}_{d1}, \quad \frac{\partial^2 \tilde{T}_{d2}}{\partial x^2} - \sigma_2^2 \tilde{T}_{d2} = -\frac{1}{k} \tilde{Q}_{d2}, \quad (4)$$

где: $\sigma_1^2 = \frac{i\omega}{\alpha}$, $\sigma_2^2 = \frac{2i\omega}{\alpha}$ и $\tilde{Q}_{d1} = 2 \frac{2V_{DC}V_{AC}}{\rho_e L^2}$, $\tilde{Q}_{d2} = 2 \frac{\frac{1}{2}V_{AC}^2}{\rho_e L^2}$.

Физическое распределение температуры при этом определяется как

$$T_d(x, t) = \text{Re}\{\tilde{T}_{d1}(x, \omega) \exp i\omega t\} + \text{Re}\{\tilde{T}_{d2}(x, 2\omega) \exp 2i\omega t\}. \quad (5)$$

Решение гармонической задачи может быть записано с помощью функции Грина:

$$\tilde{T}_{d12}(x\omega) = \frac{\alpha}{k} \int_0^L G_{x11}(x\kappa' \omega) \tilde{Q}_{d12}(x' \omega) dx', \quad (6)$$

где функция Грина $G_{x11}(x\kappa' \omega)$ при данных граничных условиях [15]:

$$G_{x11}(x\kappa' \omega) = \frac{e^{-\sigma(2L-|x-x'})} - e^{-\sigma(2L-x-x')}}{2\alpha\sigma(1 - e^{-2\sigma L})} + \frac{e^{-\sigma|x-x'|} - e^{-\sigma(x+x')}}{2\alpha\sigma(1 - e^{-2\sigma L})}.$$

Полученное решение для распределения температуры в объёме резонаторов было верифицировано путем сравнения с численным решением задачи нестационарной теплопроводности в программном комплексе COMSOL Multiphysics. На рис. 2 представлены распределения температуры вдоль балки для различных значений частоты переменной компоненты напряжения, нормированные на среднюю температуру в балке $T_{avg} = \int_0^L T_d dx$.

Уравнения механических колебаний. Для вывода уравнений колебаний используется принцип Гамильтона. После ввода безразмерных параметров $\hat{w}_{12} = w_{12}/h_1$ и $\hat{x} = x/L$ была получена система уравнений (7).

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial^4 \hat{w}_1}{\partial \hat{x}^4} + \frac{\partial^2 \hat{w}_1}{\partial \hat{t}^2} + m_{non} \delta\left(\hat{x} - \frac{1}{2}\right) \frac{\partial^2 \hat{w}_1}{\partial \hat{t}^2} + \mu_{non} \frac{\partial \hat{w}_1}{\partial \hat{t}} - \left(N_{nonth} + 6 \int_0^1 \left(\frac{\partial \hat{w}_1}{\partial \hat{x}}\right)^2 d\hat{x}\right) \frac{\partial^2 \hat{w}_1}{\partial \hat{x}^2} + \\ \kappa_{non} (\hat{w}_1 - \hat{w}_2) \delta\left(\hat{x} - \frac{1}{2}\right) = 0, \\ (1 + n_{\%})^3 \frac{\partial^4 \hat{w}_2}{\partial \hat{x}^4} + (1 + n_{\%}) \frac{\partial^2 \hat{w}_2}{\partial \hat{t}^2} + \mu_{non} \frac{\partial \hat{w}_2}{\partial \hat{t}} - \left(N_{nonth} + 6(1 + n_{\%}) \int_0^1 \left(\frac{\partial \hat{w}_2}{\partial \hat{x}}\right)^2 d\hat{x}\right) \frac{\partial^2 \hat{w}_2}{\partial \hat{x}^2} + \\ - \kappa_{non} (\hat{w}_1 - \hat{w}_2) \delta\left(\hat{x} - \frac{1}{2}\right) = 0, \end{array} \right. \quad (7)$$

где параметры введены следующим образом:

$$\hat{t} = \frac{t}{t_{sc}}, \quad t_{sc} = \sqrt{\frac{\rho S_1 L^4}{EI_1}}, \quad N_{nonth} = \frac{N_{th}}{N_{sc}}, \quad N_{th} = -ES\alpha(T(x) - T_0), \quad N_{sc} = \frac{EI_1}{L^2}, \quad \kappa_{non} = \frac{\kappa}{\kappa_{sc}}, \\ \kappa_{sc} = \frac{EI_1}{L^3}, \quad \mu_{non} = \frac{\mu}{\mu_{sc}}, \quad \mu_{sc} = t_{sc} \cdot \frac{EI_1}{L^4}, \quad m_{non} = \frac{m_p}{m_{sc}}, \quad m_{sc} = \rho S_1 L,$$

где: $S_1 = bh_1$ – площадь поперечного сечения резонатора, $I_1 = \frac{bh_1^3}{12}$ – момент инерции сечения резонатора, κ – статическая жесткость тонкой упругой переемычки, μ – коэффициент трения в среде вокруг резонатора, m_p – масса осажденной частицы.

Система (7) при помощи стандартной процедуры метода Галёркина [18] приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, к которой применяется метод многих масштабов для получения систем уравнений в медленных переменных [19]. Далее к полученным системам уравнений применяются методы теории бифуркаций [20] для продолжения установившихся режимов по параметрам амплитуд постоянной и переменной компонент напряжения, частоты возбуждения колебаний, параметра неодинаковости резонаторов, а также массе частицы m_p , осажденной на один из резонаторов.

Заключение. В работе предложена аналитическая модель связанных микрорезонаторов с электротепловым механизмом возбуждения колебаний. В результате изучения динамики параметрических изгибных колебаний рассматриваемой системы показано, что в ней возможно наблюдать зоны незатухающих колебаний в пространстве физических параметров системы, т. е. аналитически получены оценки для переходных ветвей диаграммы устойчивости Айнса-Стретта. При исследовании квазистационарного режима (частное решение уравнений (7) тривиально), получены амплитуды

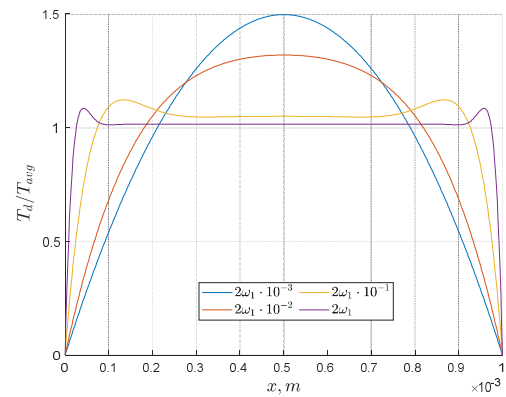


Рис. 2. Распределения температуры вдоль балки для различных значений частоты переменной компоненты напряжения

колебаний балок, которые не зависят от времени. Показано, что при малом отличии в массово-инерционных характеристиках двух резонаторов наблюдается значительное отличие амплитуд их колебаний. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что рассматриваемая система может быть использована в качестве чувствительного элемента микромеханического детектора массы. Измерение массы частицы предлагается производить на основе изменения амплитудных соотношений колебаний двух резонаторов при наличии массово-инерционных различий, возникающих в результате осаждения частицы на один из элементов системы.

Работа выполнена при поддержке гранта Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых МК-4577.2022.1.1.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rebeiz G.M.** RF MEMS: theory, design, and technology. – John Wiley & Sons, 2004.
2. **Liu H., Zhang Y., Wu J.** Structural Design and Testing of a Micromechanical Resonant Accelerometer //Micromachines. – 2022. – Т. 13. – №. 8. – С. 1271.
3. **Acar C., Shkel A.** MEMS vibratory gyroscopes: structural approaches to improve robustness. – Springer Science & Business Media, 2008.
4. **Indeitsev D. A. et al.** Analysis of imperfections sensitivity and vibration immunity of MEMS vibrating wheel gyroscope //Nonlinear Dynamics. – 2021. – Т. 105. – С. 1273-1296.
5. **Ци У. и др.** Интегрированная с магнитным компасом БИНС с вращающимся измерительным модулем на МЭМС //Гироскопия и навигация. – 2016. – Т. 24. – №. 3. – С. 3-13.
6. **Song J. et al.** A Novel Mass Sensor Based on Parametrically Excited Mode-Localized Resonators //International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. – American Society of Mechanical Engineers, 2022. – Т. 86298. – С. V008T08A008.
7. **Yaqoob U. et al.** Highly selective multiple gases detection using a thermal-conductivity-based MEMS resonator and machine learning //IEEE Sensors Journal. – 2022. – Т. 22. – №. 20. – С. 19858-19866.
8. **Yang Y. T. et al.** Zeptogram-scale nanomechanical mass sensing //Nano letters. – 2006. – Т. 6. – №. 4. – С. 583-586.
9. **Lifshitz R., Cross M. C.** Nonlinear dynamics of nanomechanical and micromechanical resonators //Reviews of nonlinear dynamics and complexity. – 2008. – Т. 1. – №. 1.
10. **Kacem N. et al.** Nonlinear dynamics of nanomechanical beam resonators: improving the performance of NEMS-based sensors //Nanotechnology. – 2009. – Т. 20. – №. 27. – С. 275501.
11. **Rhoads J. F., Shaw S. W., Turner K. L.** Nonlinear dynamics and its applications in micro-and nanoresonators //Journal of dynamic systems, measurement, and control. – 2010. – Т. 132. – №. 3.
12. **Rhoads J. F., Guo C., Fedder G. K.** Parametrically Excited Micro-and Nanosystems //Resonant MEMS: fundamentals, implementation and application. – 2015. – С. 73-95.
13. **Torteman B. et al.** Micro-beam resonator parametrically excited by electro-thermal Joule's heating and its use as a flow sensor //Nonlinear Dynamics. – 2019. – Т. 98. – С. 3051-3065.
14. **Hajjaj A. Z. et al.** Linear and nonlinear dynamics of micro and nano-resonators: Review of recent advances //International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2020. – Т. 119. – С. 103328.
15. **Dick N., Krylov S.** Parametric resonance and pattern selection in an array of microcantilevers interacting through fringing electrostatic fields //Nonlinear Dynamics. – 2021. – С. 1-21.
16. **Wallin C. B. et al.** Nondegenerate parametric resonance in large ensembles of coupled micromechanical cantilevers with varying natural frequencies //Physical review letters. – 2018. – Т. 121. – №. 26. – С. 264301.
17. **Beck J. V. et al.** Heat conduction using Green's function. – Taylor & Francis, 1992.
18. **Younis M. I.** MEMS linear and nonlinear statics and dynamics. – Springer Science & Business Media, 2011. – Т. 20.
19. **Nayfeh A. H., Mook D. T.** Nonlinear oscillations. – John Wiley & Sons, 2008.
20. **Dhooge A., Govaerts W., Kuznetsov Y. A.** MATCONT: a MATLAB package for numerical bifurcation analysis of ODEs //ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS). – 2003. – Т. 29. – №. 2. – С. 141-164.

N. V. Mozhgova, A.V. Lukin (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Applied Mathematics and Mechanics). **On modal localization of parametric oscillations in a system of weakly coupled microbeam resonators under electro-thermal excitation**

Abstract. In this work, we study the dynamics of parametrically excited bending vibrations of two weakly coupled beam microresonators under electrothermal excitation. A steady harmonic temperature distribution in the volume of the resonators in the frequency domain has been preliminarily obtained. A system of equations for mechanically coupled beam resonators is derived, taking into account the deposited particle on one of them, as well as the unequal mass-inertia characteristics of the resonators. With the help of asymptotic methods of nonlinear dynamics, equations in slow variables were obtained, which were subsequently investigated by methods of the theory of bifurcations. In the work, the zones of possible buildup of parametric oscillations, as well as the amplitudes of steady-state modes for both resonators, are obtained. It is shown that a small difference in the mass-inertia characteristics of the resonators leads to a significant change in the amplitudes of the steady-state modes for each resonator, which can be used to detect the mass of a particle deposited on one of the sensitive elements.

УДК 537.853

П. П. УДАЛОВ, И. А. ПОПОВ
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург)

МОДЕЛЬ МИКРОМАСШТАБНОГО ИНДУКЦИОННОГО ЛЕВИТИРУЮЩЕГО ПОДВЕСА

Рассмотрена модель одномерных колебаний проводящего недеформируемого диска, являющегося чувствительным элементом индукционного электромагнитного подвеса. Аналитически найдены выражения для нетривиальных положений равновесия системы. С использованием бифуркационного анализа исследовано изменение устойчивости положения равновесия инерционной массы в зависимости от изменения параметров возбуждения системы.

Введение. Электромагнитный подвес – устройство, работающее на принципе электромагнитной индукции [1]. При этом чувствительный элемент устройства не контактирует механически с остальной частью конструкции, что позволяет минимизировать влияние конструкции на статические и динамические характеристики и режимы чувствительного элемента. В режиме акселерометра при правильном подборе электрических и электромагнитных параметров возможно получить квазиулеву жесткость системы, что приводит к теоретически бесконечной чувствительности [2, 3]. Применяя этот подход к задачам гравиметрии [4–6], возможно конструировать высокоточные электромагнитные гравиметры.

В настоящей работе предлагается рассмотреть одномерную задачу о колебаниях чувствительного элемента, выполненного в форме проводящего диска, в индукционном подвесе [2, 7, 8] вблизи его положения равновесия и получить аналитические оценки для зон затягивания колебаний, что может быть полезным для определения рабочих значений параметров системы.

Одномерная модель колебаний чувствительного элемента электромагнитного гравиметра. Схематическое изображение электромагнитного подвеса с электродами $E_1 - E_4$ изображено на рис. 1.

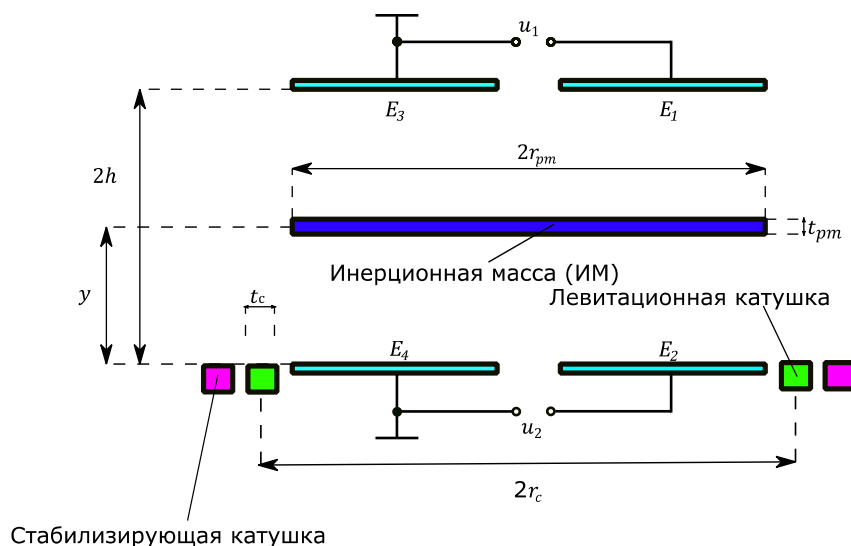


Рис. 1. Схематическое изображение электромагнитного подвеса

Согласно формализму Лагранжа-Максвелла динамическая система в безразмерном виде, записанная относительно следующих переменных: ξ – безразмерное вертикальное перемещение инерционной массы (ИМ), j_2 – безразмерная величина наведенного тока в ИМ, \hat{e}_1, \hat{e}_2 – безразмерные заряды на конденсаторах, примет вид [7, 8]:

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент Лукин А.В.

$$lj_2' + rj_2 = -\frac{dm_{12}}{d\xi}\xi' \sin \tau - m_{12} \cos \tau, \quad (1)$$

$$\xi'' + \lambda\xi' = \varepsilon \left(\alpha \frac{dm_{12}}{d\xi} j_2 \sin \tau - 1 + \zeta \hat{e}_1^2 - \zeta \hat{e}_2^2 + 2\zeta(2\xi - 1)(\hat{e}_1 + \hat{e}_2)^2 \right),$$

$$(1 - \xi)\hat{e}_1 + \xi(1 - \xi)(\hat{e}_1 + \hat{e}_2) = u_{01}, \quad \xi \hat{e}_2 + \xi(1 - \xi)(\hat{e}_1 + \hat{e}_2) = u_{02},$$

где:

$$\alpha = \frac{L_1 i_a^2}{2\tilde{m}gh}, \beta = \frac{\mu_0 r_c}{L_1}, \tau = \omega t, \varepsilon = \frac{g}{2\omega^2 h}, \lambda = \frac{\mu}{\tilde{m}\omega}, \xi = \frac{y}{2h}, a = \frac{r_{pm}}{r_c}, j_2 = \frac{i_2}{i_a}, \hat{e}_1 = \frac{e_1}{e_0},$$

$$\hat{e}_2 = \frac{e_2}{e_0}, W_0 = \frac{e_0^2}{2A}, l = \frac{L_2}{L_1}, r = \frac{R_2}{L_1\omega}, u_c = \frac{2he_0}{A}, u_{01} = \frac{u_1}{u_c}, u_{02} = \frac{u_2}{u_c}, \zeta = \frac{W_0}{\tilde{m}g},$$

$$m_{12} = \frac{M_{12}}{L_1} = \beta\sqrt{a} \left[\left(\frac{2}{\kappa} - \kappa \right) K(\kappa) - \frac{2}{\kappa} E(\kappa) \right], \quad \kappa^2(y) = \frac{\xi}{(1+a)^2 + 4\xi^2}, \quad (2)$$

$$\frac{dm_{12}}{d\xi} = \frac{\partial m_{12}}{\partial \kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial \xi} = -\frac{8\beta a}{\kappa^2} \left[\frac{(2 - \kappa^2)E(\kappa)}{1 - \kappa^2} - 2K(\kappa) \right] \frac{\xi}{((1+a)^2 + 4\xi^2)^{\frac{3}{2}}}.$$

В этих соотношениях L_1, L_2 – собственные индуктивности катушки и дископодобной инерционной массы (ИМ) соответственно, i_a, ω – амплитуда и частота тока катушки соответственно, \tilde{m} – масса диска, g – ускорение свободного падения, $2h$ – расстояние между катушкой и верхними электродами, μ_0 – магнитная постоянная, r_c, r_{pm} – срединный радиус катушки и ИМ соответственно, t_c, t_{pm} – толщины катушки и ИМ соответственно, t – время, μ – коэффициент трения, y – расстояние между катушкой и центром тяжести ИМ, i_2 – наведенный ток в ИМ, e_1 – электрический заряд на верхней паре электродов, e_2 – электрический заряд на нижней паре электродов, e_0 – номинальное значение заряда, $A = \varepsilon_e \varepsilon_0 A_e$, ε_0 – относительная диэлектрическая проницаемость, ε_e – диэлектрическая постоянная, A_e – площадь электродов, R_2 – электрическое сопротивление ИМ, u_1, u_2 – напряжения на верхней и нижней парах электродов соответственно, M_{12} – взаимная индуктивность между катушкой и ИМ.

Исследование положения равновесия ИМ. Далее решается задача о нахождении положения равновесия ИМ по системе уравнений (1) для набора параметров $(j_2, \xi, \hat{e}_1, \hat{e}_2) = (j_{20}, \xi_0, \hat{e}_{10}, \hat{e}_{20})$, где $j_2 = j_{20}(\tau)$ – гармоническая функция наведенного тока, которая соответствует постоянным значениям $\xi_0, \hat{e}_{10}, \hat{e}_{20}, u_{01}, u_{02}$. Выражение для определения постоянного положения равновесия ξ_0 имеет следующий вид [7,8]:

$$f(\xi_0, u_1, u_2) = \frac{u_1^2}{(1 - \xi_0)^2} - \frac{u_2^2}{\xi_0^2} - \frac{\alpha \cos^2 \gamma}{l} m_{12}(\xi_0) m'_{12}(\xi_0) - 2 = 0. \quad (3)$$

На рис. 2–4 приведены графики зависимости среднего положения равновесия от параметров возбуждающих сил. На рис. 5–7 приведены области устойчивых и неустойчивых положений равновесий ИМ.

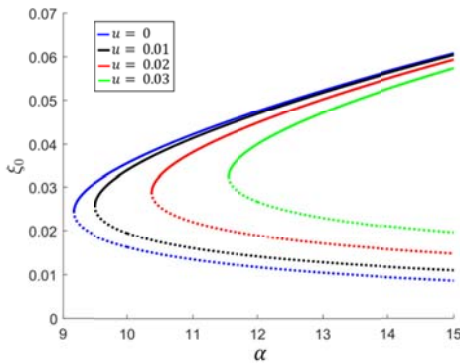


Рис.2. Эволюция положения равновесия ξ_0 от параметра α при $l = 0.022, r = \frac{l}{50}; \zeta = 1; u = 0,0.01,0.02,0.03$

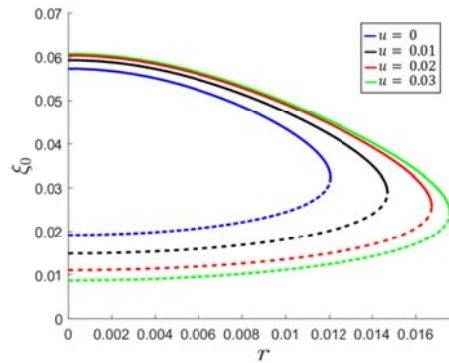


Рис.3. Эволюция положения равновесия ξ_0 от параметра r при $l = 0.022, \alpha = 15; \zeta = 1; u = 0,0.01,0.02,0.03$

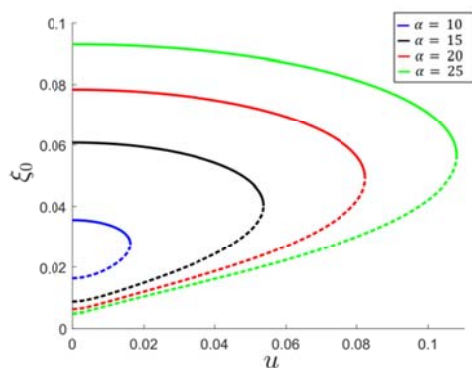


Рис.4. Эволюция положения равновесия ξ_0 от параметра u при $l = 0.022, r = \frac{l}{50}, \zeta = 1; \alpha = 10, 15, 20, 25$

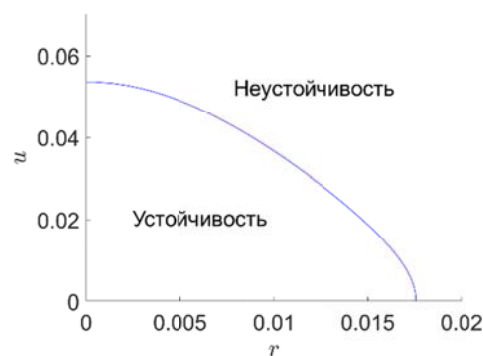


Рис.5. Область устойчивости движений ИМ в координатах $u - r$

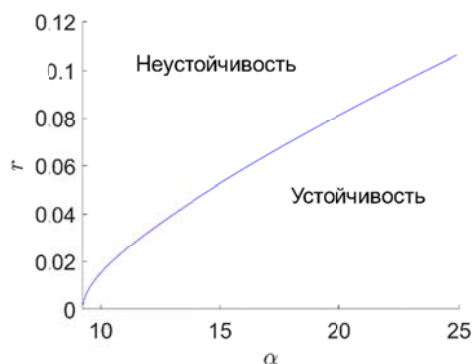


Рис.6. Область устойчивости движений ИМ в координатах $r - \alpha$

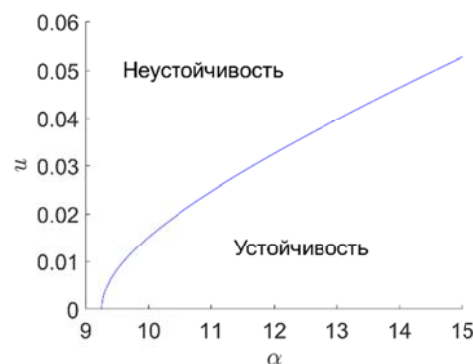


Рис.7. Область устойчивости движений ИМ в координатах $u - \alpha$

Из рис. 2-4 видно, что в системе электромагнитного подвеса наблюдается как устойчивые положения равновесия (сплошные линии), так и неустойчивые (пунктирные линии). Из рис. 5-7 видно, что в системе электромагнитного подвеса существует набор параметров, отвечающий случаю полуустойчивого положения равновесия ИМ. Области параметров в координатах $u - \alpha, r - \alpha, u - r$ разделяются на устойчивые и неустойчивые положения равновесия ИМ. Иными словами, в рассматриваемой системе существуют области параметров, при которых положения равновесия отсутствуют, что физически связано с недостаточными электромагнитными или электрическими силами. Также существуют области как устойчивых, так и неустойчивых колебаний ИМ, что необходимо учитывать при настройке параметров системы.

Заключение. Рассмотрена модель электромагнитного бесконтактного подвеса. Получены выражения для нахождения положения равновесия дископодобной ИМ. С использованием бифуркационного анализа получены области параметров системы, соответствующие устойчивым и неустойчивым положениям равновесия.

Работа проводилась при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-71-10009

ЛИТЕРАТУРА

1. **Han H.S, Kim D.S.** Magnetic Levitation. – Heidelberg: Springer Netherlands. – 247 p.
2. **Poletkin K., Chernomorsky A., Shearwood C.** Proposal for micromachined accelerometer, based on contactless suspension with zero spring constant// IEEE Sensors Journal. – 2012. – V. 12, No. 7. – pp. 2407-2413. doi: 10.1109/JSEN.2012.2188831
3. **Руднев И. А., Анищенко И. В.** Физические принципы создания магнитолевитационных систем на основе высокотемпературных сверхпроводящих композитов второго поколения (Обзор) //Журнал технической физики. – 2021. – Т. 91. – №. 12. – С. 1813-1847.

4. **Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С.** Результаты эксплуатации гравиметров «Чекан-АМ» // Гироскопия и навигация. 2014. №1. С. 98-104.
5. **Соколов А.В., Усов С.В., Элинсон Л.С.** Опыт проведения гравиметрической съемки в условиях выполнения морских сейсмических работ // Гироскопия и навигация. 2000. № 1. С. 39-50.
6. **Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Железняк Л.К., Береза А.Д., Краснов А.А.** Вклад навигационных технологий в создание мобильных гравиметров //Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. №. 4. С. 162.
7. **Скубов Д.Ю., Индейцев Д.А., Удалов П.П., Попов И.А., Лукин А.В., Полеткин К.В.** Нелинейная динамика микромеханического твердотельного неконтактного электромагнитного индукционного подвеса// Механика деформируемого твердого тела в проектировании конструкций: программа и тезисы докладов. – Пермь, 2022. – С. 72.
8. **Скубов Д.Ю., Индейцев Д.А., Удалов П.П., Попов И.А., Лукин А.В., Полеткин К.В.** Исследование положения равновесия неконтактного электромагнитного подвеса //XXXIV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по проблемам машиноведения (МИКМУС-2022). – 2022. – С. 338-343.

P.P. Udalov, I.A. Popov (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, High School of Mechanics and Control Processes, St. Petersburg, Russia). **Model of a microscale induction levitating suspension**

Abstract. The model of one-dimensional vibrations of a conducting non-deformable disk, which is a sensitive element of an induction electromagnetic suspension, is considered. Expressions for nontrivial equilibrium positions of the system are found analytically. Using bifurcation analysis, a change in the stability of the inertial mass equilibrium position depending on changes in the excitation parameters of the system has been investigated.

УДК 520.8, 528.061

Д.А. ГОНТАРЬ, Е.В. ДРАНИЦЫНА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

МЕТОД СНИЖЕНИЯ ЭЛАСТООПТИЧЕСКОГО СМЕЩЕНИЯ НУЛЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Проанализировано влияние технологической операции температурного старения волоконного контура на вид зависимости смещения нуля выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от температуры и скорости ее изменения. Показано, что такая операция повышает эффективность алгоритмической компенсации температурной зависимости смещения нуля без усложнения модели.

Введение. Уникальная чувствительность волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), которую можно достичь за счет увеличения длины волоконного контура, открывает широкие перспективы их использования в высокоточных навигационных системах [1]. Теоретический предел точностных характеристик ВОГ оценивается значением нестабильности смещения нуля на уровне $1 \cdot 10^{-5}$ °/ч [2]. Однако при увеличении длины волоконного контура увеличивается чувствительность не только к измеряемой угловой скорости, но и к изменению температуры окружающей среды. Одной из основных задач при создании высокоточных ВОГ является компенсация чувствительности смещения нуля его выходного сигнала к изменению температуры.

Смещение нуля выходного сигнала ВОГ, вызванное изменением температуры волоконного контура, можно разделить на две составляющие: термоиндуцированную, вызванную несогласованным температурным растяжением участков волокна, равноудаленных от центра катушки, известную как эффект Шупе [3]; и эластооптическую, обусловленную несимметричным изменением упруго-деформированного состояния волоконного контура при изменении температуры [4]. При этом эластооптическая составляющая вносит наибольший вклад.

В качестве основных методов снижения чувствительности к изменению температуры можно выделить следующее:

- выбор материалов и конструкции волоконного контура на основе моделирования с использованием конечно-элементного анализа [5], обеспечивающих минимизацию или симметричность распределения деформации волоконного контура при изменении температуры;
- намотка контура, обеспечивающая расположение в максимально одинаковых условиях симметричных относительно центра катушки участков волокна [6];
- разработка моделей алгоритмической компенсации температурной чувствительности выходного сигнала.

При использовании конечно-элементного анализа массив волоконной катушки, включающий кварцевое волокно с полимерным защитным покрытием и компаундом, пропитывающим контур для придания жесткости, заменяется однородным веществом с характеристиками, рассчитанными как среднее по входящим материалам с учетом процентного соотношения [7], что не может в полной мере отразить происходящие внутри процессы. В частности, не учитываются особенности, возникающие при использовании композитного материала, такие как неравномерная адгезия композита с волокном и развитие внутренних напряжений в композите при застывании. Эти факторы приводят к увеличению вклада эластооптического смещения нуля, нелинейному характеру его зависимости от температуры и скорости ее изменения и необходимости использования сложных моделей компенсации. Существует множество методов алгоритмической компенсации остаточной зависимости смещения нуля выходного сигнала ВОГ от температуры, например: введение температурных моделей учитывающих перекрестное влияние температуры и скорости ее изменения на смещение нуля ВОГ [8]; введение отдельных температурных моделей для участков с положительной и отрицательной скоростями нагрева ВОГ [9]; компенсация с использованием искусственных нейронных сетей [10, 11]. Повысить эффективность алгоритмической компенсации можно путем введения технологической опера-

ции температурного старения, позволяющей уменьшить остаточные напряжения в композитном материале волоконно-оптической катушки и тем самым снизить вклад эластооптического смещения нуля. Целью работы является проверка влияния технологической операции температурного старения волоконного контура на вид зависимости смещения нуля ВОГ от температуры и скорости ее изменения, а также анализ эффективности алгоритмической компенсации после проведения такой операции.

Температурное старение. Температурное старение широко используемый прием, в том числе при изготовлении микромеханических гироскопов и акселерометров. Старение призвано снизить влияние напряжений, вызванных изменением температуры, на показания датчика [12]. Так же, температурное старение применяется при изготовлении изделий из композитных материалов для снятия технологических и усадочных напряжений [13]. С помощью температурного старения с волоконно-оптической катушки могут быть сняты внутренние напряжения. Операция температурного старения ВОГ в этом случае включает в себя длительную выдержку волоконного контура в температурной камере при температуре 90°C с последующим медленным естественным остыванием на воздухе.

Результаты эксперимента. Для проверки влияния технологической операции температурного старения волоконного контура на вид зависимости смещения нуля ВОГ от температуры был проведен эксперимент, включающий три этапа: испытания в диапазоне температур от 0 до 45°C и скоростей изменения температуры в диапазоне $\pm 0,01^\circ\text{C}/\text{c}$ с целью определения зависимости; операция температурного старения волоконного контура; повторные испытания в том же диапазоне температур. Полученные зависимости смещения нуля ВОГ представлены на рисунке 1. Здесь для удобства восприятия они представлены в относительных условных единицах, где единице соответствует максимум смещения нуля ВОГ до операции температурного старения. По графикам видно, что внешний вид зависимости после проведения температурного старения меняется. Для оценки влияния операции старения на повышение эффективности компенсации по полученным данным определялись коэффициенты модели зависимости смещения нуля ВОГ от температуры и скорости ее изменения. При этом использовалась полиномиальная модель третьего порядка:

$$P(T, \dot{T}) = c_0 + c_1 T + c_2 \dot{T} + c_3 T^2 + c_4 \dot{T}^2 + c_5 T^3 + c_6 \dot{T}^3, \quad (1)$$

где T, \dot{T} – температура катушки и скорость ее изменения соответственно, c_{0-6} – коэффициенты температурной модели.

На рисунках 2.а) и 2.б) представлены графики зависимости смещения нуля ВОГ от температуры с учетом температурной компенсации до и после проведения операции температурного старения. По графикам видно, что старение волоконного контура повышает эффективность компенсации температурной зависимости смещения нуля ВОГ полиномиальной моделью (1).

Заключение. Проанализировано влияние технологической операции температурного старения волоконного контура, призванной снизить вклад эластооптической составляющей, на зависимость смещения нуля ВОГ от температуры. Показано, что температурное старение позволяет снизить нелинейность зависимости смещения нуля выходного сигнала ВОГ от

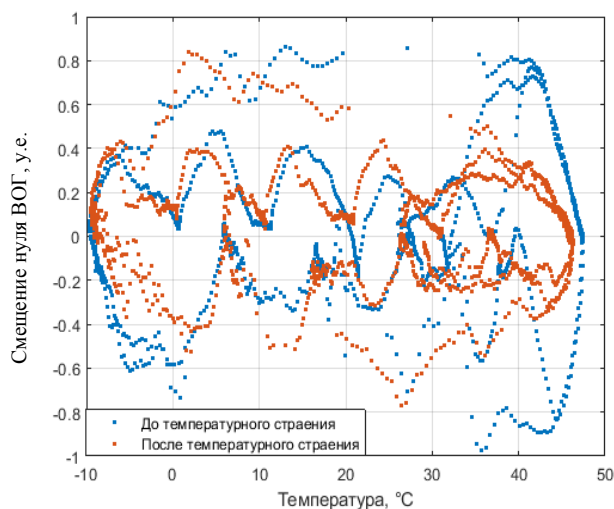


Рис. 1 Зависимость смещения нуля ВОГ от температуры до и после температурного старения.

температуры и скорости ее изменения и тем самым повысить эффективность температурной компенсации без усложнения модели.

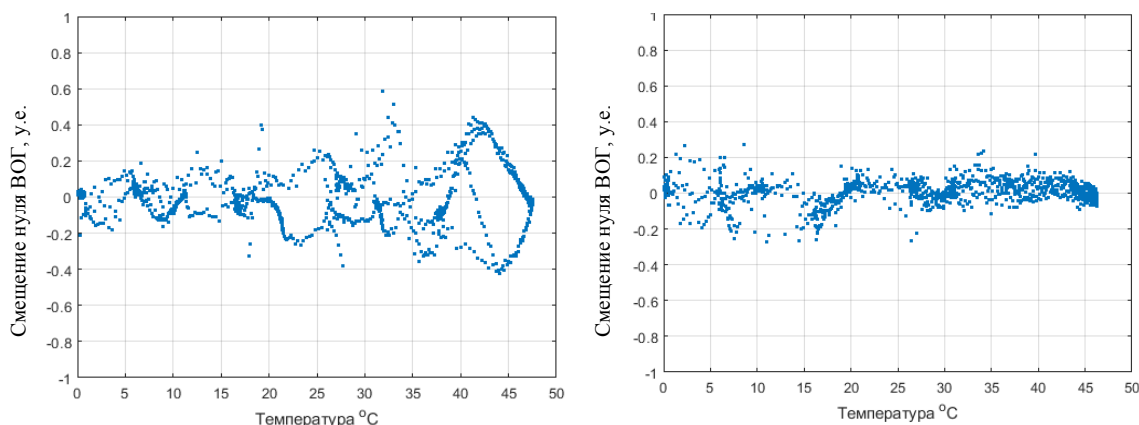


Рис. 2 Зависимость смещения нуля ВОГ от температуры с учетом температурной компенсации: а – до операции температурного старения; б – после операции температурного старения

ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 2. С. 3–10.
2. Лефевр Э.К. Волоконно-оптический гироскоп: достижения и перспективы // Гироскопия и навигация. 2012. №4 (79). С. 3–9.
3. Shupe, D.M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer / D.M. Shupe // Applied optics. – 1980. – 19. – P. 654–655.
4. Osunluk B., Ogut S., Ozbay E. // Thermally induced bias error due to strain inhomogeneity through the fiber optic gyroscope coil // Vol. 59, No. 33 / 20 November 2020 / Applied Optics
5. Mohr, F. Error signal formation in FOGs through thermal and elasto-optical environmental influences on the sensing coil / F. Mohr, F. Schadt. // Inertial Sensors and Systems, 2011. – P. 2.1–2.13.
6. Mohr F. Thermo-optically induced bias drift in fiber optical sagnac interferometers, Journal of Lightwave Technology, 2002, vol. 14, no. 1, pp. 27-41.
7. Zang P., Wang J., Li K. // Research on the Technology for Suppressing Shupe Error of Fiber Optic Gyroscope Based on Structure that Integrates Thermal Conduction and Insulation / 29th Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems.
8. Гонтарь Д.А., Драницына Е.В. Повышение эффективности компенсации температурной чувствительности волоконно-оптического гироскопа // XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, сборник материалов, 2022. P. 266-268
9. Вахрамеев Е.И., Галягин К.С., Ошивалов М.А., Савин М.А. Методика численного прогнозирования и коррекции теплового дрейфа ВОГ // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. №1. С. 32-37.
10. Климкович Б.В. Влияние случайной погрешности температурных датчиков на качество температурной компенсации смещения нуля ВОГ нейронной сетью // Гироскопия и навигация 2020. Т. 28, № 4. С. 53–70.
11. Wnag Z., Cheng X., Du J. // Thermal Modeling and Calibration Method in Complex Temperature Field for Single-Axis Rotational Inertial Navigation System. // MDPI. Sensors. 2020
12. Куликова О.Н., Ковалев А.С. // Разработка методики термотренировки ММГ при их изготовлении // Навигация и управление движением: материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием
13. Алжеганов А.С., Бегишев В.П., Горинов Д.А., Лысенко С.Н., Шардаков И.Н. // Развитие и релаксация внутренних напряжений в зернистых композитах с эпоксидной матрицей. // Прикладная механика и техническая физика, 2006, т. 47, №4.

D.A.Gontar, E.V.Dranitsyna, (Elektroprigor, Saint-Petersburg). **A method for reducing the fiber-optic gyroscope elasto-optic zero offset**

Abstract. The influence of the technological operation of the fiber circuit temperature aging on the type of the fiber-optic gyroscope zero offset dependence on temperature and its rate of change is analyzed. It is shown that such an operation increases the efficiency of the zero offset temperature dependence algorithmic compensation without complicating the model.

УДК 531.383

Д. С. СТРЕЛЬЦОВ
(Тульский государственный университет, Тула)

СПОСОБ ВОЗБУЖДЕНИЯ СТОЯЧЕЙ ВОЛНЫ В ВОЛНОВОМ ТВЕРДОТЕЛЬНОМ ГИРОСКОПЕ

Предложен способ возбуждения и поддержания стоячей волны в резонаторе волнового твердотельного гироскопа. Приведена схема устройства, построенная на аналоговых компонентах, описаны происходящие в электрической цепи процессы.

Введение. Волновой твердотельный гироскоп – перспективный гироскопический датчик, который может использоваться для измерения угловой скорости подвижного объекта, на котором он установлен [1]. Носителем информации в таком гироскопе является стоячая волна, которая возбуждается внутри чувствительного элемента – резонатора [2, 3]. Резонатор представляет собой цилиндрическую оболочку, в донной части которой закреплены 4 пары пьезоэлементов для привода колебаний и съема выходного сигнала. Предлагаемый доклад посвящен описанию разработанного способа возбуждения стоячей волны.

Способ возбуждения стоячей волны. Существует способ возбуждения и поддержания стоячей волны, реализация которого построена на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) [4]. В ПЛИС записывается рабочая частота резонатора и алгоритм синтеза синусоидальных колебаний. Также присутствует температурная коррекция, т.к. рабочая частота резонатора меняется в зависимости от температуры. Реализация существующего способа требует дорогостоящих элементов и написания программного кода.

Стоит отметить, что для поддержания стоячей волны достаточно поддерживать разность фаз, равную -90° в сигналах двух пар пьезоэлементов [5]. Теоретически такое запаздывание может быть реализовано с помощью интегрирующего звена. На практике применяется полосовой фильтр на операционном усилителе, который подавляет высокочастотный шум, возможные помехи от источника питания и постоянную составляющую сигнала пары пьезоэлементов. Допустимая разность фаз сохраняется в достаточно широком диапазоне частот, что позволяет не реализовывать температурную стабилизацию. Функциональная схема устройства приведена на рисунке 1. На схеме показаны резонатор, повторитель напряжения, полосовой фильтр и компаратор.

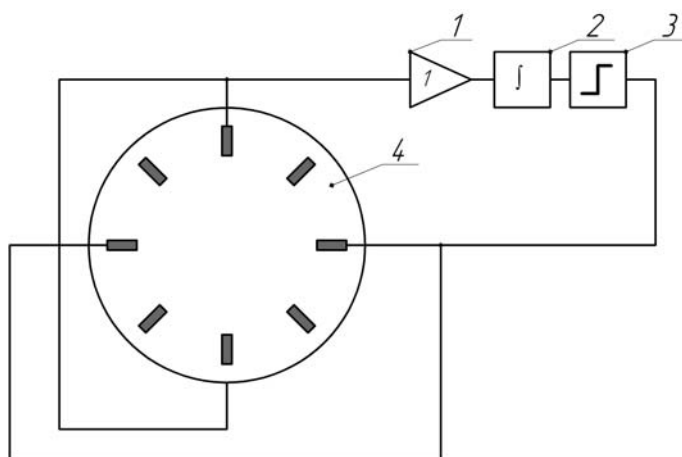


Рис. 1. Функциональная схема устройства.

1- повторитель напряжения, 2 – полосовой фильтр, 3 – компаратор, 4 – резонатор.

Экспериментально установлено, что для запуска автоколебаний не требуется дополнительного возбуждающего воздействия, т.к. в контуре присутствует широкополосный шум, включающий в том числе гармонику на рабочей частоте резонатора [6]. Даже незначительный уровень

Научный руководитель: д.т.н., заведующий кафедрой Матвеев В.В.

шума, благодаря компаратору, приводит к возникновению устойчивых колебаний. Помимо гармоники рабочей частоты в прямоугольном сигнале возбуждения присутствуют и другие гармоники, которые подавляются самим резонатором [7]. Осциллограммы сигналов, присутствующих в устройстве, иллюстрирует рисунок 2.

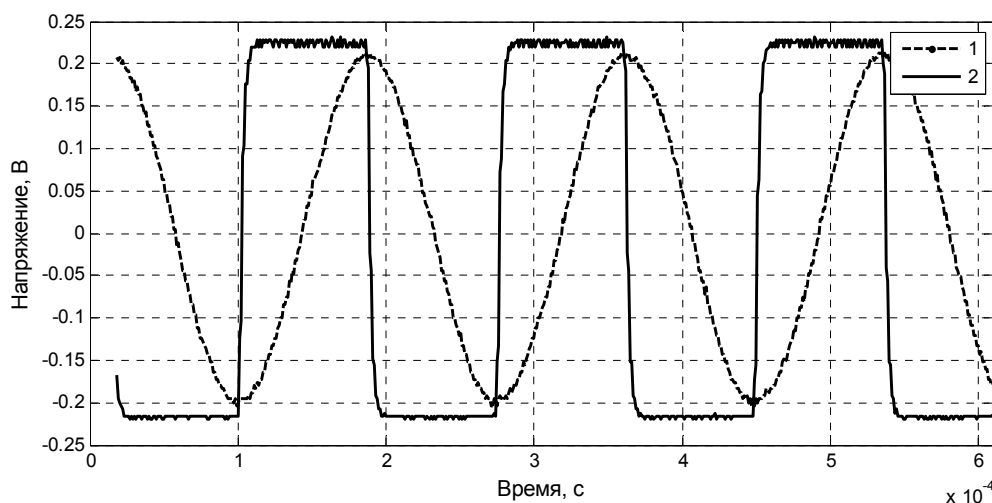


Рис. 2. Осциллограммы сигналов в контуре: 1 – реакция резонатора, 2 – сигнал с выхода компаратора.

Из анализа рисунка 2 следует, что фазовое запаздывание колебаний резонатора составляет -90° по отношению к сигналу компаратора, что соответствует автоколебательному режиму.

Заключение. Предложен способ возбуждения и поддержания стоячей волны в резонаторе волнового твердотельного гироскопа. Приведена схема устройства, построенная на аналоговых компонентах, описаны происходящие в электрической цепи процессы. Предложенное схемотехническое решение подтверждено экспериментально.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоманевренных летательных аппаратов (FEWG-2022-0002)»

ЛИТЕРАТУРА

1. **Маслов А.А.** Волновые твердотельные гироскопы: обзор публикаций / А. А. Маслов, Д. А. Маслов, И. Г. Ниналалов, И. В. Меркурьев // Гироскопия и навигация. – 2023. – Т. 31, № 1(120). – С. 3-25. – EDN VJLSLM.
2. **Стрельцов, Д. С.** Волновой твердотельный гироскоп в режиме датчика угла / Д. С. Стрельцов, В. В. Матвеев // Новые направления развития приборостроения : материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, Минск, 20–22 апреля 2022 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 49-50.
3. **Журавлев В.Ф., Климов Д.М.** Волновой твердотельный гироскоп. М.: Наука, 1985. 125 с.
4. **Распопов В.Я.** Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / В.Я. Распопов, И.А. Волчихин, А.И. Волчихин, А.В. Ладонкин, В.В. Лихошерст, В.В. Матвеев // Тула: Издательство ТулГУ. 2018. С. 135.
5. **Абгарян Ж.С.** Подход к построению схемы управления автоколебаниями / Ж.С. Абгарян, Я.В. Дулуб // Промышленная революция 4.0: взгляд молодежи: тезисы докладов Межрегиональной научной сессии молодых исследователей. Тула: Изд-во ТулГУ, 2022. 170 с.
6. **Климов Д.М., Журавлев В.Ф., Жбанов Ю.К.** Кварцевый полусферический резонатор (волновой твердотельный гироскоп). М.: Изд-во «Ким Л.А.», 2017. 194 с.
7. **Egarmin, N.E., Yurin, V.E.,** Introduction to the theory of vibratory gyroscopes, Moscow, BinomCo, 1993, 111 p.

D.S. Streltsov (Tula state university, Tula), **Method of excitation of a standing wave in a wave solid-state gyroscope**

The paper proposes a method of excitation and maintenance of a standing wave in the resonator of a wave solid-state gyroscope. The diagram of the device based on analog components is given, the processes occurring in the circuit are described.

УДК 681.51

Л. Е. КОЧЕГИЗОВА

(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, АО «Инерциальные технологии «Технокомплекс», г. Раменское),

С. В. ФЕТИСОВ, А. С. МАЛЮГИН, Д. И. МАРТЫНЕНКО
(АО «Инерциальные технологии «Технокомплекс», г. Раменское),

Д. С. ВАХЛЯРСКИЙ
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

МОДЕЛЬ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ВОЛНОВОГО ГИРОСКОПА В СРЕДЕ SIMULINK

Раскрыта структура модели твердотельного волнового гироскопа в среде Simulink, позволяющей проводить моделирование долговременных испытаний с учетом влияния технологических параметров чувствительного элемента прибора, контура управления и других внешних факторов. Приведены формулы двухстепенной модели резонатора и показаны различные способы ее реализации в среде Simulink.

Введение. В области навигации и гироскопических приборов популярность набирает создание динамических моделей [1] и исследование влияния различных внешних факторов на уже существующие приборы.

В представленной работе рассматривается построение динамической модели, отражающей поведение твердотельного волнового гироскопа (ТВГ). Модель позволит улучшить точностные характеристики и отработать алгоритмы управления.

Целью работы является разработка модели, позволяющей проводить испытания длительной работы (десятки минут) с учетом влияния технологических параметров чувствительного элемента прибора (далее – ЧЭ), то есть резонатора, а также контура управления и внешних факторов, воздействующих на резонатор, таких как управление, ускорения и вибрации.

Описание модели ТВГ. Модель ТВГ включает в себя: модель ЧЭ; модель преобразования механических перемещений в электрический сигнал; модель обработки первичных сигналов; обратной связи и модель формирования внешнего воздействия.

Модель ЧЭ. Разработка модели ЧЭ основана на двухстепенной модели движения маятника, описывающей движение резонатора вдоль двух осей и учитывающей технологические параметры: добротность, разнородность, резонансную частоту, разночастотность, угловое положение осей демпфирования и жесткости. В качестве входной информации выступает угловая скорость основания [2].

Разработано 3 варианта реализации модели ЧЭ:

- полная модель, напрямую интегрирующая систему дифференциальных уравнений двухстепенной модели. Система дифференциальных уравнений движения кромки резонатора приведена в формуле (1) [3]:

$$\begin{cases} \frac{d^2x}{dt^2} - k(2\Omega \frac{dy}{dt} + \frac{d\Omega}{dt} y) + \frac{2}{\tau} \cdot \frac{dx}{dt} + a(\frac{dx}{dt} \cos(4\alpha) + \frac{dy}{dt} \sin(4\alpha)) + \omega^2 x - \\ - b(x \cos(4\beta) + y \sin(4\beta)) = F_x(t); \\ \frac{d^2y}{dt^2} + k(2\Omega \frac{dx}{dt} + \frac{d\Omega}{dt} x) + \frac{2}{\tau} \cdot \frac{dy}{dt} - a(\frac{dy}{dt} \cos(4\alpha) - \frac{dx}{dt} \sin(4\alpha)) + \omega^2 y + \\ + b(y \cos(4\beta) - x \sin(4\beta)) = F_y(t); \end{cases} \quad (1)$$

где $x(t)$, $y(t)$ – координаты перемещения кромки резонатора в плоскости горизонтального сечения; k – масштабный коэффициент; ω – средняя резонансная частота; $\Omega(t)$ – угловая скорость основа-

ния вдоль оси прибора; τ – средняя постоянная времени затухания прибора; α – угловое положение одной из осей демпфирования; β – угловое положение одной из осей жесткости; a – коэффициент, связанный с разностотностью; b – коэффициент, связанный с разночастотностью; $F_x(t), F_y(t)$ – внешние силы, воздействующие на резонатор. Описанный вариант является самым простым для реализации в среде моделирования Simulink, он имеет удовлетворительную точность, но моделирование имеет слишком высокую вычислительную сложность, не позволяющую использовать такой тип модели для исследований, на текущий момент;

- модель пространства-состояний, преобразованная из системы дифференциальных уравнений резонатора (2) в матричный вид, что позволяет ускорить время расчёта. Для реализации в Simulink необходимо использовать специализированные блоки, а также адаптировать остальные модули для обработки матричных данных [4];
- модель, преобразованная из системы дифференциальных уравнений резонатора с помощью метода Ван Дер Поля, позволяющая сократить время вычислений и затрачиваемые вычислительные мощности.

Для моделирования ТВГ была выбрана в качестве модели ЧЭ модель Ван Дер Поля, как наиболее оптимальная с точки зрения времени расчета.

Модель преобразования механических перемещений в электрический сигнал. Модель преобразует информацию о перемещении кромки резонатора синусоидальной формы в переменное напряжение синусоидальной формы. Модель реализована с помощью дифференциального уравнения генерации тока в конденсаторе переменной ёмкости, представленного в формуле (2):

$$i(t) = U \frac{dC}{dt}, \quad (2)$$

где $i(t)$ – генерируемый переменный ток; U – постоянное напряжение питания электродов съема; $C(t)$ – ёмкость электродов съема, формируемая перемещением кромки резонатора.

Дальнейшее преобразование тока осуществляется с помощью передаточной функции преобразователя ток-напряжение.

Модель обработки первичных сигналов. На вход модели поступает синусоидальное напряжение с вышеупомянутой модели и позволяет вычислять параметры вектора состояния системы, включающего амплитуды колебаний, квадратуры колебаний и угловое положение стоячей волны, а также управление по амплитуде, квадратуре и углу, которые подаются в цепь обратной связи модели.

Модели формирования внешнего воздействия. Модель формирует силовое воздействие на ЧЭ, состоящее из управления, действующего через емкостные датчики силы, и части, действующей на дефекты масс резонатора. Электрическая составляющая силового воздействия отвечает за разгон резонатора и управление вектором состояния стоячей волны, которая формируется как электростатическая сила. Вторая составляющая реализует воздействие на резонатор вибраций и ускорений, формируя инерционную силу. На выходе модели формируется сила воздействия на ЧЭ в соответствии с заданными параметрами.

Заключение. В работе раскрыта структура разработанной модели прибора и описаны различные способы реализации двухступенной модели резонатора ТВГ. Представленные модели позволяют имитировать работу прибора на длительном промежутке времени за счет подбора оптимального вида модели и решателя, что даёт возможность оценить их достоверность, сравнив полученные результаты с эталонными, то есть снятыми с реальных приборов. Необходимо отметить, что модель позволяет имитировать работу прибора с контуром управления по амплитуде, квадратуре и углу волны, что в дальнейшем будет использовано для исследования влияния внешних факторов при длительной работе ТВГ, а также при тестировании различных алгоритмов управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Подчерзев В.П., Цинь Цзыхао.** Моделирование калибровки динамически настраиваемых гироскопов на одноосном гиросtabilизаторе. Инженерный журнал: наука и инновации, 2017, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-10-1682>
2. **Лукин Б. С., Матвеев В. А., Басараб М. А.** Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология : [монография] / – М. : Радиотехника, 2014. – 174 с. : ил. – Библиогр.: с. 159-171. - ISBN 978-5-88070-381-4.
3. **Lynch D.,** Vibratory Gyro Analysis by the Method of Averaging, - Proc. 2nd St. Petersburg Conf. on Gyroscopic Technology and Navigation, St. Petersburg, Russia, May 24-25, 1995, pp.26-34.
4. **Кудинов, Ю. И.** Теория автоматического управления (с использованием MATLAB — SIMULINK) : учебное пособие / Ю. И. Кудинов, Ф. Ф. Пашенко. – 3-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2019. – 312 с. – ISBN 978-5-8114-1994-4. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/111198> (дата обращения: 31.01.2023). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

L.E. Kochegizova (BMSTU, Moscow, JSC “Inertial Technologies of Technocomplex”, Rameskoye), S.V. Fetisov, A.S. Mal-yugin, D.I. Martynenko (JSC “Inertial Technologies of Technocomplex”, Rameskoye), D.S. Vakhlyarskiy (BMSTU, Mos-cow). **Development of hemispherical resonator gyroscope model in Simulink**

Abstract. The paper presents the structure of hemispherical resonator gyroscope model in Simulink. It allows carrying out long-lasting tests with reactions to technological parameters of the measuring element of gyroscope, control system and other external factors. The paper shows the formulas of three models of the resonator that considers motion along only two axes and their realization in Simulink, just as the overall structure of the model with descriptions of every segment.

УДК 629.7.054.07

Н.В. ТИХМЕНЕВ, С.И. НАЗАРОВ, А.А.УШАНОВ
(АО «ГосНИИП», Москва)**ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТИ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА С
ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ ГЕНЕРИРУЕМОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Исследовано влияние внешнего вибрационного воздействия на выходной сигнал лазерного гироскопа с линейной поляризацией излучения. Проведены динамические расчёты конструкции прибора. Показано, что ошибки измерения угловой скорости возникают в области частот собственных резонансов конструкции. Сформулированы требования, позволяющие повысить виброустойчивость конструкции.

Введение. Работа посвящена исследованию виброустойчивости лазерного гироскопа (ЛГ) с линейной поляризацией генерируемого излучения и виброподвесом [1] и возможности его применения в составе инерциальной навигационной системы (ИНС) для обеспечения автономной навигации [2] высокоманевренных летательных объектов.

Целью настоящей работы является выявление причин нарушения точностных характеристик ЛГ с виброподвесом и поиск возможности уменьшения погрешностей, возникающих под действием внешних вибраций.

Анализ лазерных ИНС и гироскопов. Проведен анализ наиболее распространённых в России и за рубежом моделей ЛГ и ИНС на их основе [3,4], позволивший выявить образцы навигационных систем, устойчивых к вибрационным воздействиям. Основные параметры виброустойчивых приборов представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1.

Основные особенности наиболее распространенных ИНС и гироскопов (ГИБ) на ЛГ

Класс ЛГ	Точные для автономной навигации		Грубые для навигации со спутниковой коррекцией	
	Фирма	АО КРЭТ, РФ	Фирма	АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», РФ
Модель ИНС/ГИБ	Honeywell, США	АО КРЭТ, РФ	Honeywell, США	АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», РФ
Модель ЛГ	GG-1320	БИНС-СП	HG 1700AG37	МТ-401
Периметр ЛГ, см	15,4	28	6,1	16
Точность ЛГ, град/ч	0,0035	0,0035-0,01	1	1
Виброустойчивость, g	20 g	4,5 g	20 g	20 g
Амортизация в составе ИНС	Есть	Есть	Есть	Нет
Физический принцип построения ЛГ	Линейная поляризация света, механическое расщепление частот вибрационным подвесом			Круговая поляризация света, зеэмановское расщепление частот магнитным полем
Объем ИНС/ГИБ, л	3,2/-	18,3/6,5	2,7/0,54	-/5,1

Отмечено, что фирмой Honeywell (США) решаются разнообразные задачи навигации с помощью двух типов ЛГ с виброподвесом: это высокоточные приборы типа GG-1320 с точностью не хуже 0,01°/час для автономной навигации и миниатюрные бюджетные приборы типа GG-1308 с точностью 1°/час для стабилизации курса [5]. Эти ЛГ обладают вибрационной устойчивостью до 20 g.

Отечественным аналогом прибора GG-1308 в настоящее время является ЛГ типа ЭК-104С с магнитооптической частотной подставкой, обладающий точностью до 1°/час и вибрационной устойчивостью до 20g [6]. Однако, ИНС типа МТ-401 на основе ЛГ ЭК-104С значительно пре-

вышает по габаритам зарубежный аналог [7]. Ближайшим аналогом высокоточных ЛГ на виброподвесе типа GG-1320 является отечественный прибор КЛ-3 с точностью не хуже $0,01^\circ/\text{час}$, применение которого для автономной навигации высокоманевренных объектов ограничено невысокой вибрационной устойчивостью в $4,5\text{ g}$ [2].

Приведенный анализ показывает, что перспективным вектором развития лазерных ИНС является обеспечение виброустойчивости отечественных ЛГ с линейной поляризацией света и механическим расщеплением частот вибрационным подвесом, обеспечивающих точность до $0,01^\circ/\text{час}$ для автономной навигации.

Анализ конструкции ЛГ на виброподвесе. Причиной ограничения вибрационной устойчивости ЛГ с линейной поляризацией света является нежесткость крепления кольцевого лазера [8], что может приводить к дополнительным резонансам конструкции.

Для исследования собственных резонансов конструкции ЛГ с периметром 28 см были проведены механические испытания на вибростенде, включающие синусоидальную и широкополосную случайную вибрацию в диапазоне частот от 20 до 2000 Гц. В ходе эксперимента с помощью ЛГ регистрировалась вертикальная проекция скорости вращения Земли ($12,4\text{ град/ч}$) и смещение нуля, вызванное механическим воздействием.

На рисунке 1 представлены экспериментальные данные вибрационных испытаний макета ЛГ на виброподвесе в диапазоне частот 20-2000 Гц с амплитудой 4g : измеренная угловая скорость (верхний график) и резонансы конструкции (нижний график) на частоте 400 Гц (полезный), 700 Гц и 1100 Гц (паразитные). Из рисунка 1 видно, что наибольшие ошибки измерения угловой скорости возникают в области резонансов конструкции ЛГ.

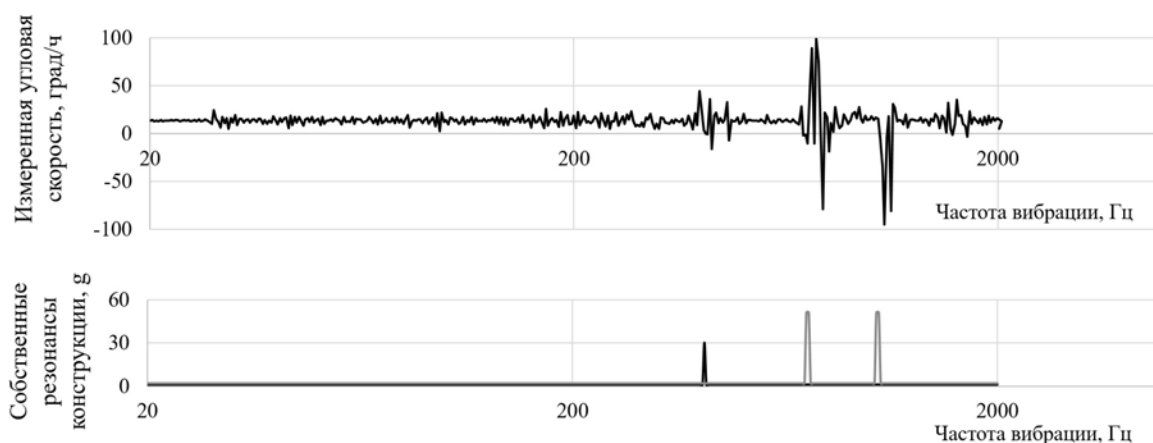


Рис. 1. Результаты исследования виброустойчивости ЛГ на виброподвесе

Для проверки полученных результатов была создана конечно-элементная модель ЛГ с виброподвесом, выполнены динамические расчёты конструкции в системе ANSYS и программном комплексе EULER [9]. По результатам моделирования определены собственные резонансные частоты и паразитные резонансы конструкции ЛГ с линейной поляризацией света. Полученные экспериментальные результаты хорошо согласуются с результатами моделирования. Проведенные исследования виброустойчивости ЛГ с линейной поляризацией света показывают, что основным источником ошибок измерения угловой скорости являются паразитные резонансы конструкции. Это позволяет сформулировать требования к доработке виброподвеса ЛГ, заключающейся в смещении частот паразитных резонансов за область диапазона воздействия (выше 2000 Гц), что существенно уменьшит ошибки измерения.

Заключение. Исследовано влияние внешнего вибрационного воздействия на выходной сигнал ЛГ с линейной поляризацией излучения и проведены динамические расчёты его конструкции. Показано, что ошибки измерения угловой скорости возникают в области частот собственных резонансов ЛГ. По результатам исследования сформулированы требования, позволяющие повысить виброустойчивость ЛГ на виброподвесе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Енин В.Н., Сансеев И.В., Волков Э.В.** Малогабаритный прецизионный лазерный гироскоп с виброподставкой // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал. 2017. №5. С. 105-118.
2. **Кузнецов А.Г., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А.** Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 1. С. 78-88.
3. **Пешехонов В. Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 3-10. DOI 10.17285/0869-7035.0028
4. **Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В., Голяев Ю.Д. и др.** 50 лет лазерному гироскопу // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2013. С. 7-21.
5. **M. Oelschlaeger, L.O. Thielman.** GG1308 ring laser gyro inertial measurement systems: Honeywell's low-cost solution for tactical applications, in IEEE Position Location and Navigation Symposium, Las Vegas, USA, 1990, pp.528-536.
6. **Грушин М.Е., Колбас Ю.Ю.** Вибрационная ошибка лазерных гироскопов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2017. №4 (115). С. 27-42.
7. **Синельников А.О., Медведев А.А., Голяев Ю.Д., Грушин М.Е., Чекалов Д.И.** Роль тепловых дрейфов нуля в магнитооптических зеемановских лазерных гироскопах // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 4(115). С. 46–55. DOI 10.17285/0869-7035.0079
8. **Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В.** Прикладная теория гироскопов. СПб: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015. 316 с.
9. **Бойков В.Г., Юдаков А.А.** Моделирование динамики системы твердых и упругих тел в программном комплексе EULER // Информационные технологии и вычислительные системы. 2011. № 1. С. 42-52.

N.V. Tikhmenev, S.I. Nazarov, A.A. Ushanov (Joint Stock Company “State Research Institute of Instrument Engineering”, Moscow). **Analysis sensitivity to mechanical vibration of laser gyro with linear generation light polarization.**

Abstract. The influence of an external vibrational action on the output signal of a laser gyroscope with linear polarization has been studied. Dynamic calculations of the device design were carried out. Errors in measuring the angular velocity occur on the frequency of natural resonances of the structure. Requirements for increasing the vibration resistance of the structure are formulated.

УДК 539.184.5

В.В. ЧАЛКОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург)

СПОСОБ МИНИМИЗАЦИИ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ЛАЗЕРОВ НАКАЧКИ И ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПРИ НАСТРОЙКЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО ГИРОСКОПА

Рассмотрена система стабилизации лазерного излучения в ядерно магнитном гироскопе. Приведены результаты эксперимента, демонстрирующие наличие взаимного влияния лазеров накачки и детектирования при настройке оптической схемы ядерного магнитного гироскопа. Предложены варианты уменьшений взаимного влияния лазеров при настройке и работе гироскопа.

Введение. Ядерные магнитные гироскопы (ЯМГ) потеряли популярность в начале 2000-х годов из-за развития других датчиков, таких как волоконно-оптические гироскопы и кольцевые лазерные гироскопы. Однако в последние годы популярность ЯМГ возродилась [1, 2] как благодаря уникальным характеристикам, таким как долговременная стабильность смещения нуля, высокая чувствительность и точность, так и тому, что ученые смогли уменьшить размер ЯМГ, используя передовые технологии производства и новые материалы. Одной из таких технологий является вертикально-излучающий лазер (ВИЛ), который способен создать стабильное и узкое по спектральной ширине лазерное излучение, необходимое для точного измерения прецессии ядерных спинов в ЯМГ.

В ЯМГ используются два лазера [2–4]: лазер накачки (ЛН) и лазер детектирования (ЛД). ЛН используется для возбуждения ядер рабочего вещества – ксенона, и выравнивания их спинов в магнитном поле.

Циркулярно поляризованное излучение ЛН соответствует резонансным оптическому переходу цезия и ориентирует электронные спины цезия, создавая макроскопическую продольную намагниченность щелочных атомов в ячейке [2, 5]. В результате процессов спин-обмена намагниченность передается от атомов цезия к ядрам ксенона.

ЛД излучает световой сигнал в тоже вещество, что и ЛН, но длина волны этого излучения отстроена от центра резонансной оптической линии цезия и используется для детектирования частоты прецессии ядер ксенона после того, как они были возбуждены ЛН. Для стабилизации лазеров применяется следящая система (для каждого своя), контролирующая длину волны излучения лазера. Таким образом, цель настоящей работы заключатся в определении взаимосвязи между лазерами в оптической системе ЯМГ и разработка методов уменьшения взаимного влияния лазеров при настройке и работе гироскопа.

Запуск следящей системы оптической системы ЯМГ. Следящая система использует механизм обратной связи для отслеживания и поддержания выравнивания длин волны испускаемого лазерами света. Это достигается путём регулировки тока подаваемого на лазеры, используя сканирование по частоте. Эта система предназначена для работы в режиме реального времени и непрерывного контроля скорости вращения ЯМГ, что позволяет системе быстро и точно регулировать лазерное излучение для компенсации любых изменений скорости вращения, повышая точность измерения скорости вращения.

Процесс запуска следящей системы можно разделить на три этапа.

Первый этап - нагрев лазеров и запуск следящей системы по температуре [6].

Второй этап - запуск ЛН. Для этого производят поиск значения тока инжекции для ЛН при котором наблюдается оптический резонанс в цезии, это выполняется с помощью сканирования по частоте [6]. После выбирается значение на графике зависимости 1-ой производной сигнала интенсивности по времени ЛН значение тока инжекции соответствующее центру резонанса цезия, и запускается следящая система.

Научный руководитель: к.т.н., начальник лаборатории Безмен Г.В.

Третий этап – запуск ЛД. Для этого проводят процедуру аналогичную для ЛН – производят поиска значения тока инжекции ЛД при котором происходит резонанс в цезии, это выполняется с помощью сканирования по частоте. После выбирается значение на графике 1-ой производной сигнала интенсивности ЛД отличное от центра резонанса [7], и запускается следящая система.

Пример второго и третьего этапов запуска следящей системы экспериментального образца ЯМГ представлены на рисунке 1 и 2.

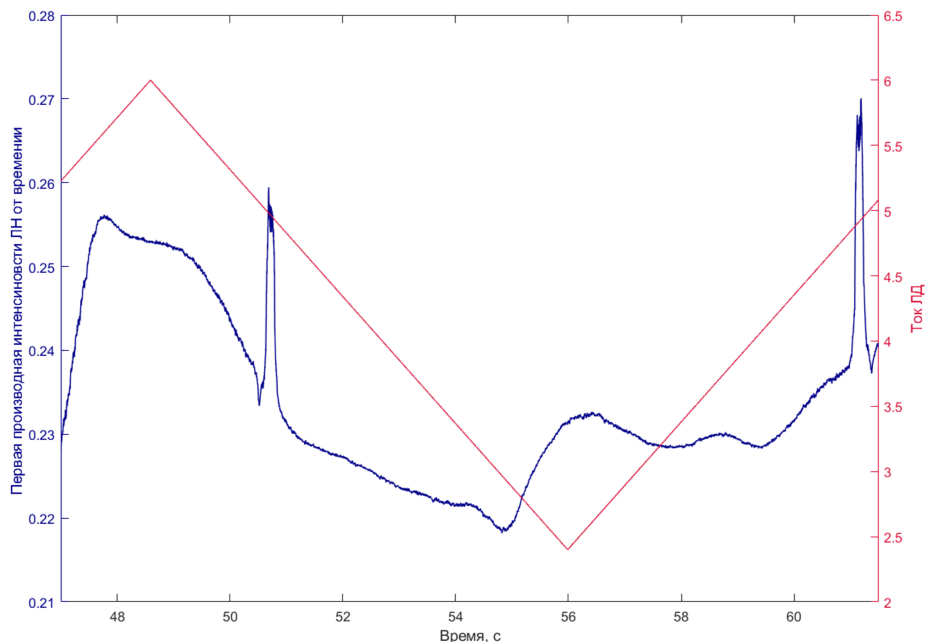


Рис. 1. Графики первой производной интенсивности ЛН по времени и тока инжекции ЛД

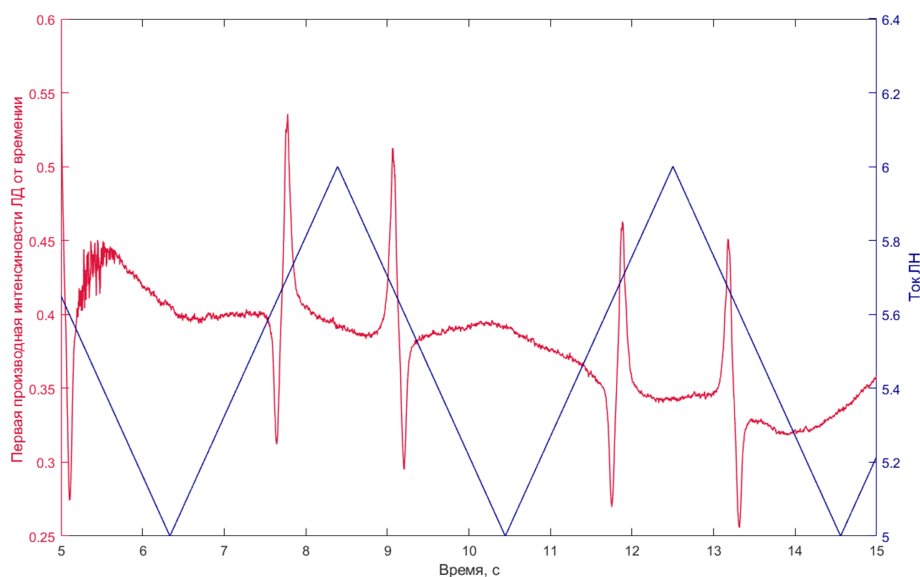


Рис. 2. Графики первой производной интенсивности ЛД по времени и тока инжекции ЛН

Как можно заметить из графиков рисунков 1 и 2, при запуске сканирования по частоте ЛН, интенсивность ЛД изменяться и наоборот, при запуске сканирования по частоте ЛД, интенсивность ЛН изменяться. Подобная зависимость усложняет процесс запуска и стабилизации следящей системы оптической системы.

Существует несколько способов уменьшения взаимного влияния ЛН и ЛД в ЯМГ:

Учёт зон токов инжекции, при которых наблюдаются зависимости между ЛН и ЛД при запуске соответствующих следящих систем позволит точнее выбрать начальные значения токов инжекции для запуска следящих систем.

Разработка и применение ЛН и ЛД с большим соотношением сигнал шум, позволит уменьшить зависимость между ЛН и ЛД, поскольку шум от ЛН и ЛД уменьшает точность определения тока инжекции советующих лазеров и влияет на точность ЯМГ в целом.

Разработка и применение более развитой системы стабилизации температуры ЯМГ в целом и в зоне размещения лазеров позволит точнее управлять лазерами и соответственно точнее выбирать начальные значения токов инжекции для запуска следящей системы.

Важно отметить, что взаимное влияние ЛН и ЛД можно уменьшить, используя комбинацию этих методов, в зависимости от конкретного применения ЯМГ.

Выводы. В работе рассмотрена система стабилизации лазерного излучения в ядерно магнитном гироскопе. Приведены результаты эксперимента, демонстрирующие наличие взаимного влияния лазеров накачки и детектирования при настройке оптической схемы ядерного магнитного гироскопа. Предложены варианты уменьшения взаимного влияния лазеров при настройке и работе гироскопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 3-10. DOI 10.17285/0869-7035.0028
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. **Поров, Е.Н., Barantsev, K.A., and Litvinov, A.N.**, “Theoretical simulation of a signal for a scheme of an atomic spin gyroscope with optical detection”, *Kvantovaya Elektronika*, vol. 49, no. 2, 2019, pp. 169–177.
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. **T.G. Walker, M.S. Larsen**, Spin-Exchange-Pumped NMR Gyros Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics, Academic Press, Volume 65, 2016, Pages 373-401,
6. **Безмен Г.В.** Шевченко А.Н. The choice of criteria and methods of quality assessing for the angle sensor based on the effect of nuclear magnetic resonance сборник Мультиконференции для публикации в журнал *Journal of Physics: Conference Series* 2021г.
7. **В.В. Чалков, А.Н. Шевченко**, Исследование системы захвата и стабилизации лазера детектирования квантового датчика вращения// Материалы XXIII 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», 2021.

V.V. Chalkov (State Research Center Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg). **Minimizing the mutual influence of pump and detection lasers when adjusting the optical circuit of a nuclear magnetic gyroscope**

Abstract. The paper examines the laser radiation stabilizing system in a nuclear magnetic gyroscope. Experimental results are presented that demonstrate the presence of mutual influence of pump and detection lasers when adjusting the optical circuit of a nuclear magnetic gyroscope. Options have been proposed for reducing the mutual influence of lasers when setting up and operating a gyroscope.

Секция 3.
НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ В ШКОЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ

УДК 681.51

А.А. ГОЛОВАНОВА
(ГБОУ Гимназия №406, Санкт-Петербург)

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ
В ПОМЕЩЕНИИ С ПОМОЩЬЮ ВСТРОЕННЫХ ДАТЧИКОВ
МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА**

В работе предложена методика проведения измерений индукции магнитного поля в помещении с помощью магнитометра, встроенного в мобильный телефон, для реализации метода локальной навигации по магнитным полям. Предложенная методика подходит для составления двумерной карты индукций магнитного поля.

Методика измерений включает в себя 3 основных аспекта:

1. измерения должны производиться с помощью немагнитной оснастки для исключения вредных помех магнитного поля;
2. ориентация осей чувствительности магнитометров должна оставаться неизменной на протяжении всего времени проведения измерений;
3. Телефон должен перемещаться на одной высоте.

Для повышения точности измерений время от времени должна проводиться калибровка устройства с помощью движений руки, описывающих форму символа бесконечности.

На основании разработанной методики в разное время года с использованием устройств разных производителей были проведены измерения индукции магнитного поля в помещении Гимназии №406 Пушкинского района города Санкт-Петербурга. В качестве оснастки использовалась картонная коробка, телефон закреплялся неподвижно на её верхней грани. В результате эксперимента было выявлено, что характер изменений индукции магнитного поля инвариантен относительно используемого устройства и времени проведения измерений, что говорит о корректности методики и позволяет использовать её для составления карты индукций магнитного поля при решении задачи локальной навигации по магнитным полям.

УДК 681.51

А.С. ГЕРАСИМОВ
(ГБОУ Гимназия №406, Санкт-Петербург)

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ КАРТЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ВЕЛИЧИНАМ

Для построения карты магнитного поля, используемой в задаче определения местоположения человека методом навигации по магнитным полям, реализован алгоритм вычисления промежуточных значений индукции магнитного поля по значениям в четырех известных точках.

Рассмотрены два способа определения промежуточных значений:

- геометрический, основанный на итерационном вычислении средних значений индукции магнитного поля между точками с известными значениями магнитной индукции;
- алгебраический, реализующий билинейную интерполяцию функции двух переменных, на вход которой подаются значения индукции в четырех известных точках, пройденное расстояние и начальные координаты.

Алгебраический способ является более точным и простым с точки зрения математического описания, поэтому для программной реализации (на языке *Python*) решения задачи определения промежуточных значений магнитной индукции был использован именно он. Разработанная программа позволяет определить координату при прямолинейном движении и найти значение магнитной индукции в произвольной точке. Также для подсчёта пройденного расстояния реализован алгоритм конвертации шага человека в метры, использующий в качестве входных параметров пол и рост человека.

Научные руководители: инженер-технолог Климова Е.Н., инженер Власова М.А.

УДК 681.51

Ф.К. ДАРМАНЧЕВ
(ГБОУ Гимназия №406, Санкт-Петербург)

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ КАРТЫ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Работа посвящена разработке программного обеспечения для графического представления информации, полученной при измерении индукции магнитного поля в помещении, в целях создания карты индукции магнитного поля в задаче локальной навигации по магнитным полям.

Программа разрабатывалась на языке *Python*. Для решения задачи были подключены библиотеки *Matplotlib* (построение графиков) и *NumPy* (математический аппарат). На вход подаются измерения индукции магнитного поля, полученные с различных устройств. Осуществляется их приведение к единому формату. Построение карты индукции магнитных полей производится с помощью билинейной интерполяции. На выходе программа выдаёт двумерные графики градиента магнитной индукции (по ширине и длине помещения) в формате *.png*.

Научные руководители: к.т.н., ведущий специалист Золотаревич В.П.; инженер-технолог Климова Е.Н.

УДК 681.51

Е.Д. КОТЛЯРОВА
(ГБОУ Гимназия №406, Санкт-Петербург)

КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ НАВИГАЦИИ В ПОМЕЩЕНИИ ПО МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

Реализован корреляционно-экстремальный алгоритм навигации, позволяющий определить местоположение пользователя в помещении с использованием заранее известной карты индукций магнитного поля. В качестве оборудования для съёма используется магнитометр, встроенный в мобильный телефон пользователя.

Корреляционно-экстремальный алгоритм, применённый к рассмотренной задаче, заключается в следующем. Измерения, получаемые с помощью магнитометра при движении человека в помещении, сравниваются с участками карты, содержащими эталонные значения индукций магнитного поля. Если их сходство достаточно велико, алгоритм определяет, что объект находится на соответствующем участке карты.

Описанный алгоритм был реализован в виде программы на языке Python. Тестирование, проведённое на реальных данных, доказало возможность его применения. В перспективе планируется внедрение корреляционно-экстремального алгоритма в приложение для осуществления навигации по магнитному полю.

Научные руководители: к.т.н., ведущий специалист Золотаревич В.П.; инженер-технолог Климова Е.Н.

УДК 681.51

Д.Д.СИНИКОВА
(ГБОУ Гимназия № 406, Санкт-Петербург)

РАЗРАБОТКА ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ ДЛЯ ОРИЕНТАЦИИ В ПРОСТРАНСТВЕ ПО МАГНИТНЫМ ПОЛЯМ

Разработан графический интерфейс приложения «*INPO*» (*Indoor Positioning* – позиционирование внутри помещения), позволяющего определять местоположение человека в помещении с использованием измерений магнитометра мобильного телефона и карты индукции магнитных полей, заранее снятой для этого помещения. В приложении предполагается реализация двух алгоритмов:

- позиционирования пользователя в помещении;
- поиска ближайшего выхода из помещения.

В качестве архитектуры приложения взят шаблон проектирования *MVC* (*model, view, controller*). К модулю *model* относятся измерения магнитометра и карта индукции магнитных полей; к модулю *controller* – приведенные выше алгоритмы; к модулю *view* – графический интерфейс.

Графический интерфейс приложения состоит из четырех окон:

- титульная страница с названием приложения;
- диалоговое окно, содержащее анкету для ввода данных (рост и пол), которые используются в указанных выше алгоритмах для расчёта длины шага пользователя в целях определения пройденного расстояния;
- окно позиционирования, отображающее результат определения координат (местоположение) пользователя;
- окно поиска выхода, в котором выводится направление и количество шагов до ближайшего к пользователю выхода.

На текущий момент разработан графический интерфейс прототипа приложения «*INPO*» для навигации по магнитным полям с возможностью перехода между его окнами. В перспективе планируется подключение к приложению «*INPO*» описанных выше алгоритмов.

Научные руководители: к.т.н., ведущий специалист Золотаревич В.П.; инженер Власова М.А.

УДК 681.51

А. В. БАЛАКИРСКИЙ
(ГБОУ «Президентский ФМЛ № 239», Санкт-Петербург)

РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ, НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИБЛИОТЕКИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ OPENCV НА ПРИМЕРЕ ИГРЫ «АРКАНОИД»

«Арканоид» – игра, в которой двум роботам, перемещающимся по параллельным балкам, необходимо попасть мячом в борт игрового полигона за соперником. Для распознавания мяча и определения местоположения робота используется видеосигнал, формируемый закрепленной над полигоном камерой, угловое поле зрения которой охватывает все игровое пространство.

Робот создан на основе конструктора *LEGO EV3*, в его состав входят 2 мотора для перемещения вдоль балки и 2 мотора для отбивания мяча. Управление роботом осуществляется с помощью беспроводного канала связи *Bluetooth*.

Алгоритмы распознавания мяча и навигации робота реализуются с использованием библиотеки компьютерного зрения и обработки изображений *OpenCV*. Определение траектории движения мяча производится посредством построения прямой по нескольким точкам. Далее находится точка пересечения этой траектории с прямой, по которой осуществляется перемещение робота. Для того чтобы робот отбил мяч, ему подается управляющее воздействие, равное сумме пропорционального и дифференциального регуляторов.

УДК 681.51

К.В. ГРИЦЕНКО, Д.В. КОРОБИЦЫНА
(БПШ КТиУ ИТМО, Санкт-Петербург)

СРАВНЕНИЕ РЕЛЕЙНОГО И ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ

Работа посвящена исследованию релейного и пропорционального регуляторов, используемых в системе управления сервомотором робота, созданного на основе набора *LEGO EV3*. Для оценки эффективности работы рассматриваемых регуляторов был проведен натурный эксперимент, в ходе которого с помощью видеосъемки фиксировались изменения угла поворота сервомотора во времени. В результате эксперимента были определены зависимости параметров переходного процесса от характеристик регуляторов.

УДК 681.51

К.В. ГРИЦЕНКО, В.И. ВЕДЕРНИКОВ
(БПШ КТиУ ИТМО, Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ И АЛГОРИТМОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РОБОТОВ

В работе рассматриваются алгоритмы, применяемые при управлении движением робототехнических систем. В среде *Lego Mindstorms Education EV3* реализованы используемые математические операции. Проведена калибровка, осуществлено параллельное выполнение нескольких задач, исследовано использование системного таймера.

УДК 527.4, 656.61.052

И.В. ПАНАРИНА, М.А. МАСЛОВ
(ГБОУ СОШ № 291, Санкт-Петербург),

А.А. МУРАВИЦКИЙ
(ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург)

УСТРОЙСТВО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАВИГАЦИОННОГО ПРИБОРА ФОТОСЕКСТАН

Фотосекстан – навигационный оптико-электронный прибор, предназначенный для определения местоположения по фотографии, на которой изображены линия горизонта и навигационные светила. Существенный вклад в погрешность такого прибора вносят аберрации оптической системы, приводящие к искажениям изображений. Для коррекции этих искажений, необходимо определить функциональную зависимость, которая называется калибровочной характеристикой фотосистемы. С этой целью был спроектирован и создан стенд, представленный в работе.

Научный руководитель: к.в.н., профессор кафедры Козик С.В.

УДК 681.51

К.Д. ДИНОВЕЦКИЙ
(МОУ Лицей № 2, г. Саратов)

**АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРЕЦИЗИОННЫМ СТЕНДОМ С ВОЛОКОННО – ОПТИЧЕСКИМ ГИРОСКОПОМ
В КАЧЕСТВЕ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА**

В работе исследуется прецизионный стенд для контроля измерителей угловой скорости с волоконно - оптическим гироскопом в качестве инерциального чувствительного элемента. С помощью компьютерного моделирования, выполненного в программных пакетах *MatLab* и *Simulink*, проанализированы динамические характеристики и оценены показатели качества системы автоматического управления стендом. Показано, что при изменении момента инерции платформы в 10 раз (как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения) по сравнению с номинальным значением (10 гсмс^2) система автоматического управления стендом теряет динамическую устойчивость.

Научный руководитель: д.т.н., профессор кафедры Калихман Д.М.

УДК 621.352

Д.Д. ХОХЛОВА
(МБОУ Гимназия № 2, г. Сургут)

СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА УСТРОЙСТВА СО ВСТРОЕННОЙ GPS СИСТЕМОЙ И ПОРТАТИВНЫМ АККУМУЛЯТОРОМ ДЛЯ ТУРИСТИЧЕСКИХ ПОХОДОВ, СПОСОБНОГО ПОЛУЧАТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ ИЗ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ТЕЛА

Работа посвящена созданию прототипа автономного устройства, предназначенного для использования в туристических походах. В состав устройства входят приемник GPS и портативный аккумулятор, работающий посредством получения электроэнергии из человеческого тела. Для зарядки аккумулятора используются лактатный биотопливный элемент, работающий за счет окисления лактат-ионов из человеческого пота, и пьезоэлектрический элемент, позволяющий получать дополнительную энергию при совершении механических действий.

УДК 004.93'11

П.А. БУЛАНОВ, И.П. МЕРКУРЬЕВ, М.П. МЫШКО
(ГБОУ лицей № 533 «Малая Охта», г. Санкт-Петербург)

ВЫЯВЛЕНИЕ УТЕЧЕК БЕСЦВЕТНЫХ ГАЗОВ МЕТОДАМИ КОМПЬЮТЕРНОГО ЗРЕНИЯ

Рассмотрены современные методы обнаружения утечек бесцветных газов в различных средах, а также используемые в настоящее время средства анализа утечек и сферы их применения. Выявлено одно из наименее изученных на данный момент направлений — подводные утечки.

Обнаружение и распознавание подводных утечек газа из магистральных газопроводов, расположенных под водой на глубине от 50 до 200 м, реализовано с использованием методов компьютерного зрения. Выполнен расчет размеров визуальных проявлений утечек и их смещений на поверхности воды при малых повреждениях (менее 1мм²). С использованием графического материала, отобранного из имеющейся в открытых источниках информации, обучена и протестирована нейронная сеть, позволяющая осуществлять детекцию утечек по снимкам.

Предложено компактное аппаратное решение для мониторинга подводных газовых сетей и описаны методы его использования. Рассмотрена возможность применения предложенной системы на беспилотных летательных аппаратах. Также описаны основные направления дальнейшей работы над поставленной задачей.

Научный руководитель: инженер-программист Мосейко Е.И.

Секция 4.
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ

УДК 520.8, 528.061

С.М. ТАРАСОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

**АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ПРИВЯЗКИ ДАННЫХ
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АСТРОНОМИЧЕСКОГО УНИВЕРСАЛА К ШКАЛЕ
ВСЕМИРНОГО ВРЕМЕНИ**

Предлагается алгоритм определения погрешностей привязки данных астрономических наблюдений автоматизированного астрономического универсала к шкале всемирного времени UTC при определении астрономических долгот и азимутов вблизи плоскости меридиана в северном и южном направлениях.

Введение. Одной из основных составных частей современных астрономических приборов, таких как автоматизированный астрономический универсал (ААУ) [1], является спутниковая навигационная аппаратура, предназначенная для определения геодезических координат места установки ААУ, выдачи значений времени UTC и формирования сигналов синхронизации (далее - сигналы PPS), по которым осуществляется привязка данных астрономических наблюдений к шкале времени UTC. По сигналам PPS в телевизионной аппаратуре ААУ регистрируются кадры с изображениями звезд с привязкой к значению времени UTC.

Сигналы PPS формируются отдельно от значений времени UTC и поступают в телевизионную аппаратуру в разные моменты времени, что может привести к систематической погрешности привязки данных астрономических наблюдений к шкале времени UTC $\Delta T = 1$ с, обусловленной сбоями в работе как телевизионной, так и спутниковой аппаратуры, а также нарушением логики работы программного обеспечения ААУ. Случайная составляющая погрешности привязки к шкале времени UTC в данной работе не учитывается, так как в ААУ она пренебрежимо мала (5 мкс) [2].

Погрешности определения астрономических долгот $\Delta \lambda$ и азимутов ΔA , обусловленные погрешностью привязки к шкале времени UTC, составляют величины, значительно превышающие требуемую точность определения долгот и азимутов при использовании ААУ, что делает актуальной задачу определения систематических составляющих погрешностей привязки к шкале времени UTC.

В работе описывается алгоритм определения значений погрешностей привязки к шкале времени UTC с целью их компенсации после повторной обработки данных астрономических наблюдений.

Погрешности привязки к шкале времени. Погрешность привязки ΔT к шкале времени UTC равна 1 с и в первую очередь влияет на результат расчета Гринвичского истинного звездного времени θ , используемого при определении астрономических долгот и азимутов [2, 3]. В таком случае θ будет содержать погрешность $\Delta \theta = \omega \Delta T$, где $\omega = 15''/с$ – угловая скорость вращения Земли.

Астрономические координаты (широта φ и долгота λ) рассчитываются из экваториальных координат (прямого восхождения α и склонения δ) точки, соответствующей пересечению визирной осью ААУ небесной сферы в околорезидентной области, по аналогии с автоматизированным зенитным телескопом [4 - 6]. Погрешность определения астрономической долготы $\Delta \lambda$, обусловленная погрешностью привязки к шкале времени UTC, вычисляется по формуле

$$\Delta \lambda = -\Delta \theta_{\lambda} = -\omega \Delta T_{\lambda}, \quad (1)$$

Научный руководитель: к.т.н. Кузьмина Н.В.

где $\Delta\theta_\lambda$ – погрешность расчета θ при определении долготы; ΔT_λ – величина систематической составляющей погрешности привязки к шкале времени UTC при определении долготы.

Астрономический азимут в ААУ рассчитывается по наблюдению звезд вблизи плоскости меридиана на высоте $h=40^\circ$ [1]. Погрешность определения азимута ΔA , обусловленная погрешностью привязки к шкале времени UTC, а также погрешностью $\Delta\lambda$, может быть выражена в виде [7, 8]

$$\Delta A = \frac{\cos q \cos \delta}{\cos h} (\Delta\theta_A + \Delta\lambda) = \frac{\cos q \cos \delta}{\cos h} \omega(\Delta T_A - \Delta T_\lambda), \quad (2)$$

где h – высота визирной оси; $\Delta\theta_A$ – погрешность расчета θ при определении азимута; ΔT_A – величина систематической составляющей погрешности привязки к шкале времени UTC при определении азимута; q – параллактический угол [7].

Алгоритм определения погрешности привязки к шкале всемирного времени. Алгоритм определения погрешностей привязки к шкале времени UTC ΔT_λ (при определении долготы), ΔT_{A0} (при определении азимута в северном направлении) и ΔT_{A180} (при определении азимута в южном направлении) заключается в последовательной проверке условий в соответствии с блок-схемой, представленной на рисунке 1 на основе данных астрономических наблюдений:

- астрономические координаты места установки ААУ $\varphi_{изм.}, \lambda_{изм.}$;
- геодезические координаты места установки ААУ (широта B и долгота L);
- данные астрономических наблюдений при определении азимута в северном направлении $A_0, h_0, \alpha_0, \delta_0, q_0$;
- данные астрономических наблюдений при определении азимута в южном направлении $A_{180}, h_{180}, \alpha_{180}, \delta_{180}, q_{180}$;
- рассчитанные значения Гринвичского истинного звездного времени при наблюдении в северном θ_0 и южном θ_{180} направлениях;
- усредненные показания датчика угла азимутального привода, входящего в состав ААУ, при наблюдении звезд в северном β_0 и в южном β_{180} направлениях;
- значение составляющей уклонения отвесной линии в плоскости первого вертикала $\eta_{опор.}$, снятое с карты или рассчитанное другим методом (например, гравиметрическим [4]).

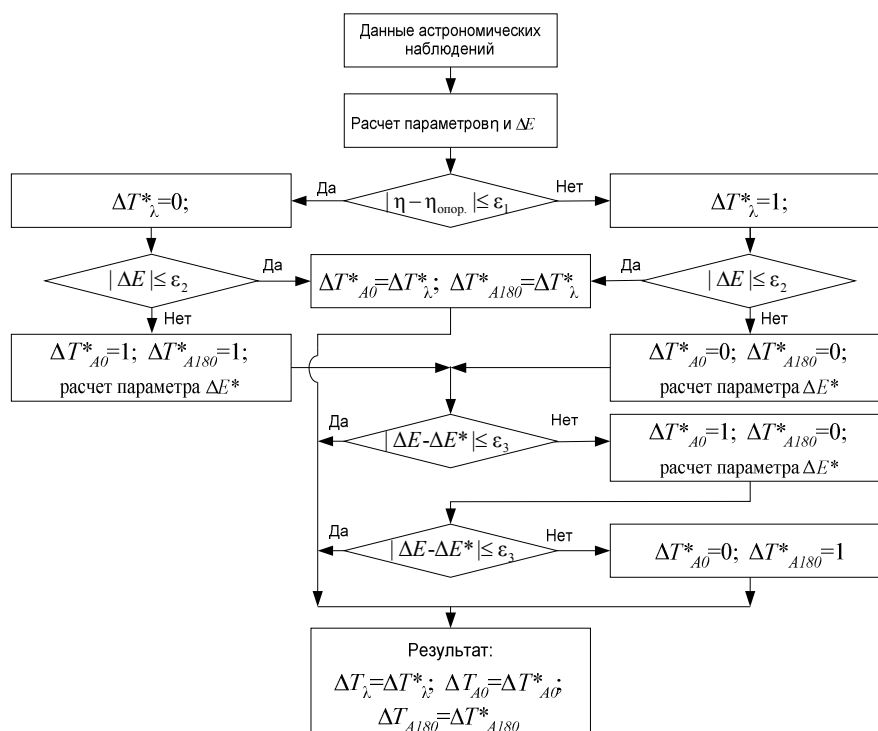


Рис. 1. Блок-схема выполнения алгоритма

Значение составляющей уклонения отвесной линии в плоскости первого вертикала η рассчитывается по формуле

$$\eta = (\lambda_{\text{изм.}} - L) \cos \varphi_{\text{изм.}} \quad (3)$$

Параметр ΔE рассчитывается по данным астрономических наблюдений по формуле

$$\Delta E = (A_{180} - A_0) - (\beta_{180} - \beta_0). \quad (4)$$

В процессе работы алгоритма в зависимости от выполненных условий формируются прогнозные значения погрешностей ΔT^*_{λ} , $\Delta T^*_{A_0}$ и $\Delta T^*_{A_{180}}$, на основе которых вычисляются расчетные значения погрешностей определения азимута в северном ΔA_0 и южном ΔA_{180} направлениях в соответствии с выражением (2), после чего рассчитывается параметр ΔE^*

$$\Delta E^* = \Delta A_{180} - \Delta A_0. \quad (5)$$

Значения параметров $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ рассчитываются по формулам, получаемым при дифференцировании выражений (3) – (5) и подстановкой в них известных значений погрешностей определения используемых данных астрономических наблюдений (с вероятностью $P=0,95$):

$$\varepsilon_1 = 2\sqrt{(\sigma_{\eta}^2 + \sigma_{\eta_{\text{опор.}}}^2)}; \quad \varepsilon_2 = 2\sigma_{\Delta E}; \quad \varepsilon_3 = 2\sqrt{(\sigma_{\Delta E}^2 + \sigma_{\Delta E^*}^2)}, \quad (6)$$

Здесь $\sigma_{\eta_{\text{опор.}}}$ и σ_{η} – среднеквадратические погрешности (СКП) определения значений составляющих уклонения отвесной линии опорной $\eta_{\text{опор.}}$ и рассчитанной η в соответствии с (3); $\sigma_{\Delta E}$ – СКП определения параметров ΔE и ΔE^* в соответствии с (4) и (5). СКП σ_{η} определения значения составляющей уклонения отвесной линии η вычисляется по формуле

$$\sigma_{\eta} = \sqrt{(\sigma_{\lambda}^2 + \sigma_L^2) \cos^2 \varphi + \sigma_{\varphi}^2 (\lambda_{\text{изм.}} - L)^2 \sin^2 \varphi_{\text{изм.}}}, \quad (7)$$

где σ_{φ} , σ_{λ} , σ_L – СКП определения астрономических широты φ , долготы λ и геодезической долготы L , соответственно.

СКП $\sigma_{\Delta E}$ определения параметра ΔE вычисляется по формуле

$$\sigma_{\Delta E} = \sqrt{2(\sigma_A^2 + \sigma_{\beta}^2)}, \quad (8)$$

где σ_A , σ_{β} – СКП определения астрономических азимутов визирной оси A_0 , A_{180} и показаний датчика угла азимутального привода β_0 , β_{180} , соответственно.

СКП $\sigma_{\Delta E^*}$ определения параметра ΔE^* определяется в соответствии с формулами

$$\sigma_{\Delta E^*} = \sqrt{\sigma_{\Delta A_0}^2 + \sigma_{\Delta A_{180}}^2}, \quad (9)$$

$$\sigma_{\Delta A_0} = \frac{\omega(\Delta T^*_{A_0} - \Delta T^*_{\lambda}) \cos q_0}{\cos^2 h_0} \sqrt{\sigma_{\delta}^2 \sin^2 \delta_0 \cos^2 h_0 + \sigma_h^2 \sin^2 h_0 \cos^2 \delta_0}; \quad (10)$$

$$\sigma_{\Delta A_{180}} = \frac{\omega(\Delta T^*_{A_{180}} - \Delta T^*_{\lambda}) \cos q_{180}}{\cos^2 h_{180}} \sqrt{\sigma_{\delta}^2 \sin^2 \delta_{180} \cos^2 h_{180} + \sigma_h^2 \sin^2 h_{180} \cos^2 \delta_{180}},$$

где $\sigma_{\Delta A_0}$, $\sigma_{\Delta A_{180}}$ – СКП определения значений ΔA_0 , ΔA_{180} ; σ_{δ} , σ_h – СКП определения склонений δ_0 , δ_{180} точки, соответствующей пересечению визирной осью ААУ небесной сферы; σ_h – СКП определения высот h_0 , h_{180} визирной оси.

После определения погрешностей привязки ΔT_{λ} , ΔT_{A_0} , $\Delta T_{A_{180}}$ они должны быть учтены в данных астрономических наблюдений при их повторной обработке.

Заключение. Представлен алгоритм определения погрешностей привязки данных астрономических наблюдений автоматизированного астрономического универсала к шкале всемирного времени UTC.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тарасов С.М.** Исследование влияния инструментальной погрешности автоматизированного астроуниверсала в задаче определения азимута наземного ориентира // Гироскопия и навигация. Том 29. №2 (113), 2021. С. 97-109.
2. **Гайворонский, С. В.** Исследование влияния синхронизации данных автоматизированного зенитного телескопа на точность определения астрономических координат / С.В. Гайворонский, Н.В. Кузьмина, В.В. Цодокова // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2018. – № 44. – С. 33-38.
3. **Брумберг В.А., Глебова Н.И., Лукашова М.В. и др.** Расширенное объяснение к «Астрономическому ежегоднику» // Труды ИПА РАН. СПб., 2004. – Вып. 10. – 488 с.
4. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / **В.Г. Пешехонов, О.А. Степанов, Л.И. Августов [и др.]**; Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики. Под общей ред. В.Г. Пешехонова; науч. редактор О.А. Степанов. – Санкт-Петербург: «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2017. – 390 с. – ISBN 978-5-91995-049-3.
5. **Гайворонский, С.В.** Автоматизированный зенитный телескоп для решения астрономо-геодезических задач / С.В. Гайворонский, Н.В. Кузьмина, В.В. Цодокова // Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение: Доклады научно-технической конференции, Менделеево, 14–15 февраля 2017 года. – Менделеево: Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений», 2017. – С. 197-205.
6. Automated Zenith Telescope for Obtaining the Earth's Gravitational Field Parameters / **S. Gaivoronskii, N. Kuzmina, V. Tsodokova, L. Starosel'tsev** // Proceedings of the 4th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM 2016), Saint Petersburg, 12–15 апреля 2016 года / Editor-in-Chief Academician of the Russian Academy of Sciences Vladimir G. Peshkhonov. – Saint Petersburg: Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2016. – P. 250-258.
7. **Блажко С.Н.** Курс практической астрономии.//М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979,с.393-408.
8. **Тарасов, С.М.** Сравнительный анализ алгоритмов калибровки датчика угла азимутального привода астрономического универсала по наблюдениям звезд / С.М. Тарасов, В.В. Цодокова // Навигация и управление движением: Материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 15–18 марта 2022 года. – Санкт-Петербург: «Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор», 2022. – С. 276-280.

S.M. Tarasov (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg). **The algorithm for determining errors in linking automated astronomical device data to the UTC timescale**

Abstract. The algorithm for determining errors in linking astronomical observation data of automated astronomical device to the UTC timescale by obtaining astronomical longitudes in circumzenithal area and azimuths near the meridian plane in the north and south directions is proposed.

УДК 681.58

А. Н. ДЗЮБА

(АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», Санкт-Петербург)

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВ ОРИЕНТАЦИИ ВИЗИРНОЙ ОСИ АСТРОКОРРЕКТОРА НА КАЧКЕ

Исследуется алгоритм определения углов ориентации (курсового угла, высоты и угла наклона) визирной оси астрокорректора в условиях морской качки при проведении астрокоррекции. Алгоритм разработан с учетом кинематической схемы астрокорректора. Для оценки эффективности алгоритма приводятся результаты моделирования погрешностей определения углов ориентации.

Введение. Решение задачи астрокоррекции является резервным источником информации о точном местоположении судна в условиях отсутствия сигналов спутниковых навигационных систем. При решении задачи астрокоррекции по изображению звездного неба, формируемого телевизионной аппаратурой астрокорректора, непрерывно определяются экваториальные координаты визирной оси (ВО) в двух диаметрально противоположных азимутальных положениях, и на основании полученной информации рассчитываются астрономические координаты судна [1]. Для решения задачи астрокоррекции необходимо знать:

- 1) ориентировочные координаты объекта и курс судна;
- 2) координаты центров видимых звезд на изображении, сформированном телевизионной аппаратурой астрокорректора с привязкой ко времени, а также экваториальные координаты видимых звезд из астрономического каталога [1];
- 3) углы ориентации ВО астрокорректора в горизонтальной системе координат (ГСК) – курсовой угол, высоту и угол наклона.

Условием проведения астрокоррекции является отсутствие линейной скорости движения объекта, допускается медленный дрейф судна. При этом ВО астрокорректора должна непрерывно стабилизироваться относительно заданных в ГСК высоты и курсового угла для обеспечения стабильной обсервации требуемого участка звездного неба в условиях низкодинамичной морской качки. В настоящей работе предлагается алгоритм определения углов ориентации ВО астрокорректора, учитывающий его кинематическую схему, по показаниям волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), акселерометров (АК) и датчиков угла (ДУ), входящих в состав астрокорректора. Представлены результаты моделирования погрешностей определения углов ориентации.

Кинематическая схема астрокорректора. Астрокорректор состоит из визирной призмы, установленной на приводе высотного наведения, который наклоняется на угол h . Привод высотного наведения размещен на внутреннем приводе азимутального наведения, который поворачивается на угол q . Визирная призма задает ориентацию ВО астрокорректора. Помимо визирной призмы на приводах астрокорректора установлены ВОГ и АК. Взаимная ориентация ВО, а также измерительных осей ВОГ и АК относительно судовой системы координат (ССК), представлена на рисунке 1, на котором: XYZ – оси ССК; X_1Y_1Z – система координат, связанная с приводом q , на котором установлены поперечный АК и продольный ВОГ; X_2Y_2Z – система координат, связанная с приводом Δq , на котором установлены продольный АК и поперечный ВОГ, а также вертикальные ВОГ и АК; $X_{BO}Y_{BO}Z_{BO}$ – система координат, связанная с визирной призмой.

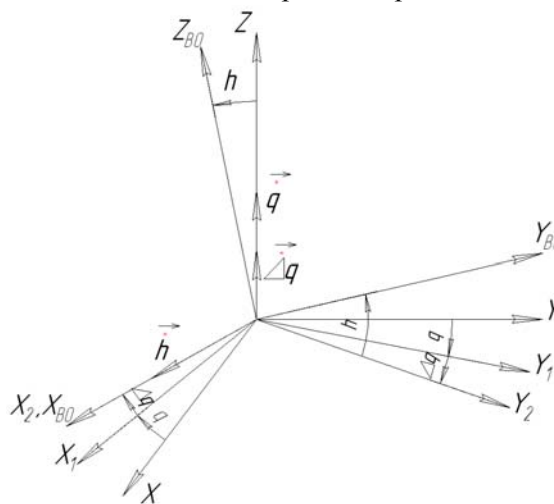


Рис. 1. Взаимная ориентация ВО, ВОГ и акселерометров относительно ССК

Описание алгоритма определения ориентации визирной оси. Для определения углов ориентации ВО по показаниям ВОГ и АК рассчитываются углы дифферента (ψ) и крена (θ) судна в ССК, после чего по формулам, представленным в [2] с использованием измерений ДУ приводов Δq , q , h и рассчитанным углам ψ и θ определяются курсовой угол, высота и угол наклона ВО астрокорректора. При этом Δq – показания ДУ внутреннего азимутального привода, q – показания ДУ внешнего азимутального привода, h – показания ДУ привода высотного наведения.

Углы ψ и θ рассчитываются по алгоритму аналитической гировертикали [3], входными данными для которого являются показания ВОГ ($\omega_{X_2}, \omega_{Y_1}, \omega_Z$), АК (a_{X_1}, a_{Y_2}, a_Z) и измерения ДУ $\Delta q, q, h$.

Блок-схема алгоритма представлена на рисунке 2. Пересчет показаний ВОГ в ССК осуществляется на основании соотношения:

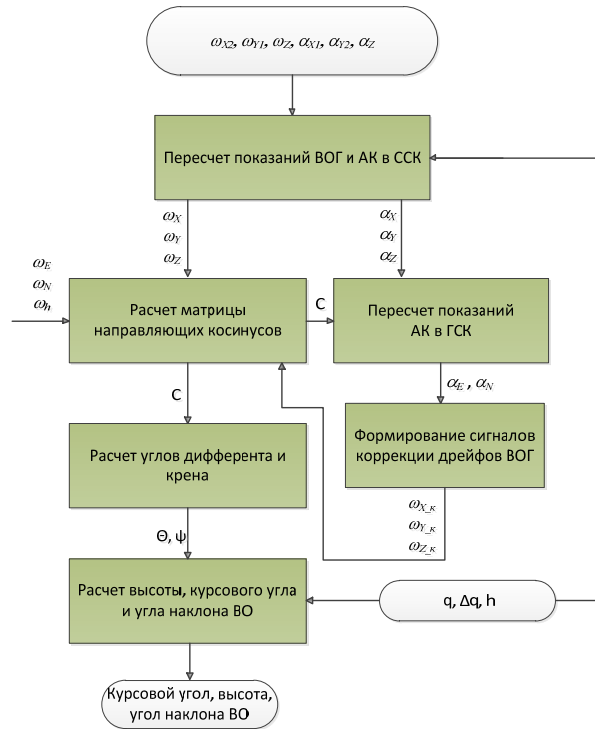


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма

$$\begin{bmatrix} \omega_X \\ \omega_Y \\ \omega_Z \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \cos(\Delta q) & -\sin(\Delta q) & 0 \\ \sin(\Delta q) & \cos(\Delta q) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^T \cdot \begin{bmatrix} \omega_{X_2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{Y_1} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_Z \end{bmatrix},$$

а пересчет показаний АК в ССК:

$$\begin{bmatrix} a_X \\ a_Y \\ a_Z \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \cos(\Delta q) & -\sin(\Delta q) & 0 \\ \sin(\Delta q) & \cos(\Delta q) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \right)^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ a_{Y_2} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(q) & -\sin(q) & 0 \\ \sin(q) & \cos(q) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} a_{X_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_Z \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Расчет матрицы направляющих косинусов C перехода из ССК в ГСК производится путем интегрирования уравнения Пуассона [3]:

$$\dot{C} = C \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\omega_Z & \omega_Y \\ \omega_Z & 0 & -\omega_X \\ -\omega_Y & \omega_X & 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -\omega_h & \omega_N \\ \omega_h & 0 & -\omega_E \\ -\omega_N & \omega_E & 0 \end{bmatrix} \cdot C, \quad (3)$$

где ω_{ENh} – проекции угловой скорости вращения Земли на оси ГСК, которые рассчитываются на основе знания широты объекта. Определение углов ψ и θ осуществляется из коэффициентов

матрицы C , а расчет высоты, курсового угла и угла наклона ВО – в соответствии с формулами [2]. Формирование сигналов коррекции дрейфов ВОГ ω_{X_k} , ω_{Y_k} , ω_{Z_k} производится на основании алгоритма, представленного в [4] с привлечением сигналов АК (a_E, a_N), рассчитанных в ГСК:

$$\begin{bmatrix} \omega_{X_k} \\ \omega_{Y_k} \\ \omega_{Z_k} \end{bmatrix} = C^T \cdot \frac{2Ts + 1}{gT^3s^2 + 2gT^2s} \cdot \begin{bmatrix} a_E \\ a_N \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

где T – постоянная времени построения аналитической вертикали; g – ускорение силы тяжести; C^T – матрица перехода из ГСК в ССК.

Результаты моделирования погрешностей. При моделировании имитировалась морская качка судна (углы θ, ψ, γ) в виде марковского процесса второго порядка [5], случайные погрешности ВОГ и АК в виде суммы марковского процесса первого порядка и белого шума заданной интенсивности, случайные погрешности ДУ приводов высотного и вертикального наведения в виде суммы случайной константы и белого шума заданной интенсивности (представлены в таблице 1). Результаты моделирования среднеквадратической погрешности (СКП) определения углов ориентации ВО астрокорректора в ГСК за время проведения астрокоррекции приведены на рисунке 3 для одной реализации, а оценка СКП по 20 реализациям – в таблице 2. Частота опроса показаний всех датчиков при моделировании составляла 20 Гц.

Таблица 1

Погрешности датчиков астрокорректора

Датчик	Составляющая случайной погрешности	Значение
ВОГ	Угловой случайный дрейф	$0.1 \text{ } ^\circ / \sqrt{\text{час}}$
	Стабильность скорости дрейфа	$10 \text{ } ^\circ / \text{час}$
АК	Дрейф нулевого сигнала за 10 минут (макс.)	$5 \cdot 10^{-6} \text{ g}$
ДУ Δq	Погрешность преобразования угла (макс.)	$\pm 15''$
ДУ q		$\pm 10''$
ДУ h		$\pm 20''$

При этом имитировалась разные условия измерений: отсутствие качки, слабоинтенсивная качка, среднеинтенсивная качка и сильноинтенсивная качка с параметрами, представленными в таблице 2. Средние периоды качки: θ и ψ – 9 с, γ – 20 с. Погрешности определения ориентации ВО также представлены в таблице 2.

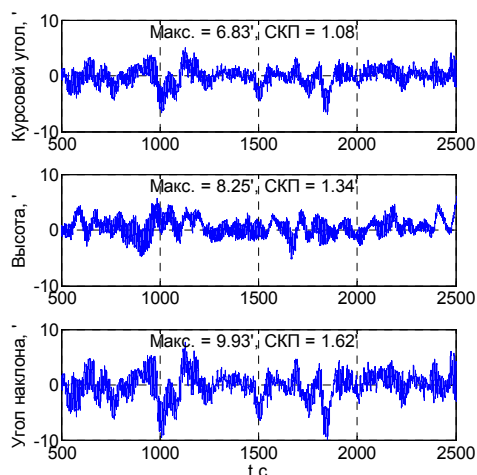


Рисунок 3 – Погрешности определения углов ориентации ВО астрокорректора в ГСК на среднеинтенсивной качке.

Результаты моделирования погрешностей

Условие измерений	Характеристика условия измерений	СКП
Отсутствие качки	–	0.3'...0.5'
Слабоинтенсивная качка	$\theta = \pm 1^\circ, \psi = \pm 0.7^\circ, \gamma = \pm 0.6^\circ$	0.4'...0.6'
Среднеинтенсивная качка	$\theta = \pm 5^\circ, \psi = \pm 3.5^\circ, \gamma = \pm 3^\circ$	1.0'...1.7'
Сильноинтенсивная качка	$\theta = \pm 10^\circ, \psi = \pm 7^\circ, \gamma = \pm 6^\circ$	2.8'...4.9'

Заключение. Предложен алгоритм определения углов ориентации ВО, использующий показания ВОГ, АК и измерения ДУ астрокорректора и учитывающий его кинематическую схему. Проведено моделирование погрешностей определения углов ориентации с использованием предложенного алгоритма, которое показало, что СКП определения углов ориентации ВО за время, необходимое для проведения астрокоррекции, не превышает 0.5' в условиях отсутствия морской качки и 5' в условиях сильноинтенсивной морской качки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цодокова В.В., Гайворонский С.В., Тарасов С.М., Русин Е.В. Определение астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом // XVI конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 269-276.
2. Ривкин С. С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. Москва, 1978, 320 с.
3. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: Электроприбор, 2009, 280 с.
4. Грязин Д.Г., Старосельцев Л.П., Белова О.О., Дзюба А.Н. Инерциальный измерительный модуль волномерного буя. Результаты разработки и испытаний // Гироскопия и навигация. – 2016. №1 (92). – С. 88-99.
5. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.2. Введение в теорию фильтрации. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012, 417 с.

A.N. Dziuba (CSRI Elektropribor, Saint-Petersburg). **Algorithm for determining the orientation angles of the astrocorrector's sight line in sea condition.**

Abstract. An algorithm for determining the orientation angles (heading angle, height and angle of inclination) of the astrocorrector's sight line in sea conditions is proposed. The results of modeling errors of determining the orientation angles in the horizontal coordinate system using the proposed algorithm are presented.

А. А. МУРАВИЦКИЙ, С. А. ЗАХАРОВ

(Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова,
Санкт-Петербург)**СОДЕРЖАНИЕ ПОНЯТИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
НАВИГАЦИОННОГО ПРИБОРА ФОТОСЕКСТАНА**

Обсуждается понятие калибровочных характеристик фотосистемы. Описана математическая модель для учета аберраций фотосистемы. Разработана принципиальная схема стенда, для сбора экспериментальных данных, главным элементом которого является мишень в виде прямоугольной сетки чёрных кружков на белом фоне.

Введение. Фотосекстан – навигационный прибор, принцип работы которого основывается на способе измерения высоты светила путём численной обработки цифрового фотоснимка линии горизонта и части небосвода с навигационными звездами и подробно описан в работах [1, 2]. Вследствие преломления световых лучей в оптической системе изображение небосвода и светил на нем содержит искажения, называемые аберрациями, которые необходимо учитывать для получения корректных измерений. В настоящей работе предложена математическая модель учета аберрационных искажений, описан стенд, программа и методики эксперимента и изложен алгоритм первичной обработки экспериментальных данных.

Понятие калибровочных характеристик. Аберрации (от лат. Aberratio – уклонение) – систематические погрешности изображений, формируемых оптическими системами. Аберрации приводят к нарушению геометрического подобия между объектом и его изображением и к отображению точки пространства в виде фигуры рассеяния. Для борьбы с аберрациями применяется калибровка фотосистемы, которая заключается в выборе математической модели и расчёта ее параметров. Математическая модель выражает функциональную взаимосвязь между угловыми координатами произвольной точки пространства и пиксельными координатами её изображения на матрице фотоаппарата в пиксельных координатах с субпиксельной точностью. Калибровочные характеристики (КХ) – это коэффициенты математической модели.

Взаимосвязь угловых и пиксельных координат. Положение произвольной точки пространства задается в правой системе декартовых прямоугольных координат (x, y, z) (Рис.1). Ось x направлена по главной оптической оси объектива к объекту съемки, ось y направлена вверх, ось z дополняет до правой тройки.

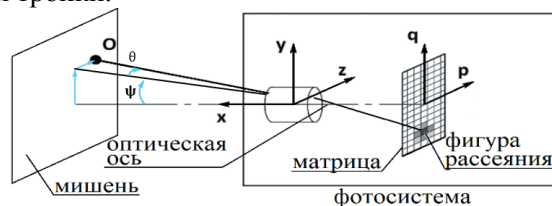


Рис.1. Системы координат, применяемые для расчёта калибровочных характеристик.

Для построения модели аберрационных искажений необходимо перейти к угловым координатам ψ , θ (рис.1):

$$\left\{ \theta = -\arctg\left(\frac{y}{x}\right) \quad \psi = \arctg\left(\frac{z \cos \theta}{x}\right), \quad \{y = -xtg\theta \quad z = \frac{xtg\psi}{\cos \theta} \right. \quad (1)$$

Положение изображения произвольной точки пространства на цифровой фотографии характеризуется вещественными пиксельными координатами (p, q).

Математическая модель учета аберраций. В настоящей работе КХ выражаются коэффициентами следующих многочленов:

$$\begin{aligned}
 p(\psi, \theta) &= \sum_{u=0}^U \sum_{v=0}^V c_{uv} \psi^u \theta^v, & q(\psi, \theta) &= \sum_{u=0}^U \sum_{v=0}^V d_{uv} \psi^u \theta^v, \\
 \psi(p, q) &= \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N e_{mn} p^m q^n, & \theta(p, q) &= \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N f_{mn} p^m q^n.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Здесь коэффициенты $c_{uv}, d_{uv}, e_{mn}, f_{mn}$ образуют прямоугольные матрицы; их размерности выбраны равными $U = V = M = N = 6$. Более подробно способ учёта aberrаций фотосистемы описан в работе [3].

Способ определения калибровочных характеристик. Исходные данные для расчёта КХ по формулам (1) и (2) представляют собой два множества: декартовых координат точечных объектов и пиксельных координат центров их изображений. Для получения этих множеств необходимо провести эксперимент, методика проведения которого включает следующие этапы:

- 1) Создание мишени с точно заданными координатами точек (y, z) ,
- 2) Сборка стенда, обеспечивающего жёсткую фиксацию фотосистемы и мишени;
- 3) Обеспечение мишени подсветкой;
- 4) Проведение серии снимков мишени на различных расстояниях (x) ;
- 5) Обработка полученных данных с применением специального программного обеспечения.

На основе статьи [5] разработана мишень в виде прямоугольной сетки чёрных точек на белом фоне. Экспериментальная установка представлена на рис.2. В состав экспериментального стенда входят фотосистема 1 на жестком основании 2, переносимый регулируемый планшет 3 с закреплённой на нем мишенью, кольцевая система освещения 4, платформа 5 с возможностью фиксации фотосистемы и мишени.

Принципиальная схема экспериментального стенда.

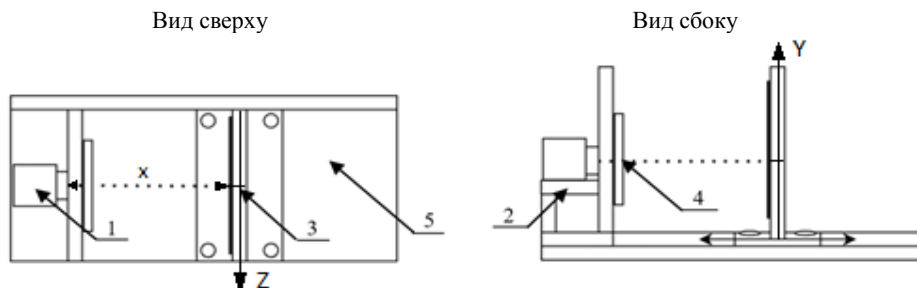


Рис.1. Схема экспериментального стенда

Эксперимент проводился по следующей программе:

- установить планшет с мишенью на расстоянии X_{\min} от объектива;
- произвести съемку мишени, выполнив серию из пяти фотоснимков;
- переместить планшет на расстояние $X_{\min} + 5, +10 \dots +40$ см и повторить съемку.

При этом применялись следующие методические принципы:

- на расстоянии X_{\min} точки мишени должны заполнять все поле кадра;
- система освещения мишени включалась на максимально возможную яркость;
- мишень имела гладкую и ровную поверхность;
- фотосистема была жёстко закреплена на основании, которое имеет вертикальную базовую плоскость, перпендикулярную к оптической оси объектива;
- плоскость планшета выставлялась перпендикулярно к оптической оси фотосистемы, с помощью средств точной регулировки наклона планшета к осям Y, Z .

Первичная обработка полученных изображений мишеней содержала следующие этапы:

- 1) Сглаживание случайных местных колебаний яркостей пикселей.
- 2) Сегментация изображений – выделение тёмных изображений точек на светлом фоне.
- 3) Расчёт параметров каждого изображения точки: пиксельных координат его центра (р, q), среднего радиуса точки, полуосей эллипса изображения и угла его поворота;
- 4) Вывод параметров изображений точек в файл и их контрольная отрисовка на изображении.

Результатом первичной обработки каждого изображения мишени является таблица пиксельных координат центров изображений точек и других параметров, перечисленных выше. Алгоритм первичной обработки реализован в программном обеспечении на языке Visual Basic.

Заключение. В работе описана математическая модель для учета аберраций фотосистемы, разработана принципиальная схема стенда, для сбора экспериментальных данных. Главным элементом стенда является мишень в виде прямоугольной сетки чёрных кружков на белом фоне. Геометрические параметры кружков точно известны. Эксперимент основан на установке мишени на различных расстояниях от фотоаппарата и её многократной съёмке в каждом положении. Полученные цифровые фотографии обрабатываются с использованием специального программного обеспечения. В работе описан первый этап первичной обработки экспериментальных данных. Ведётся разработка указанного программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Козик С.В., Сибилев В.А., Золотов В.Д. Измерение высоты навигационного светила по фотографии небосвода // Научные труды азербайджанской государственной морской академии. 2020. № 2. С. 95—100.
2. Козик С.В., Захаров С.А., Сибилев В.А. Способ измерения высоты светила по цифровой фотографии небосвода // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 5. С. 412—421. doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-412-421.
3. Козик С.В., Захаров С.А., Сибилев В.А. Концепция экспериментального способа калибровки фотосекстана // Гидрометеорология и Экология. 2021. Т. 64, № 5. С. 575—591 doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-575-591.
4. Maxwell Servicea, Jessica R. Lub, Mark Chuna, Ryuji Suzukic, Matthias Schoeckd, Jenny Atwoode, David Andersene, Glen Herriote, Geometric Distortion Calibration with Photo-lithographic Pinhole Masks for High-Precision Astrometry, Canada, 2019. 20 с.
5. Klaus H. Strobl and Gerd Hirzinger, More Accurate Pinhole Camera Calibration with Imperfect Planar Target, IEEE International Conference on Computer Vision Workshops, German, 2011. 8 с.

A. A. Muravitskiy, S. A. Zaharov (The Admiral Makarov State University of Marine and Inland Shipping, Saint Petersburg)
The concept of calibration characteristics of a photosexian navigation device

Abstract. The concept of calibration characteristics of a photo-system is discussed. A mathematical model for calculating photo-system aberrations is described. A schematic diagram of a stand for collecting experimental data has been developed, the main element of which is a target in form of rectangular grid of black dots on the white background.

УДК 520.6.05

М. А. САМАДОВ, П. Н. НИКОЛАЕВ

(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗВЁЗДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОГО ЗВЁЗДНОГО ДАТЧИКА

В работе предлагается алгоритм идентификации звездных образований, который заключается в выборе пяти ярких звезд полученного изображения звездного датчика и расчёте угловых расстояний между этими звездами. Оценка ориентации осуществляется с помощью алгоритма QuEst. Разработанный алгоритм может быть реализован на микроконтроллере звездного датчика. Было проведено моделирование разработанного алгоритма в среде MATLAB.

Введение. Для проведения различных экспериментов и исследований в космосе всё большую актуальность приобретает использование малых спутников и космических аппаратов нанокласса с применением точных датчиков для определения оценки ориентации. При создании нового звездного датчика (ЗД) всегда имеется необходимость на начальных этапах его проектирования рассматривать различные варианты исполнения, оценивать его параметры [1–2]. С этой целью используются: математическое моделирование, полунатурное моделирование [3], макетирование и др.

Процесс создания ЗД можно разделить на три этапа. На первом этапе решаются задачи подбора оптической системы - размеры объектива камеры ЗД не должны превышать одного юнита наноспутника (НС), поле зрения которой составляет порядка 40 градусов. На втором этапе выбирается детектор, требования к которому обусловлены значением максимальной звездной величины, которую сможет уловить ЗД. На третьем этапе осуществляется проектирование блока электроники – определяются основные характеристики ЗД по электропитанию, точности, скорости обработки и т. д.

В данной работе предлагается алгоритм идентификации звездных образований (рис.1), который является частью третьего этапа разработки ЗД и реализуется на микроконтроллере блока электроники.

Алгоритм идентификации звезд. Оптическая система ЗД получает изображение звездного неба, которое фильтруется от шумов и подаётся в блок звездного идентификатора.



Рис. 1. Алгоритм идентификации звездных образований

Алгоритм звездного идентификатора состоит из следующих шагов:

1. Выбираются пять самых ярких объектов изображения, вычисляются угловые расстояния от самого яркого объекта из пятёрки до оставшихся четырёх;
2. Рассчитанные значения фиксируются в список оцененных угловых расстояний пар звёзд;
3. Пары из полученного списка, сравниваются с угловыми расстояниями пар звёзд в звездном каталоге;
4. Для найденных пар определяются координаты звёзд из звездного каталога;
5. Осуществляется переход координат звёзд найденных пар из сферической системы координат в инерциальную декартовую систему координат и координат, рассчитанных по изображению из сферической системы координат в связанную декартовую систему координат.
6. На основе полученных пяти векторов в инерциальной декартовой системе координат и пяти векторов в связанной декартовой системе координат производится оценка текущей ориентации наноспутника по алгоритму QuEst [4–5].

Для оценки точностных характеристик алгоритма была задана ориентация наноспутника в абсолютном пространстве, представленная в форме углов Тейта-Брайана $\alpha=0^\circ$, $\varphi=50^\circ$, $\lambda=190^\circ$. На рисунке 2 представлена иллюстрация алгоритма на примере пары звёзд $n=1195$.

Оцененные углы ориентации составляют $\alpha=0,0015^\circ$, $\varphi=49,9655^\circ$, $\lambda=189,9888^\circ$. Нормированная погрешность оценки ориентации составляет порядка $0,04^\circ$.

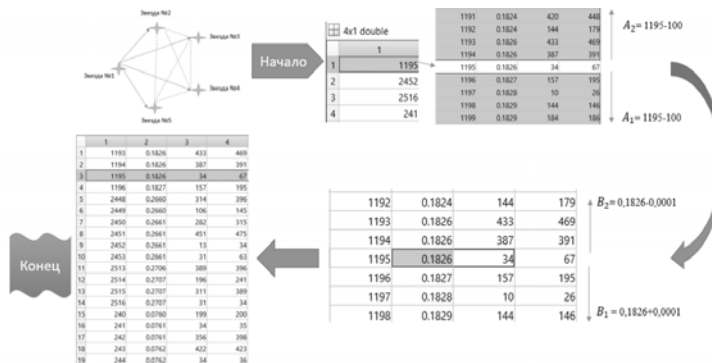


Рис. 2. Иллюстрация шагов 1–3 алгоритма идентификации звёзд на примере пары звёзд $n=1195$

Заключение. В работе был описан алгоритм идентификации звездных образований для малогабаритного звездного датчика, с помощью которого наноспутник может с точностью порядка $0,04^\circ$ оценить свою ориентацию. Данный алгоритм может быть реализован на микроконтроллере звездного датчика и удовлетворяет требования по точности для классов CubeSat.

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прохоров М.Е., Захаров А.И., Миронов А.В., Николаев Ф.Н., Тичин М.С. Современные датчики и звездной ориентации // Труды 38-й Международной студенческой научной конференции. Екатеринбург. Уральский университет. – 2009. – С. 170–186.
2. Аванесова Г.А. Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов [Текст] // М.: – 2019. 400 с.
3. Дегтярёв А.А., Ткачёв С.С., Мыльников Д.А. Лабораторный стенд для отработки макета звездного датчика ориентации малых спутников // М.: Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. – 2010. 32 с.
4. Yaguang Yang, Spacecraft Modeling, Attitude Determination, and Control: Quaternion-Based Approach, CRC Press Taylor & Francis Group. 2019, 340 p.
5. Shuster, M. D., Oh, S.D., Three-Axis Attitude Determination from Vector Observations, *Journal of Guidance and Control*, Vol. 4, № 1, 1981, pp. 70–77

M.A.Samadov, P.N.Nikolaev (Samara National Research University, Samara). **Development of an Algorithm for Identification of Star Formations for a Small-size Star Sensor**

Abstract. The paper proposes an algorithm for identifying stellar formations, which consists in choosing five brightest stars in the acquired by star tracker image and calculating the angular distances between these stars. Orientation estimation is carried out using the QuEst algorithm. The developed algorithm can be implemented on the microcontroller of the star sensor. The simulation of the developed algorithm was carried out in the MATLAB environment.

УДК 531.5

С.А. ТИМОЧКИН, А.В. БЕЗДЕТКО
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)**АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ УКЛОНЕНИЯ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ
ИНЕРЦИАЛЬНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Рассматриваются описываемые в российских и зарубежных публикациях подходы, применяемые при решении задачи определения уклонения отвесной линии инерциально-геодезическим методом на подвижном основании.

Введение. Для осуществления высокоточной инерциальной навигации подвижных объектов необходимо иметь достоверную информацию об уклонении отвесной линии (УОЛ), поскольку при её отсутствии возникает методическая погрешность инерциальной навигационной системы (ИНС), так как вырабатываемые ею астрономические координаты места отличаются от геодезических координат, которые характеризуют местоположение подвижного объекта.

В настоящее время выделяют четыре метода определения УОЛ: гравиметрический, градиентометрический, астрономо-геодезический и инерциально-геодезический [1].

В инерциально-геодезическом методе используются навигационные параметры и параметры угловой ориентации, выработанные ИНС. Эти параметры связаны с истинной вертикалью. Соответственно, их можно использовать в качестве источника информации об УОЛ, путем сравнения с параметрами, выработанными относительно геодезической вертикали [2, 3].

В работе рассматриваются известные подходы к реализации инерциально-геодезического метода, базирующегося на совместной обработке данных ИНС и приёмной аппаратуры (ПА) спутниковых навигационных систем (СНС), с целью оценки УОЛ на фоне инструментальных погрешностей ИНС.

Подход с формированием позиционных измерений. Этот подход получения значений УОЛ заключается в совместной обработке позиционных измерений, полученных от ИНС и ПА СНС. Инерциально-геодезический метод, основанный на обработке таких измерений, подробно описан в [4]. Согласно [5], где этот подход называется традиционным, получение информации об УОЛ можно разделить на три основных этапа.

На первом этапе решается задача инерциальной навигации для получения на выходе значений координат, привязанных к истинной вертикали. Вторым этапом является обработка измерений полученных ПА СНС, для нахождения геодезических координат [5]. На последнем этапе происходит оценка погрешностей ИНС и составляющих УОЛ с помощью фильтра Калмана (ФК). При использовании доступных глобальных карт аномалий гравитационного поля Земли (ГПЗ) в ФК также возможно разделение погрешностей ИНС, обусловленных погрешностями построения инерциального трёхгранника, и длиннопериодических составляющих УОЛ.

Поскольку значения радиуса кривизны референц-эллипсоида, используемого в контуре построителя вертикали ИНС, отличаются от местного радиуса кривизны геоида, появляется методическая погрешность построения истинной вертикали ИНС, пропорциональная пространственному градиенту УОЛ и скорости движения, которая, однако, пренебрежимо мала при скоростях движения морских объектов [6].

Подход с формированием измерений по ускорениям. В качестве альтернативного способа получения значений УОЛ можно обозначить подход, использующий измерения, формируемые как разности: кажущихся ускорений, измеренных акселерометрами и преобразованных в инерциальную систему координат (ИСК) с использованием вырабатываемых ИНС параметров ориентации, и одноимённых составляющих кинематических ускорений в ИСК, полученных дифференцированием данных ПА СНС [7, 8, 9].

Координаты, полученные от СНС, дважды численно дифференцируются, полученные ускорения сглаживаются для уменьшения высокочастотных шумов. Для обработки измерений применяется фильтр Калмана, использующий модель погрешностей ИНС и глобальные карты ГПЗ

для устранения смещений нуля акселерометров и длиннопериодных составляющих УОЛ. Отфильтрованные значения дополнительно обрабатываются с помощью волнового корреляционного фильтра [5], который позволяет выделить повторяющиеся данные из нескольких полученных оценок УОЛ в пространственной области, для чего необходимо осуществить несколько проходов по исследуемой области [8].

Применение ZUPT-технологии (zero velocity up-date). Разновидностью подхода, реализуемого с помощью разностных измерений по ускорениям, является способ, в котором применяются ZUPT-коррекции.

Суть подхода заключается в следующем. При движении объекта происходит чередование промежутков времени, когда объект движется и находится в неподвижном состоянии. В те моменты, когда объект находится в неподвижном состоянии, производится оценивание погрешностей ИНС (дрейфов гироскопов) с опорой на информацию о нулевой скорости для их прогнозирования на время движения [10].

При этом в [4] было показано, что при использовании такого подхода на точность определения приращений УОЛ влияет только нестабильность смещения нуля акселерометров, тогда как погрешность их начальной калибровки не играет существенной роли.

Подход с использованием измерений по углам ориентации. Для оценивания короткопериодных составляющих УОЛ в [11] предлагается в качестве измерения использовать разность параметров ориентации выработанных ИНС и независимых от значений УОЛ параметров ориентации, рассчитанных по данным тех же гироскопов и координатам от ПА СНС, при формировании которых показания акселерометров не используются. В полученных измерениях содержится УОЛ, а также погрешности акселерометров и гироскопов.

Для получения результатов авторами подхода использовалась постобработка данных, полученных в результате нескольких проходов по исследуемой области, волновой корреляционный фильтр и глобальные модели УОЛ.

Подход с совместной обработкой позиционных и скоростных измерений и параметризацией гравитационного потенциала (подход МГУ). В [12, 13] показано применение модели аномалий силы тяжести не во времени, а в пространстве. Параметризация гравитационного потенциала реализуется на основе сферических базисных функций Абеля-Пуассона.

Этот подход включает в себя несколько основных этапов [13]. Сперва с помощью полученных первичных данных от ПА СНС и ИНС рассчитываются все возможные параметры движения: координаты, скорости, ускорения. После этого с помощью фильтра Калмана совместно оцениваются погрешности БИНС и параметры базисных функций, описывающих возмущающий гравитационный потенциал. На заключительном этапе происходит вычисление УОЛ [4, 12].

Заключение. В работе проведён обзор подходов к решению задачи определения составляющих УОЛ инерциально-геодезическим методом. Рассмотрены традиционный подход к вычислению параметров УОЛ, подходы с использованием измерений по ускорениям, по углам ориентации, а также описана вариация подхода при формировании измерений по ускорениям с использованием ZUPT-технологии и подход МГУ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Проблема уклонения отвесной линии в высокоточной инерциальной навигации. Гироскопия и навигация. Том 28. №4 (111). 2020. С. 3–15. DOI 10.17285/0869-7035.0046.
2. **Л.П.Несенюк, Л.П.Старосельцев, Л.Н.Бровко** Определение уклонений отвесных линий с помощью инерциальных навигационных систем. Памяти профессора Л.П. Несенюка. Избранные труды и воспоминания. – Санкт-Петербург. : Электроприбор, 2010. – 227 с.
3. **Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Розенцвейн В.Г., Краснов А.А., Соколов А.В.** Современное состояние разработок в области бесплатформенных инерциальных аэрогравиметров. Гироскопия и навигация. Том 30. №4 (119). 2022. С. 3–35. DOI 10.17285/0869-7035.00101.
4. **Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Августов Л.И., Блажнов Б.А., Болотин Ю.В., Вершовский А.К., Витушкин Л.Ф., Вязьмин В.С., Гайворонский С.В., Голован А.А., Евстифеев М.И., Емельянцева Г.И., Железняк Л.К., Конешов В.Н., Носов А.С. и др.** Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли. 2017. 390 с.
5. **Kwon J.H.** Airborne vector gravimetry using GPS/INS. 2000.

6. **Тимочкин С.А.** Методические погрешности построения астрономической вертикали в инерциальной навигационной системе, демпфируемой от измерителя скорости относительно Земли. Сборник работ XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2013.
7. **Jekeli C.** Vector gravimetry using GPS in free-fall and in an earth-fixed frame. 1992. Bull Geod 66, P. 54-61.
8. **Kwon JH, Jekeli C.** A new approach for airborne vector gravimetry using GPS/INS. 2001. Journal of Geodesy no. 74. P. 690-700.
9. **Jekeli C.** Inertial navigation systems with geodetic applications. 2000. Walter deGruyter, Berlin.
10. **Дмитриев С.П.** Инерциальные методы в инженерной геодезии. СПб: ГИЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1997. 208 с.
11. **Dongkai Dai, Xingshu Wang, Dejun Zhan, Shiqiao Qin, Zongsheng Huang.** Dynamic Measurement of High-frequency Deflections of the Vertical Based on the Observation of INS/GNSS Integration Attitude Error. Journal of Applied Geophysics. 2015. Vol. 119. P. 89-98. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.05.010.
12. **Вязьмин В.С., Голован А.А., Болотин Ю.В.** Новые алгоритмы бескарданной аэрогравиметрии: проверка на экспериментальных данных // Сб. материалов XXVIII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам (МКИНС2021). СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2021. С. 59-66.
13. **Вязьмин В.С., Голован А.А., Болотин Ю.В., Бровкин Г.И., Контарович О.Р.** Технологии и результаты обработки первичных данных бескарданного аэрогравиметра в площадных съемках с облетом рельефа на разных носителях // Материалы XXXIII конф. памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб. : АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. С. 157-160.

S.A. Timochkin (Concern CSRI Elektroprigor, St. Petersburg), A.V. Bezdetko (ITMO University, Concern CSRI Elektroprigor, St. Petersburg). **Analysis of approaches to determining the deviation of the vertical by the inertial-geodetic method.**

Abstract. The approaches described in Russian and foreign publications used in solving the problem of determining the deflection of the vertical by the inertial-geodetic method on a movable base are considered.

УДК 681.51

Н.Д. БОГДАНОВ, М.А. БЕЛОУСОВ

(ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания», г. Пермь)

МАЛОГАБАРИТНЫЙ БЛОК ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С НАСТРАИВАЕМОЙ СИСТЕМОЙ АМОРТИЗАЦИИ

В работе рассмотрены конструкция и принцип работы настраиваемой системы амортизации блока чувствительных элементов. Показаны результаты вибрационных испытаний габаритно-весового макета и системы амортизации в корпусе прибора.

Введение. В настоящее время прослеживается тенденция разработки узконаправленных инерциальных навигационных систем (ИНС) [1]. При конструировании новых приборов разработчики не всегда закладывают возможность унификации и масштабирования изделия, четко определяя его применяемость.

С целью использования одного серийного изделия на наземных, морских и авиационных объектах ПАО «ПНППК» разработан универсальный блок чувствительных элементов с настраиваемой системой амортизации. Возможность подстройки жесткостно-демпфирующих характеристик амортизации позволяет подобрать наиболее подходящую конфигурацию прибора под определенный объект без снижения точностных характеристик с сохранением малых габаритов изделия.

Настраиваемая система амортизации. Целью работы является разработка настраиваемой системы амортизации, которая за счет настройки резонансной частоты прибора обеспечивает применяемость ИНС в различных областях (наземное транспортное средство, морское судно, воздушный транспорт). Перед системой амортизации были поставлены принципиальные требования: технологичность, т.е. обеспечение простоты настройки системы, и функциональность – устойчивость к максимально возможному спектру внешних воздействующих факторов (ВВФ). Оба требования невозможно выполнить за счет использования статичных демпферов, удерживающих блок чувствительных элементов внутри корпуса. Однако эта задача становится осуществимой при введении подстройки жесткостно-демпфирующих характеристик виброизоляторов. Для этого была реализована настраиваемая система амортизации, вид в разрезе которой приведен на рисунке 1.

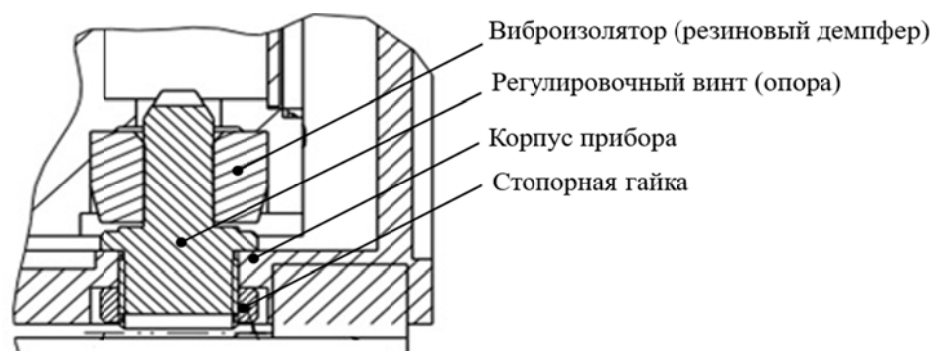


Рис. 1. Вид настраиваемой системы амортизации в разрезе

В данной системе амортизации натяжение виброизоляторов выполняется регулировочными винтами (опорами). Размерность натяжения обеспечивается динамометрической отверткой и подбирается в ходе регулировочной операции под заданный объект применения прибора с известной моделью ВВФ. Таким образом, достигается простота настройки, обеспечиваются равные жесткостно-демпфирующие характеристики всех осей виброизоляторов, минимизируется значение углового ускорения блока чувствительных элементов на резонансах амортизации и достигается необходимая резонансная частота для обеспечения виброустойчивости к различным режимам вибрации.

Результаты испытаний. Апробация блока чувствительных элементов с описанной системой амортизации проводилась в два этапа: на примере габаритно-весового макета для доказа-

тельности релевантности перспективной системы и в составе малогабаритной ИНС. В качестве внешнего воздействия использована синусоидальная вибрация с двойным проходом, амплитудой 1g и частотой 50-400-50 Гц.

Во время испытаний макета были использованы виброизоляторы одинаковой жесткости, величина момента натяга которых варьировалась с помощью опорных винтов, что изменяло жесткость демпферов, резонансную частоту и максимальные угловые колебания ГВМ. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытаний габаритно-весового макета с различным моментом натяга

	Моменты натяга, Нм					
	0,14	0,1	0,06	После повторной затяжки регулировочных винтов		
				0,1	0,06	0,04
Резонансная частота, Гц	125	100	75	140	105	85
Максимальная амплитуда угловых колебаний, %/с	10,1	11,5	16,1	8,3	6,7	9,1

Результаты испытаний ГВМ доказали релевантность конструкции, после чего были проведены испытания блока чувствительных элементов с настраиваемой системой амортизации в составе малогабаритной ИНС. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний блока чувствительных элементов в корпусе с различным моментом натяга

	Моменты натяга, Нм					
	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40
Резонансная частота, Гц	90	101	111	116	134	189
Максимальная амплитуда угловых колебаний, %/с	13	14,5	10	8	7	3,5

Таким образом, испытания блока чувствительных элементов в составе малогабаритной ИНС доказали эффективность настройки резонансной частоты и максимальной амплитуды угловых колебаний прибора с помощью подстройки жесткостно-демпфирующих характеристик, что делает возможным применение такого блока чувствительных элементов на объектах с различными моделями ВВФ.

Заключение. В данной работе рассмотрена конструкция настраиваемой системы амортизации блока чувствительных элементов, обеспечивающая применимость малогабаритной инерциальной навигационной системы с такой системой на объектах с различными моделями ВВФ. Приведены результаты вибрационных испытаний габаритно-весового макета и блока чувствительных элементов с настраиваемой системой амортизации в составе малогабаритной ИНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Подчерзев В.П. К обоснованию выбора параметров амортизации инерциальной системы ориентации / В.П. Подчерзев, С.В. Топильская // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. М, 2021 : Сер. Приборостроение № 3, С. 113-128;

N.D. Bogdanov, M.A. Belousov, (Perm Scientific-Industrial Instrument Making Company, Perm). **Universal small-sized inertial navigation system with adjustable shock absorption system**

Abstract. The paper considers the design and principle of operation of a configurable shock absorption system of a block of sensitive elements. The results of vibration tests of the dimensional and weight layout and the shock absorption system in the device housing are shown.

Е.Д. УСКОВ

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

РАЗРАБОТКА ТЕПЛО-МЕХАНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ

Рассматривается тепло-механическая модель инерциального измерительного модуля для цифрового двойника бесплатформенной инерциальной навигационной системы на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ). Анализируется нестабильность геометрических параметров модуля при изменении температуры, которая может приводить к смещению положения базовых поверхностей триады ВОГ.

Введение. В настоящее время существует потребность в гироскопических приборах навигационного класса точности для автономной выработки параметров ориентации и навигации. В качестве чувствительных элементов для бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) широкое применение получили волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) [1]. Зачастую специфика эксплуатации таких систем, связанная с использованием в широком диапазоне температурных и механических воздействий, приводит к необходимости проведения проверок каждого серийного образца на вибрационную и температурную устойчивость в ходе приемо-сдаточных испытаний и значительному увеличению затрачиваемого на такую процедуру времени.

В настоящий момент высокотехнологичные предприятия активно используют в задачах проектирования своей продукции цифровые двойники. Цифровой двойник (ЦД) – это семейство сложных мультидисциплинарных математических моделей с высоким уровнем адекватности реальным объектам (материалам, конструкциям, машинам, приборам, техническим и киберфизическим системам, физико-механическим процессам, включая технологические и производственные процессы), описываемые нестационарными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных [2]. С помощью ЦД представляется возможным адекватно описывать поведение реального объекта в штатных условиях работы, промоделировать различные непредвиденные ситуации. Создание ЦД БИНС на ВОГ позволит проводить научно-исследовательские испытания и/или опытно-конструкторские работы для оценки характеристик вновь создаваемых изделий в виртуальном пространстве, что в свою очередь может снизить стоимость работ, уменьшить временные затраты и позволит совершенствовать характеристики новых изделий.

Настоящая работа посвящена разработке части ЦД, а именно – построению конечно элементной тепло-механической модели инерциального измерительного модуля (ИИМ) для ЦД БИНС на ВОГ и анализу стабильности геометрических параметров модуля при изменении температуры, приводящей к смещению положения базовых поверхностей триады ВОГ.

Описание расчетной модели. Конструкция ИИМ состоит из набора электронных плат, трех гироскопов, трех акселерометров, платформы, источника света и защитных кожухов. Закрепление ИИМ происходит за посадочные поверхности опорных подшипников. Тепломеханическое моделирование производится в среде CreoSimulate. Требуемая вычислительная мощность и время необходимое на численное решение дифференциальных уравнений модели, зависят, в том числе, от количества конечных элементов в генерируемой расчетной сетке. Очевидно, что автоматически построенная конечноэлементная сетка такой конструкции будет иметь достаточно большое количество элементов, не влияющих на точность результата. Поэтому при подготовке модели исключаются из расчета относительно мелкие элементы, располагающиеся в областях малозначимой нагрузки с целью уменьшения конечных элементов в математическом представлении конструкции.

Тепло-механическое моделирование. Источниками тепловых полей являются энергопотребляемые части прибора, такие как электрические платы, источник света, акселерометры и т.д. Для анализа температурных явлений, происходящих внутри прибора, применен прибли-

Научный руководитель: к.т.н, начальник сектора Елисеев Д.П.

женно численный метод тепловых балансов [3]. При расчете температурных полей таким методом используется конечно элементная сетка, созданная в ходе упрощения. Для всех деталей, участвующих в расчетной модели, должны быть учтены их физические свойства, такие как удельная теплоемкость, теплопроводность, плотность, коэффициент линейного расширения, коэффициент Пуассона, модуль Юнга.

При моделировании приняты следующие допущения:

- Платы представляют собой анизотропную пластину, тепловое поле которых изменяется по двум направлениям (перепадом по толщине пренебрегают);
- Теплопередача происходит кондуктивным путем;
- Коэффициент конвективного обмена между воздухом и платой равен $50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К})$ [4];
- Выделяемая теплота рассеивается воздухом и передается составным частям сборки посредством теплопроводности материала платформы ИИМ.

Для механического анализа в качестве нагрузки тепловых воздействий применена встроенная в среду CreoSimulate функция МЕС/Т.

Результаты моделирования. На рисунке 1 приведено распределение температуры по инерциальному измерительному модулю, вызванное самопрогревом изделия. Температура окружающей среды при моделировании была задана $23 \text{ }^\circ\text{C}$. Значительное увеличение температуры выявлено в местах установки электрических плат, потребляющих наибольшее количество энергии. Самая высокая температура ($41,1 \text{ }^\circ\text{C}$) в результате моделирования выявлена на одной из плат. Полученный результат был верифицирован с помощью тепловизора. Максимальная температура одного из элементов платы равнялась $47,3^\circ\text{C}$, а средняя температура всей платы $-42,1^\circ\text{C}$.

Было выявлено значительное изменение геометрических параметров базовой поверхности одного из ВОГ во время самопрогрева ИИМ, которое приводит к смещению оси чувствительности гироскопа относительно заданных осей прибора. Полученные результаты сравнивались с экспериментальными данными, полученными в ходе температурных испытаний ИИМ.

На рисунке 2 представлены зависимости угла отклонения оси чувствительности ВОГ относительно осей прибора при изменении температуры, полученные в ходе моделирования (синий график) и эксперимента (красный график).

Обе зависимости имеют одинаковый характер. Наибольшее отклонение угловых параметров произошло при температуре 42°C . Несовпадение результатов моделирования и эксперимента составляет примерно 60%. Стоит отметить, что в ходе эксперимента оценивались отклонения осей чувствительности ВОГ, вызванные совокупностью факторов, а модель учитывала только геометрическое изменение базовой поверхности ВОГ.

Заключение. Создана конечноэлементная тепло-механическая модель ИИМ в рамках создания ЦД БИНС на ВОГ. В ходе анализа изменения геометрических параметров ИИМ во время самопрогрева выявлено смещение базовой поверхности одного из ВОГ, что приводит к отклонению оси чувствительности гироскопа. Представлено сравнение полученных на модели данных с результатами эксперимента. Несовпадение результатов составляет примерно 60%. Тем не менее полученная модель может быть использована при построении ЦД БИНС на ВОГ.

В дальнейшем планируется произвести подробное тепловое и механическое моделирование ВОГ.

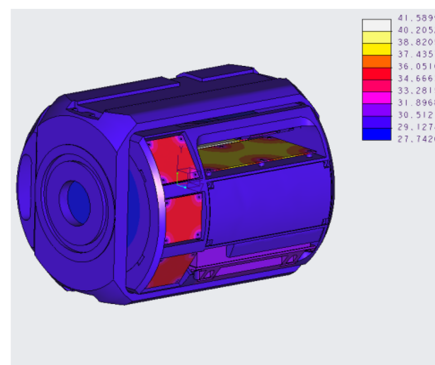


Рис. 1. Распределение температуры по ИИМ

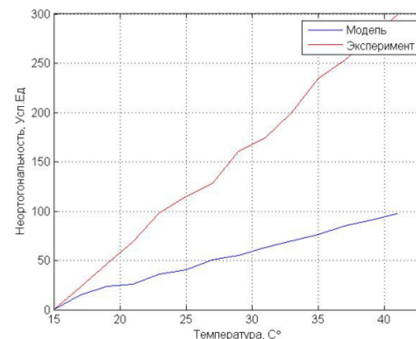


Рис. 2. Угол отклонения оси чувствительности ВОГ

ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В. Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – 2011. – №1(72). – С.3-16
2. Евстифеев М.И., Елисеев Д.П. Проектирование 3D моделей элементов инерциальных модулей – СПб: Университет ИТМО, 2021. – 114 с
3. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / под общ.ред. академика РАН В. Г. Пешехонова. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ “Электроприбор”, 2005. 404 с
4. Захаржевский С. Б., Курносенко А. Е. Расчет изделий электроники на механические и тепловые воздействия в САПР Creo: учеб. пособие. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2013. 56 с. : ил.

E.D. Uskov (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, St. Petersburg, Russia). **Development of a thermomechanical model of a digital twin of a strapless inertial navigation system based on optical gyroscopes**

Abstract. A thermomechanical model of an inertial measurement module for a digital twin of a strapless inertial navigation system based on fiber-optic gyroscopes (FOG) is considered. The instability of the geometric parameters of the module under temperature changes is analyzed, which can lead to a shift in the position of the base surfaces of the FOG triad.

Секция 5.
ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Я.В. РАУДОНИС
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

**ДВУХОСНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ГИРОСТАБИЛИЗАТОРОМ ГРАВИМЕТРА
НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ**

Рассмотрена задача совместной работы контура акселерометрической коррекции, представляющего собой короткопериодную гировертикаль, и безредукторной следящей системы на волоконно-оптических гироскопах. Представлены результаты моделирования погрешностей стабилизации.

Введение. Система двухосной гироскопической стабилизации гравиметра на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) предназначена для стабилизации платформы с гравиметром в плоскости горизонта. Вследствие наличия собственного ухода гироскопа и влияния на его показания скорости вращения Земли платформа отклоняется от плоскости горизонта. Для устранения этого отклонения используется контур акселерометрической коррекции (АК). Для обеспечения приемлемого запаса устойчивости в контур безредукторной системы стабилизации (БСС) вводится корректирующее звено, синтез которого описан в работе [1].

В первом приближении показания ВОГ можно представить в виде [2]:

$$\begin{cases} \omega_x = \delta\dot{\psi} - \frac{V_N}{R} \cos K - \frac{V_E}{R} \sin K - \Omega \sin K \cos \phi - \Omega \sin \phi \delta\theta + \delta\theta \dot{K} - \frac{V_E}{R} \operatorname{tg} \phi \delta\theta, \\ \omega_y = \delta\dot{\theta} + \frac{V_E}{R} \cos K - \frac{V_N}{R} \sin K + \Omega \cos K \sin \phi + \Omega \sin \phi \delta\psi - \delta\psi \dot{K} + \frac{V_E}{R} \operatorname{tg} \phi \delta\psi, \end{cases} \quad (1)$$

где $\delta\theta$, $\delta\psi$ – погрешности платформы по углам крена и тангажа; $\delta\dot{\theta}$, $\delta\dot{\psi}$ – угловые скорости изменения погрешностей по углам крена и тангажа; ω_x , ω_y – показания ВОГ, размещенных на платформе; Ω – скорость вращения Земли; K – отклонение от направления на север на угол курса.

Традиционно контур АК рассматривается отдельно от контура гироскопической стабилизации [3]. Но в силу того, что для алгоритма управления необходимы только величины $\delta\dot{\theta}$ и $\delta\dot{\psi}$, то для компенсации остальных составляющих показаний ВОГ предлагается использовать контур АК.

Целью работы является разработка алгоритма системы гироскопической стабилизации платформы, построенной на базе ВОГ, с акселерометрической коррекцией.

Система управления гиросtabilизатором. Система управления гиросtabilизатором состоит из контура БСС на ВОГ и контура АК, устраняющего низкочастотные составляющие уходов ВОГ и скорости вращения Земли. Контур БСС описан в [1], а контур АК – в [4]. Для демпфирования шулеровских колебаний сигналы акселерометров преобразуются из приборной системы координат в горизонтную с помощью преобразователя координат. В данной работе принято допущение, которое не учитывает взаимное влияние кардановых колец. Тогда данную двуосную систему стабилизации можно представить как совокупность двух независимых, несвязанных одноосных гиросtabilизаторов [5].

Структурная схема системы управления гиросtabilизатором представлена на рис. 1. Штриховой линией обозначена физическая связь.

Структура фильтра имеет вид [6]:

$$F(p) = \frac{T_0^2}{2T_B^2} \frac{a_1 T_B p + 1}{a_2 T_B p + 1}, \quad (2)$$

где $T_0^2 = R/g$; T_B – постоянная времени стабилизации; a_1, a_2 – постоянные коэффициенты, определяющие характер переходного процесса стабилизации.

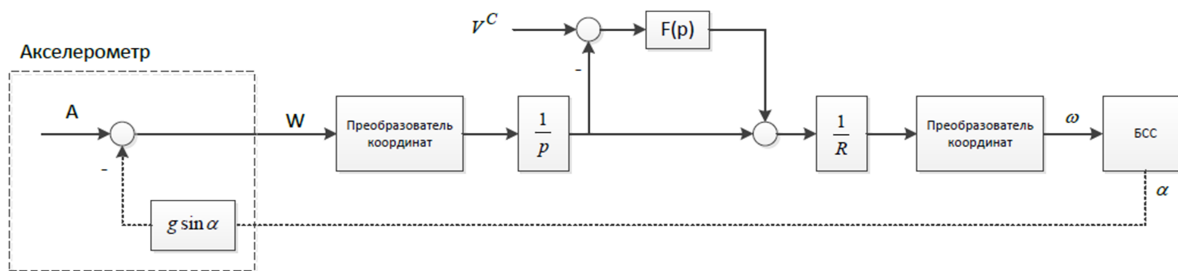


Рис. 1. Структурная схема системы управления гиросtabilизатором, где V^C – составляющая линейной скорости в горизонтальной системе координат, определяемая по показаниям внешнего источника, $F(p)$ – демпфирующий фильтр шулеровских колебаний, R – радиус Земли, ω – угловая скорость погрешности стабилизации в приборной системе координат.

Сигнал W является разностным сигналом линейной скорости подвижного объекта и проекции кажущегося ускорения на собственные оси, что позволяет использовать акселерометры в качестве обратной связи положения платформы [7]:

$$W = A - g \sin \alpha, \quad (3)$$

где A – линейное ускорение подвижного объекта, α – погрешность стабилизации, g – ускорение свободного падения. В силу малости погрешности стабилизации синус можно опустить.

Моделирование. Входным воздействием, а также основной причиной возникновения погрешности БСС является наличие возмущающих моментов в виде сухого трения, небаланса конструкции, остаточного момента двигателя и тяжения жгутов токоподвода.

При моделировании были также учтены погрешности чувствительных элементов, а именно смещение нуля, собственный уход и шум. Собственный уход ВОГ можно представить в виде марковского процесса первого порядка путем подачи белого шума на вход следующего апериодического звена [8]:

$$W(p) = \sqrt{2T_u} \cdot \sigma_{FOG} / (T_u p + 1), \quad (4)$$

где σ_{FOG} – СКО гироскопа, T_u – постоянная времени марковского процесса (в данной работе составляет 2 часа).

На рис. 2 представлен график погрешности стабилизации при следующих параметрах: регулярная качка амплитудой 15 град. и периодом 6 с., смещение нуля акселерометра $3 \cdot 10^{-3} g$, СКО белого шума не более 0.1 м/с^2 , смещение нуля ВОГ 1 град/ч, математическое ожидание ухода гироскопа на уровне 2 град/ч, а его СКО 1 град/ч, нестабильность масштабного коэффициента на уровне $\pm 10\%$. Как видно из рисунка, погрешность стабилизации не превышает ± 20 угл. сек.

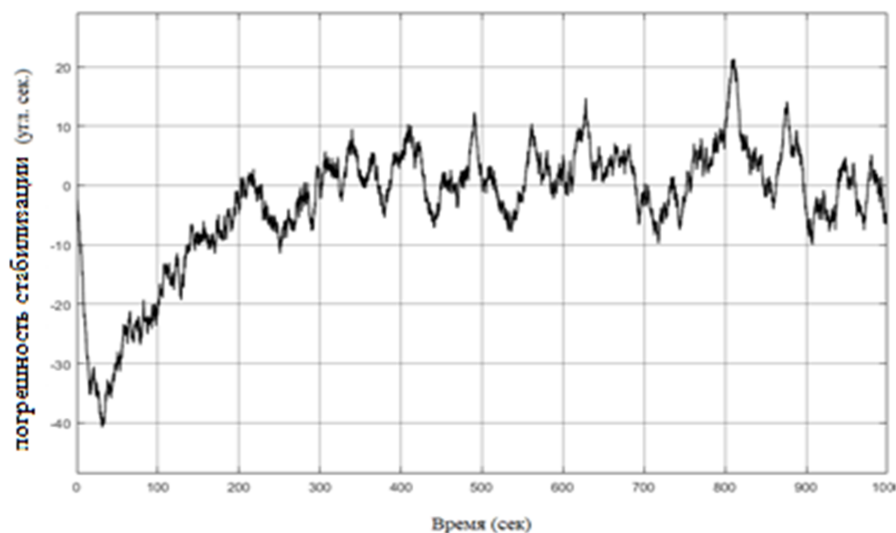


Рис. 2. График погрешности стабилизации с учетом влияния погрешностей чувствительных элементов

Заключение. В результате проведенных исследований была показана возможность создания системы стабилизации на ВОГ для платформы с гравиметром. Математическое моделирование показало возможность достижения требуемой точности стабилизации при воздействии внешних возмущений с заданными параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Я.В. Раудонис, И.В. Семенов, Д.В. Антонов.** Синтез регулятора для системы управления гиросtabilизатором гравиметра на волоконно-оптических гироскопах / Материалы XXIV конференции молодых ученых "Навигация и управление движением" с международным участием / Под общ ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. - СПб.: ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электронприбор", 2022. 291 с.
2. **И.В. Семенов.** Система управления гиросtabilизированной платформой мобильного вертикального градиентометра: дис. ...канд. техн. наук. АО Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург, 2012.
3. **С.С. Ривкин** Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании. — М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1978. — 320 с.
4. **А.В. Соколов, А.А. Краснов и др.** Система гироскопической стабилизации на волоконно-оптических гироскопах для аэроморского гравиметра / Гироскопия и навигация 2015 - №3 (90) - С. 126-134
5. **Фабрикант Е.А., Журавлев Л.Д.** Динамика следящего привода гироскопических стабилизаторов. М.: Машиностроение, 1984. 248 с.
6. **Лопарев А.В.** Использование частотного подхода при синтезе нестационарных алгоритмов обработки навигационной информации / А.В. Лопарев, О.А. Степанов, И.Б. Челпанов // Гироскопия и навигация. – 2011, № 3. – С. 115 – 132.
7. **Дробышев Н.В.** Создание самолета-лаборатории и методика выполнения аэрогравиметрической съемки в арктических условиях // Н.В. Дробышев, В.Н. Конешов, И.В. Конешов, В.Н. Соловьев // Вестник Пермского университета. – 2011. - №3. – С.37-50.
8. **Л. Мандель, Э. Вольф.** Оптическая когерентность и квантовая оптика. Пер. с англ. — М.: Физматлит, 2000. - 896 с.

Y.V. Raudonis (CSRI Electronpribor, Saint-Petersburg). **Biaxial control system of the gravimeter gyrostabilizer on fiber-optic gyroscopes.**

Abstract. The problem of joint operation of the accelerometric correction contour, which is a short-period gyrovertical, and a gearless tracking system on fiber-optic gyroscopes is considered. The results of modeling stabilization errors are presented

УДК 531.383

А. С. СЫРЧИНА
(МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва)

ПРИМЕНЕНИЕ ДИАГРАММЫ ВЫШНЕГРАДСКОГО ДЛЯ СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА ИНДИКАТОРНОГО ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА

Исследован метод определения параметров регулятора индикаторного гиросtabilизатора, использующий критерий Вышнеградского для оценки качества регулирования. Определена взаимосвязь параметров Вышнеградского с параметрами системы автоматического регулирования индикаторного гиросtabilизатора. Проведён расчёт параметров реального гиросtabilизатора с использованием полученных взаимосвязей.

Введение. В настоящее время широкое использование индикаторных гироскопических стабилизаторов (ИГС) требует оптимизации процесса проектирования данных устройств. Одним из главных требований к системе стабилизации является ее точность. Среди основных задач при разработке гиросtabilизатора можно выделить необходимость обеспечения при заданной точности необходимых запасов устойчивости системы стабилизации и обеспечения удовлетворительного качества регулирования. В современной технике указанная задача решается различными методами. Наиболее распространённый метод заключается во введении регулятора в контур обратной связи гироскопического стабилизатора, синтез которого реализуется многими способами. В данном докладе рассмотрен новый метод синтеза регулятора ИГС с использованием критерия Вышнеградского. Преимуществами представленного метода можно считать наглядность и однозначность значений определяемых параметров.

Синтез регулятора индикаторного гиросtabilизатора. Структурная схема одного канала стабилизации ИГС представлена на рис. 1.

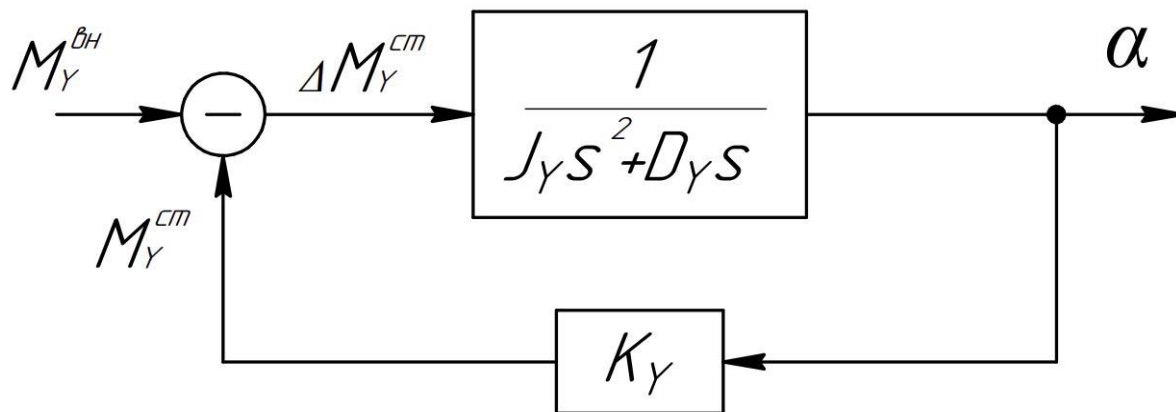


Рис. 1. Структурная схема одного канала стабилизации

Передаточная функция разомкнутой системы имеет вид:

$$W_Y(s) = \frac{M_Y^{см}(s)}{M_Y^{вн}(s)} = \frac{K_Y}{J_Y \cdot s^2 + D_Y \cdot s}, \quad (1)$$

где: J_Y – осевой момент инерции ГС; D_Y – коэффициент демпфирования по оси Y; K_Y – коэффициент усиления в контуре стабилизации по оси Y; M_Y^{6H} – моменты внешних сил по оси Y; M_Y^{cm} – момент стабилизации по оси Y; α – угол поворота ГС вокруг оси Y.

Для коррекции системы автоматического регулирования ИГС в настоящее время в контур обратной связи вводят дополнительные корректирующие звенья либо ПИД-регуляторы. И в том, и в другом случае окончательный вид передаточной функции может быть представлен в виде набора форсирующих и апериодических корректирующих звеньев чаще первого порядка. При этом выбор постоянных времени корректирующих звеньев проводится на основе анализа логарифмических амплитудной и фазовой частотных характеристик (ЛАФЧХ), а для ПИД-регуляторов – на основе оценки вида и качества переходных процессов. Устойчивость и качество регулирования при этом обеспечиваются подбором параметров регулятора ИГС. О правильности выбора параметров любого регулятора можно судить по запасам устойчивости, по виду и качеству переходного процесса [1-5]. Такой же наглядностью, как и метод ЛАФЧХ, но позволяющий определять параметры аналитически является метод синтеза регулятора, основанный на критерии Вышнеградского.

Методика синтеза регулятора с использованием критерия Вышнеградского. Способ графического решения кубических уравнений был предложен профессором Вышнеградским в 1876 году [6-7]. Наиболее подробно данный метод изучен для систем автоматического регулирования третьего порядка.

Характеристическое уравнение индикаторного гиростабилизатора с введённым в обратную связь регулятором, состоящим из форсирующего и апериодического корректирующих звеньев первого порядка, выглядит следующим образом:

$$J_Y \cdot T_2 \cdot s^3 + (D_Y \cdot T_2 + J_Y) \cdot s^2 + (K_Y \cdot T_1 + D_Y) \cdot s + K_Y = 0, \quad (2)$$

где T_1, T_2 – постоянные времени регулятора с передаточной функцией:

$$W_{рег}(s) = \frac{1 + T_1 \cdot s}{1 + T_2 \cdot s}, \quad (3)$$

Уравнение (2) можно привести к виду:

$$q^3 + Aq^2 + Bq + 1 = 0, \quad (4)$$

где A, B – параметры Вышнеградского, которые для ИГС можно вычислить как:

$$A = \frac{D_Y \cdot T_2 + J_Y}{\sqrt[3]{J_Y^2 \cdot T_2^2 \cdot K_Y}}, \quad B = \frac{T_1 \cdot K_Y + D_Y}{\sqrt[3]{J_Y \cdot T_2 \cdot K_Y^2}}. \quad (5)$$

Используя полученные выражения, можно построить диаграмму на плоскости параметров Вышнеградского для различных желаемых частот среза, например, для частот, которые используются в реальных устройствах: от 45 Гц до 70 Гц (рис. 2).

Расположение кривых равных частот среза в различных областях позволяет судить о виде и качестве переходного процесса, следовательно, косвенно о запасах устойчивости.

Для более точной оценки качества переходного процесса на диаграмму Вышнеградского наносятся дополнительные кривые, которые накладывают дополнительные требования при выборе параметров регулятора, например, по быстродействию. Таким образом, используя полученные аналитические зависимости и построенные по ним дополнительные кривые, можно выбрать точку, наиболее близкую к оптимальной, с координатами в виде параметров Вышнеградского, на основании которых рассчитать параметры контура обратной связи ИГС [8].

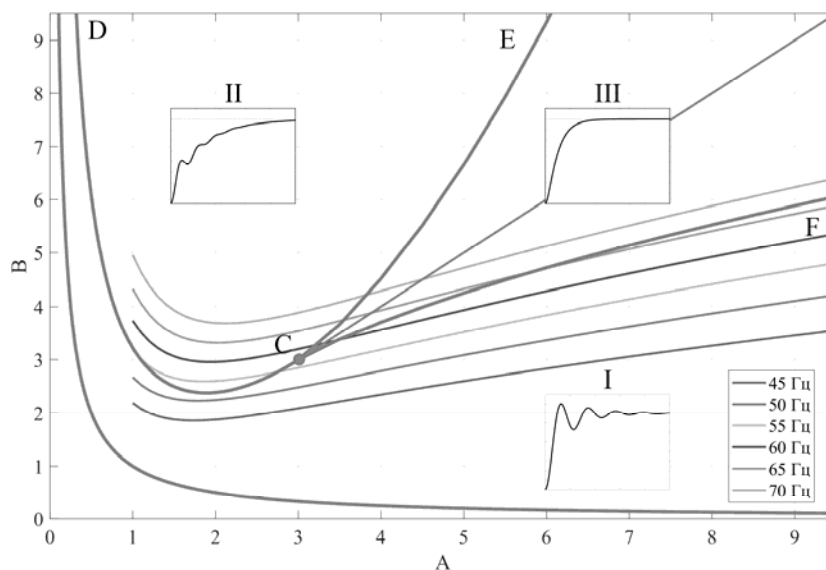


Рис. 2. Диаграмма Вышнеградского для системы ИГС

Заключение. В отличие от процесса синтеза регулятора наиболее распространённым методом ЛАФЧХ, который является итерационным и неоднозначным, так как требует последовательного подбора параметров, их оценки на соответствие предъявляемым требованиям и изменения этих параметров, рассмотренный в данной работе метод синтеза регулятора индикаторного гиросtabilизатора с использованием критерия Вышнеградского позволяет рассчитывать параметры аналитически. В докладе приведены аналитические зависимости параметров регулятора от параметров Вышнеградского, построены необходимые кривые на плоскости параметров Вышнеградского и проведён выбор параметров реального индикаторного гиросtabilизатора, используя данный метод.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Козлов В.В., Кулешов А.В., Полянков А.В., Фатеев В.В.** Индикаторные гиросtabilизаторы бортовых оптических приборов/ Оборонная техника. 2020. №1. С. 25 – 44.
2. **Fateyev V.V., Polynkov A.V., Kuleshov A.V.** Long-focus optoelectronic systems for Earth remote sensing // AIP Conference Proceedings. 2021. Т. 2318. №1. С. 170001.
3. **Кулешов А.В., Фатеев В.В.** Погрешности двухосного индикаторного гиросtabilизатора оптического прибора при качке носителя / Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2017. № 12. С. 7...13.
4. **Козлов В.В., Кулешов А.В., Фатеев В.В.** Гироскопические стабилизаторы съемочной аппаратуры. Опыт разработки // Авиакосмическое приборостроение. №12. 2013. С. 27-42.
5. **Под ред. Д.С. Пельпора.** Проектирование гироскопических систем. Ч. II. Гироскопические стабилизаторы. Учеб. пособие для вузов. М.: «Высшая школа», 1977. 223 с.
6. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического управления. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб, Изд-во «Профессия», 2004. 752 с.
7. **Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А.** Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. Ленинград: Судостроение, 1968.
8. **Сырчина А.С., Кулешов А.В.,** Синтез регулятора индикаторного гиросtabilизатора с использованием критерия Вышнеградского / Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. Вып. 11 С. 99 – 110.

A. S. Syrchina (Bauman Moscow State Technical University, Moscow). **The Vyshnegradskii diagram application to indicator gyrostabilizer controller synthesis**

The paper studies a method for determining the parameters of an indicator gyrostabilizer controller, where the Vyshnegradskii criterion is used for estimating the control quality. The relationship between the Vyshnegradskii parameters and the parameters of the automatic control system of an indicator gyrostabilizer is determined. The resulting relationship is used in the calculation of a real gyrostabilizer parameters.

УДК 681.51

М.Ю. ЛОБАЧЕВ

(Санкт-Петербургский Государственный университет, Санкт-Петербург)

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПОЛОСЫ ЗАХВАТА СИСТЕМЫ ФАЗОВОЙ АВТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ

Для системы фазовой автоподстройки частоты с пропорционально-интегрирующим фильтром первого порядка и кусочно-линейной характеристикой фазового детектора получена явная аналитическая формула оценки полосы захвата, обеспечивающей синхронизацию входного и подстраиваемого сигналов при любых начальных данных.

Введение. История нелинейного анализа систем фазовой автоподстройки (ФАП) связана с задачами оценки полосы захвата, соответствующей глобальной устойчивости системы [1]. Первой работой, в которой для системы ФАП с пропорционально-интегрирующим фильтром и кусочно-линейной характеристикой фазового детектора была сделана попытка получить точные формулы для полосы захвата, была статья М.В. Капанова [2]. С помощью метода точечных отображений Андронова и предположения о том, что глобальная устойчивость данной системы определяется рождением гетероклинической траектории, были получены формулы для полосы захвата. Позднее в работах Н.А. Губарь, Б.И. Шахтарина и В.М. Сафонова [3-5] было показано, что гипотеза Капанова неверна и что полоса захвата исследуемой системы может определяться рождением полуустойчивого цикла второго рода. Однако из-за сложности применяемой техники и краткости изложения в работах [3-5] отсутствовали корректные аналитические формулы для определения полосы захвата в общем случае произвольного наклона кусочно-линейной характеристики.

В итоге в одной из основополагающих отечественных монографий [6] для полосы захвата можно найти только асимптотическую формулу и бифуркационные диаграммы, перерисованные из работы [5], а в книге известного инженера Н. Маргариса [7] отмечено отсутствие удовлетворительного решения этой проблемы: «The determination of the width of the capture range together with the interpretation of the capture effect in the second order type-I loops have always been an attractive theoretical problem. This problem has not yet been provided with a satisfactory solution». В настоящей работе за счёт специальной замены переменных, последующих интегрирования и сшивки траекторий и анализа кривых, соответствующих возникновению полуустойчивого цикла, получена явная формула, являющаяся аналитической оценкой полосы захвата.

Нелинейный анализ. С точки зрения теории управления, динамика классических систем ФАП может быть описана системой с отрицательной обратной связью, представленной на рис. 1.

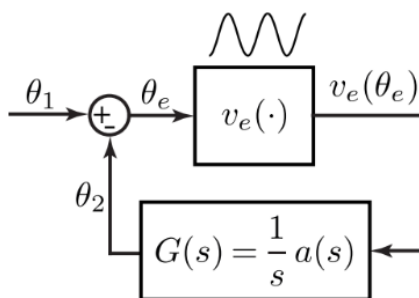


Рис. 1. Модель ФАП

Научный руководитель: член-корр. РАН Кузнецов Н.В.

Здесь $a(s) = K_{vco} \frac{1 + \tau_2 s}{1 + (\tau_1 + \tau_2) s}$, $\tau_{1,2} > 0$, а кусочно-линейная характеристика фазового детектора имеет форму, изображенную на рис. 2.

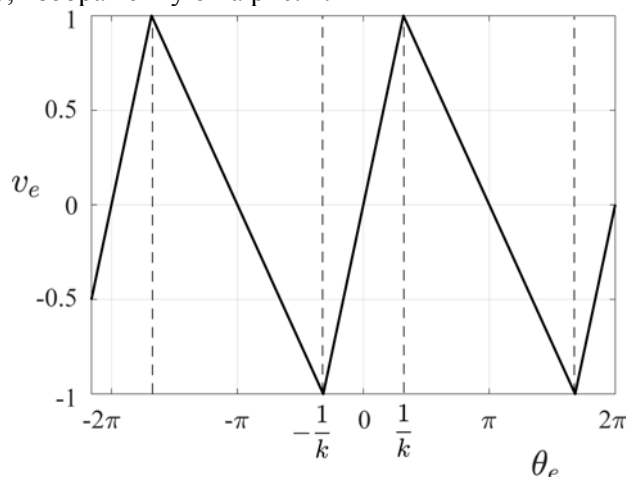


Рис. 2. Кусочно-линейная характеристика.

Особенностями систем ФАП являются периодичность нелинейности $v_e(\theta_e)$ и как минимум один нулевой полюс передаточной функции $G(s)$ линейной части системы. В работе рассматривается пропорционально-интегрирующий фильтр нижних частот, сводящий модель ФАП к системе дифференциальных уравнений второго порядка, и кусочно-линейная характеристика фазового детектора. Качественный анализ системы показывает, что потеря глобальной устойчивости системы может произойти в трёх случаях: в случае бифуркации исчезновения состояний равновесия, бифуркации рождения гетероклинической траектории и бифуркации рождения полуустойчивого цикла второго рода. Кусочно-линейная характеристика фазового детектора позволяет с помощью специальной замены переменных, сводящих систему к уравнению с разделяющимися переменными, провести аналитическое интегрирование траекторий системы. Сшивая решения на границах линейности $v_e(\theta_e)$ и приравнивая граничные значения ординат, получаем уравнения, из которых находится частота, соответствующая рождению полуустойчивого цикла и гетероклинической траектории (предельный случай). Данный способ позволяет получить явные эффективные формулы оценки полосы захвата, а также получить решение задачи Гарднера о полосе быстрого захвата [8].

Заключение Для системы фазовой автоподстройки частоты с пропорционально-интегрирующим фильтром и кусочно-линейной характеристикой фазового детектора получена явная аналитическая формула оценки полосы захвата, позволяющая быстро рассчитывать допустимый диапазон рабочих значений входной частоты.

Работа проводилась при поддержке гранта Ведущей научной школы РФ (проект НШ-4196.2022.1.1).

ЛИТЕРАТУРА

1. Leonov G., Kuznetsov N., Yuldashev M., Yuldashev R. Hold-in, pull-in, and lock-in ranges of PLL circuits: rigorous mathematical definitions and limitations of classical theory // IEEE Transactions on Circuits and Systems–I: Regular Papers. 2015. Vol. 62, no. 10. P. 2454–2464.
2. Капранов М.В. Полоса захвата при фазовой автоподстройке частоты // Радиотехника, 11(12), 1956. с. 37–52.
3. Губарь Н.А. Исследование одной кусочно-линейной динамической системы с тремя параметрами. // ПММ, 25(6), 1961. С. 1011–1023.
4. Шахтарин Б.И. Исследование кусочно-линейной системы ФАП. // Радиотехника и электроника, N8, 1969. С.1415–1424.
5. Сафонов В.М. О влиянии формы пилообразной характеристики фазового детектора на полосу захвата ФАП // Радиотехника. N24(6), 1969. С. 76–80.

6. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. Москва: Связь, 1972.
7. Margaris N. Theory of the Non-Linear Analog Phase Locked Loop. New Jersey: Springer Verlag, 2004. P. 287.
8. Кузнецов Н.В., Лобачев М.Ю., Юлдашев М.В., Юлдашев Р.В. О проблеме Гарднера для систем управления фазовой автоподстройкой частоты // Доклады Академии наук. 2019. Т. 489, № 6. С. 541–544.

Lobachev, M.Y. (Saint Petersburg State University, Saint Petersburg). **Analytical estimate of the pull-in range of phase-locked loop model**

Abstract. For a phase-locked loop model with a proportional-integrating filter and a piecewise-linear phase detector characteristic, an explicit analytical formula for estimating the pull-in range is obtained.

УДК 681.51

Е. Д. АКимова

(Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург),

Н. В. Кузнецов

(Санкт-Петербургский государственный университет, Институт проблем машиноведения РАН,
Санкт-Петербург)**РАЗВИТИЕ МЕТОДА ГОДОГРАФА ЦЫПКИНА ДЛЯ АНАЛИЗА КОЛЕБАНИЙ
И УСТОЙЧИВОСТИ В РЕЛЕЙНЫХ СИСТЕМАХ**

Рассмотрены трудности, возникающие при применении классического метода гармонического баланса (МГБ), методов годографа Цыпкина и годографа возмущённой релейной системы (LPRS), связанные с теорией мультиустойчивости и теорией скрытых колебаний. Предложены пути дальнейшего развития этих методов.

Введение. Одной из центральных задач анализа предельной динамики систем управления является задача определения необходимых и достаточных условий глобальной и мультиустойчивости, то есть выявление всех аттракторов (тривиальных, периодических, хаотических и др.). В общем случае трудности решения таких задач связаны с возможностью наличия в пространстве параметров скрытых участков границ глобальной устойчивости, а в фазовом пространстве – скрытых колебаний¹. Для разрывных систем дополнительной трудностью является наличие собственной динамики на многообразии разрыва.

Одним из общих методов поиска периодических решений в нелинейных системах управления является классический метод гармонического баланса (МГБ), предложенный в работах Б. ван дер Поля [2], а также Н.М. Крылова и Н.Н. Боголюбова [3]. Этот метод является приближённым и в общем случае может предсказывать существование решений, которые на самом деле отсутствуют в фазовом пространстве системы, или наоборот, не предсказывать существующие решения [4].

Для учёта специфики разрывных систем Я.З. Цыпкин, развивая идеи Крылова и Боголюбова, предложил аналитико-численный метод поиска периодических решений в релейных системах (см. [5]). Этот метод основан на построении и анализе специальной функции, называемой годографом Цыпкина и позволяет уточнить результаты, полученные с помощью классического МГБ [4, 6].

В докладе рассмотрены аспекты применения метода Цыпкина, связанные с анализом сложных предельных периодических решений, включающих участки скольжения.

Колебания и устойчивость релейных систем. Рассмотрим систему с одной скалярной нелинейностью, которая представляет идеальное реле, записанную в форме Лурье [7]:

$$\dot{x} = Ax + B \operatorname{sign}(\sigma), \quad \sigma = -C^*x, \quad (1)$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ – вектор состояния, $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица, $B, C^* \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ – векторы, $*$ – оператор транспонирования. Решения системы (1) будем понимать в смысле Филиппова [8]. Передаточная функция системы (1) будет иметь вид $W(s) = C^*(A - Is)^{-1}B$.

В рамках метода Цыпкина необходимо построить специальную функцию $J_{Tsypr}(\omega)$, называемую годографом Цыпкина:

$$J_{Tsypr}(\omega) = \frac{4}{\pi} \left(\sum_{l=1}^{\infty} \operatorname{Re} W(j(2l-1)\omega) \right) + j \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{2l-1} \operatorname{Im} W(j(2l-1)\omega).$$

Частоты симметричных периодических колебаний с двумя переключениями режима на периоде могут быть найдены из следующих уравнений:

¹ Колебание называется *скрытым*, если область его притяжения в фазовом пространстве не пересекается с малыми окрестностями неустойчивых состояний равновесия, в противном случае – *самовозбуждающимся* [1].

$$\begin{cases} \operatorname{Im} J_{Tsyр}(\omega_0) = 0, \\ \operatorname{Re} J_{Tsyр}(\omega_0) < 0. \end{cases}$$

Согласно [5], для существования скользящего режима необходимо, чтобы годограф $J_{Tsyр}(\omega)$ не пересекал действительной оси в левой части плоскости и разность степеней знаменателя и числителя равна 1. Однако с помощью этого метода нельзя найти начальные данные решений, в которых возникают скользящие режимы.

Развивая идеи Цыпкина, И.М. Бойко предложил метод годографа возмущённой релейной системы (LPRS) [9]. Основываясь на выводе метода LPRS, можно получить выражения для нахождения начальных данных симметричных периодических решений с двумя переключениями режима на периоде, но нет возможности определить наличие скользящих режимов.

Развивая эти идеи, построим две вспомогательные функции для поиска симметричных периодических решений с двумя переключениями режима на периоде, в которых возникают скользящие режимы:

$$\begin{aligned} f_1(T, \lambda) &= -C^* e^{A_{sl}\tau_2} (I + e^{A\tau_1} e^{A_{sl}\tau_2})^{-1} A^{-1} (e^{A\tau_1} - I) B, \text{ где } \tau_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} - \lambda \right) T, \\ f_2(T, \lambda) &= -C^* A e^{A_{sl}\tau_2} (I + e^{A\tau_1} e^{A_{sl}\tau_2})^{-1} A^{-1} (e^{A\tau_1} - I) B + C^* B, \end{aligned}$$

где $\tau_1 = \frac{1}{2} \lambda T$, $T = 2(\tau_1 + \tau_2)$ – период решения, $\lambda = \frac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2}$ – относительная длительность управления, $A_{sl} = (I - (C^* B)^{-1} B C^*) A$. Далее, варьируя на фиксированном промежутке значения периода T , будем искать такие значения λ , при которых значения функций f_1 и f_2 равны нулю. По каждой паре найденных значений T и λ можно найти частоту ω сложного периодического колебания, а также его начальные данные: $\rho = -e^{A_{sl} \frac{1}{2} T (1-\lambda)} \left(I + e^{A \frac{1}{2} \lambda T} e^{A_{sl} \frac{1}{2} T (1-\lambda)} \right)^{-1} A^{-1} \left(e^{A \frac{1}{2} \lambda T} - I \right) B$.

Устойчивость полученного решения можно определить, найдя собственные значения матрицы $D = \Phi_1 \Phi_2$, где

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \left(I - \frac{(A e^{A\tau_1} \rho + e^{A\tau_1} B) C^*}{C^* (A e^{A\tau_1} \rho + e^{A\tau_1} B)} \right) e^{A\tau_1}, \quad \Phi_2 = - \left(I - \frac{A_{sl} e^{A_{sl}\tau_2} \eta C^* A}{C^* A A_{sl} e^{A_{sl}\tau_2} \eta} \right) e^{A_{sl}\tau_2}, \\ \rho &= -e^{A_{sl}\tau_2} (I + e^{A\tau_1} e^{A_{sl}\tau_2})^{-1} A^{-1} (e^{A\tau_1} - I) B, \quad \eta = (I + e^{A\tau_1} e^{A_{sl}\tau_2})^{-1} A^{-1} (e^{A\tau_1} - I) B. \end{aligned}$$

Симметричное периодическое решение системы с двумя переключениями режима на периоде релейной системы с идеальным гистерезисом (1) локально орбитально асимптотически устойчиво, если все собственные значения матрицы D не будут превосходить единицы.

Эффективность данного метода может быть продемонстрирована на примере модели регулятора Уатта с сервомотором [11]. В этой модели с помощью классического МГБ, а также методов Цыпкина и LPRS, не удаётся локализовать решение, в котором присутствуют участки скольжения. Тем не менее, оно может быть найдено с помощью описанного алгоритма. Таким образом, несмотря на то, что представленные выше методы помогают существенно продвинуться при решении задачи поиска предельных динамических режимов, они не дают полного решения задачи и требуют дальнейшего развития для определения более сложных по форме колебаний.

Заключение. В докладе предложен метод поиска симметричных периодических решений с двумя переключениями режима на периоде, в которых возникают скользящие режимы, основанный на рассмотрении отображений Пуанкаре и развивающий результаты, полученные Цыпкиным и Бойко. Получено утверждение об орбитальной устойчивости таких периодических решений. Эффективность описанного метода продемонстрирована на примере модели регулятора Уатта с сервомотором.

Работа проводилась при поддержке гранта Ведущей научной школы РФ (НШ-4196.2022.1.1)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кузнецов Н.В.** Теория скрытых колебаний и устойчивость систем управления. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2020, № 5, С. 5-27.
2. **van der Pol B.** On relaxation-oscillations. *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Vol. 7, №2, 1926, p. 978–992.
3. **Крылов Н. М., Боголюбов Н. Н.** Введение в нелинейную механику. К.: Изд-во АН УССР, 1937.
4. **Kuznetsov, N. V., Akimova, E. D., Kudryashova, E. V., Kuznetsova, O. A., Lobachev, M. Y., Mokaev, R. N., Mokaev, T. N.** Global Stability Boundaries and Hidden Oscillations in Dynamical Models with Dry Friction. In *Mechanics and Control of Solids and Structures*. Springer, Cham, 2022, pp. 387-411.
5. **Цыпкин Я.З.** Теория релейных систем автоматического регулирования. Гостехиздат, Москва, 1955.
6. **Akimova, E. D., N. V. Kuznetsov, and R. N. Mokaev.** Analysis of oscillations and global stability in nonlinear control systems. *Навигация и управление движением*, 2020, p. 143-145.
7. **Лурье, А.И., Постников, В.Н.** К теории устойчивости регулируемых систем. *Прикладная математика и механика*, Т. 8, № 3, 1944, С. 246-248.
8. **Филиппов А.Ф.** Дифференциальные уравнения с разрывной правой частью. М.: Наука, 1985.
9. **Voiko I.M.** *Discontinuous Control Systems: Frequency-Domain Analysis and Design*. Springer London, Limited, 2008.
10. **Voiko I. M., Kuznetsov N. V., Mokaev R. N., Akimova E. D.** On asymmetric periodic solutions in relay feedback systems. *Journal of the Franklin Institute*, 2021, vol. 358, no. 1, pp. 363–383.
11. **Кузнецов Н.В., Акимова Е.Д.** Задача Андронова-Вышнеградского и её влияние на развитие теории управления. *Математическая теория управления и ее приложения (МТУиП-2022)*, 2022, с. 232-235.

E.D. Akimova (Saint Petersburg University, Saint Petersburg), N.V. Kuznetsov (Saint Petersburg University, Saint Petersburg, Institute for Problems in Mechanical Engineering RAS, Saint Petersburg). **Analysis of oscillations and stability in relay control systems via Tsytkin locus.**

Abstract. Analysis of oscillations in relay systems via general classical methods of control theory, such as the harmonic balance method, can lead to erroneous conclusions. Due to the development of special analytical-numerical methods of localization of periodic solutions in systems with a single piecewise continuous nonlinearity, it has become possible to refine the results. In this presentation, we consider the possibility of further development of special methods for localization of periodic attractors in relay systems and determining their stability.

УДК 004.942

С. А. МЕРКУРЬЕВ
(ПАО «РКК «Энергия», г. Королев; МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОВЛИЯНИЯ УПРУГИХ И ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ НА ДВИЖЕНИЕ ТЯЖЕЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Рассматривается тяжелый космический аппарат с баками окислителя и топлива низкого давления и поворотными солнечными батареями. Исследуются вибрации, вызываемые упругими элементами конструкции солнечных батарей и колебания свободных поверхностей жидкого наполнения баков низкого давления при угловом и линейном движении аппарата. Даются заключения об особенностях управления рассматриваемым объектом.

Введение. В перспективных разработках по пилотируемым кораблям, таких как пилотируемый транспортный корабль (ПТК), закладываются значительные возможности по орбитальному маневрированию, как для околоземных полетов, так и для полетов к Луне [1, 2]. По подобным характеристикам изделие схоже с разгонными блоками и обладает некоторыми их свойствами – наличием в системе подачи топлива баков низкого давления, вследствие чего при движении будут возникать колебания свободных поверхностей жидкого наполнения (окислителя или горючего), передающиеся на корпус изделия [3, 4]. Помимо этого на космическом аппарате (КА), рассматриваемом в качестве примера, имеются упругие элементы конструкции, такие как поворотные солнечные батареи, что в свою очередь, характерно для спутников различного назначения и применяемых в настоящее время пилотируемых кораблей и орбитальных станций [5, 6].

В докладе приведены результаты математического моделирования углового и линейного движения тяжелого космического аппарата под действием внешних возмущений. При этом введены в рассмотрение гидродинамические колебания свободных поверхностей жидкого наполнения баков низкого давления, вибрации упругих элементов конструкции солнечных батарей и проанализированы вызванные этими процессами колебания корпуса изделия как твердого тела. На основании полученных результатов сделаны выводы о влиянии обоих типов колебаний на угловое и линейное движения изделия, а также об особенностях управления им.

Исследование упругих и гидродинамических колебаний. Исследование проведено с помощью имитационного моделирования в специальной среде на высокоуровневом языке программирования [7]. Математическая модель исследуемого аппарата воспроизводит линейное и угловое движение корпуса как твердого тела, а также колебания упругих элементов конструкции и жидкого наполнения баков. В качестве входных воздействий задавались моменты и силы, прикладываемые к корпусу исследуемого аппарата.

Состав математической модели. Математическая модель углового движения исследуемого аппарата представляет собой динамические уравнения Эйлера для твердого тела (1), к которым в правой части добавляются угловые ускорения, вызванные упругими ($f_{flex-turn}$) и гидродинамическими ($f_{hydro-turn}$) колебаниями:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_x &= \frac{M_x + (I_{yy} - I_{zz}) * \omega_y * \omega_z}{I_{xx}} + f_{flex-turn} + f_{hydro-turn}, \\ \dot{\omega}_y &= \frac{M_y + (I_{zz} - I_{xx}) * \omega_x * \omega_z}{I_{yy}} + f_{flex-turn} + f_{hydro-turn}, \\ \dot{\omega}_z &= \frac{M_z + (I_{xx} - I_{yy}) * \omega_y * \omega_x}{I_{zz}} + f_{flex-turn} + f_{hydro-turn},\end{aligned}\tag{1}$$

Научный руководитель: к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Сумароков А.В.

где $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – компоненты вектора угловой скорости в связанной с объектом системе координат, M_x, M_y, M_z – компоненты момента внешних сил, I_{xx}, I_{yy}, I_{zz} – главные моменты инерции КА.

Модель линейного движения КА в инерциальном пространстве под действием внешних сил с учетом упругих ($f_{flex-lin}$) и гидродинамических ($f_{hydro-lin}$) колебаний имеет вид

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= \frac{F_x}{M} + f_{flex-lin}, \\ \ddot{y} &= \frac{F_y}{M} + f_{flex} + f_{hydro-lin}, \\ \ddot{z} &= \frac{F_z}{M} + f_{hydro-lin},\end{aligned}\quad (2)$$

где x, y, z – компоненты радиус-вектора положения КА в инерциальном пространстве, M – масса КА, F_x, F_y, F_z – компоненты вектора равнодействующей внешних сил.

Для описания кинематики углового движения КА использовались уравнения в кватернионной форме (3):

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2}(\Lambda \circ \omega), \quad (3)$$

где Λ – кватернион ориентации системы координат связанной с корпусом КА в инерциальном пространстве, ω – вектор угловой скорости связанной с КА системы координат.

Моделирование входных воздействий. Для воспроизведения возмущающих воздействий и возбуждения колебательных процессов в упругих элементах конструкции и в жидком наполнении баков к корпусу КА прикладывался кратковременный внешний момент (M_x, M_y, M_z), имитирующий работу реактивных двигателей [8]. Тестовые воздействия представляли собой моменты различного знака и величины, прикладываемые по ортогональным осям связанной с КА системы координат. Аналогичные сеансы моделирования проводились и для линейных воздействий (F_x, F_y, F_z). При этом были воспроизведены различные конфигурации изделия – разные уровни наполненности баков топлива и горючего, а также разные углы поворота солнечных батарей.

В результате были выявлены случаи взаимовлияния упругих и гидродинамических колебаний, и проанализированы возникающие при этом особенности динамики движения КА. Также сделаны выводы о необходимости учета данных особенностей при создании системы управления движением аналогичными изделиями.

Заключение. В работе рассматривался тяжелый космический аппарат, оснащенный поворотными солнечными батареями, а также баками низкого давления, содержащие компоненты топлива со свободной поверхностью. С помощью специальной программной среды проведено имитационное моделирование углового и линейного движений аппарата, как для различных его конфигураций, так и для различных типов внешних воздействий. В ходе исследования выявлены случаи взаимовлияния гидродинамических и упругих колебаний. На основании полученных данных сделаны выводы об особенностях разработки системы управления движением рассматриваемого объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Афанасьев И.**, Перспективный транспортный корабль нового поколения. Новости космонавтики, 2014. - № 9.
2. Prospective Piloted Transport System, PPTS / ACTS: RussianSpaceWeb.com. URL: <http://www.russianspaceweb.com/ppts.html> (дата обращения: 30.01.2023).
3. **Колесников К.С.** Жидкостная ракета как объект регулирования. Москва: Машиностроение, 1969.
4. **Хунг Н., Темнов А.Н.** Задачи динамики космических конструкций с жидким топливом, вытекающим из сферических емкостей. Инженерный журнал: наука и инновации, 2016, вып. 5.
5. **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.

6. **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.
7. **Меркурьев С.А.** Методика отработки алгоритмов управления угловым движением космических аппаратов // Инженерный журнал: наука и инновации, 2020, вып. 6. DOI 10.18698/2308-6033-2020-6-1990
8. **Сумароков А.В.** Об управлении движением многоцелевого лабораторного модуля с помощью реактивных двигателей на активном участке полета // Навигация и управление движением. Материалы XIV конференции молодых ученых 2012. С. 157-164.

S.A. Mercuryev (RSC “Energia”, Korolev; The Bauman Moscow State Technical University, Moscow). **The research of flexible and hydrodynamic oscillations cross-coupling of a heavy spacecraft.**

Abstract. A heavy spacecraft with low pressure propellant tanks and turning solar panels is considered. The paper provides a research of the oscillations that are generated by flexibility of solar panels construction and flapping of propellant surface in low pressure tanks. The conclusions of controllability of the object under consideration are given.

УДК 629.78

Е. В. САРАНЧЕНКОВА

(Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва, г. Королёв, МО)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ БАКА ГОРЮЧЕГО НА КОЛЕБАНИЯ ЖИДКОГО НАПОЛНЕНИЯ В ОКИСЛИТЕЛЕ РАЗГОННОГО БЛОКА

Рассматривается начало активного участка полета орбитального блока, характеризующееся возникновением в баке окислителя разгонного блока автоколебаний жидкости. Амплитуда этих колебаний близка к предельным значениям, при которых происходит срыв стоячей волны на поверхности жидкости. Предложен способ демпфирования колебаний жидкости в баке окислителя путем изменения геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости в баке горючего. Проведенное исследование показало, что значение геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости в баке горючего необходимо подбирать таким образом, чтобы положение центра масс орбитального блока оказалось выше свободной поверхности жидкости в баке окислителя.

Введение. При движении орбитального блока (ОБ) на активном участке полета колебания жидкого наполнения топливных баков разгонного блока (РБ) семейства типа Д приводят к возникновению поперечных колебаний ОБ с частотой, близкой к частоте собственных колебаний жидкости. Это влечет за собой дополнительные возмущающие усилия на корпус ОБ [1].

В настоящее время для подавления колебаний жидкого наполнения топливных баков применяются амплитудная и фазовая стабилизация колебаний жидкости в баках РБ. Фазовую стабилизацию колебаний жидкости в баках РБ (далее: фазовая стабилизация) обеспечивает автомат стабилизации, с помощью которого создается фазовое опережение в диапазоне частот, охватывающем собственные частоты колебаний жидкостей в баках РБ [2]. Применение амплитудной стабилизации заключается в установке демпфирующих внутрибаковых устройств [3], что приводит к увеличению начальной массы ОБ и усложняет изготовление топливных баков. Однако применение только фазовой стабилизации не обеспечивает демпфирования автоколебаний в баке окислителя РБ на начальных этапах активного участка полета. Особенно ярко эта проблема проявляется при выведении полезных грузов малой массы (около 2 тонн), т.к. в этом случае центр масс ОБ вдоль продольной оси расположен ниже уровня свободной поверхности жидкости в баке окислителя на начальном этапе полета ОБ, что приводит к невыполнению условия фазовой стабилизации [1, 2].

Цель данной работы: предложить способ демпфирования автоколебаний в баке окислителя, возникающих вследствие невыполнения условия фазовой стабилизации [1], путем изменения геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости бака горючего, не прибегая к изменению начального объема топлива в баках РБ.

Влияние гидродинамических параметров бака горючего на колебания жидкого наполнения бака окислителя.

Условие, при выполнении которого для каждого конкретного бака можно создать фазовое опережение с помощью автомата стабилизации, описывается следующей формулой [2]:

$$(t - 1) > 0, \quad (1)$$

где t – гидродинамический параметр, равный

$$t = \lambda(x_{\text{ЦМ}} - \bar{\eta}), \quad (2)$$

где $x_{\text{ЦМ}}$ – смещение центра масс ОБ относительно поперечной плоскости, проходящей через нижнюю теоретическую вершину бака горючего; λ – собственное значение краевой задачи для уравнения Лапласа о возмущенном движении жидкости в гравитационном поле [2, 4] в баке

конкретной конфигурации; $\bar{\eta}$ – плечо приложения гидродинамических сил в баке, соответствующее собственной функции краевой задачи с этим собственным значением [3].

Для уменьшения амплитуд колебаний жидкости в работе предлагается способ их демпфирования при помощи изменения гидродинамического параметра μ – геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости бака горючего, например путем изменения геометрических размеров бака, т.к.

$$\mu \approx \frac{\pi(r_{out}^4 - r_{in}^4)}{4}, \quad (3)$$

где: r_{out} , r_{in} – внешний и внутренний радиусы свободной поверхности жидкости в баке горючего.

Исследование показало, что изменение рассматриваемой характеристики влияет на положение центра масс ОБ: чем меньше μ , тем выше положение центра масс ОБ вдоль продольной оси ОБ. Следовательно, зависящий от $x_{ЦМ}$ гидродинамический параметр (2) жидкости в баке окислителя может быть увеличен путем уменьшения геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости бака горючего. Проведенное математическое моделирование движения ОБ показало, что увеличение гидродинамического параметра (2) для бака окислителя, входящего в критерий фазовой стабилизации (1), приводит к уменьшению амплитуды автоколебаний, возникающих в этом баке, вследствие расширения области применимости фазовой стабилизации (выполнения условия фазовой стабилизации на данном участке полёта ОБ).

Полученные результаты объясняются тем фактом, что фазовое опережение, реализуемое с помощью автомата стабилизации в диапазоне частот собственных колебаний свободных поверхностей жидкостей, применимо для топливных баков, свободные поверхности жидкостей которых лежат ниже центра масс ОБ [2].

Заключение. В докладе предложен способ стабилизации автоколебаний жидкости в баке окислителя, возникающих вследствие невыполнения условия фазовой стабилизации, путем изменения геометрического момента инерции свободной поверхности жидкости бака горючего таким образом, чтобы положение центра масс ОБ оказалось выше свободной поверхности жидкости в баке окислителя. Применение предложенного метода стабилизации колебаний жидкости в баках РБ позволит повысить точность выведения ОБ, не прибегая к изменению начального объема топлива в баках РБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Разыграев А.П.** Основы управления полетом космических аппаратов и кораблей; Москва: Машиностроение, 1977
2. **Абгарян К.А., Рапопорт И.М.** Динамика ракет; М.: Машиностроение, 1969
3. **Колесников К.С.** Жидкостная ракета как объект регулирования, Москва: Машиностроение, 1969
4. **Колесников К.С.** Динамика ракет. М.: Машиностроение, 2003

E.V.Saranchenkova (Korolev, Moscow area; S.P.Korolev Rocket and Space Corporation Energia). **Research of the hydrodynamic parameters of the fuel tank influence on the fluctuations of the liquid filling of the oxidizer tank of the upper stage**

Abstract. The beginning of the active part of the flight of the orbital block is characterized by the occurrence of liquid self-oscillations in the oxidizer tank of the upper stage, the amplitude of which is close to the limit values. When the maximum amplitude is reached, a standing wave breaks on the surface of the liquid. In this paper, a method is proposed for damping the vibrations of a liquid in an oxidizer tank by changing the geometric moment of inertia of the free surface of the liquid in the fuel tank. The conducted research has shown that the optimal value of the geometric moment of inertia of the free surface of the liquid in the fuel tank must be selected in such a way that the position of the center of mass of the orbital block is higher than the free surface of the liquid in the oxidizer tank.

УДК 681.51

И. С. ТРЕНЁВ

(Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва)

ЛИНЕАРИЗАЦИЯ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОСЕТЕЙ

Предложен нейросетевой регулятор для широкого класса нелинейных систем, включая динамические системы в канонической форме Бруновского и обладающие свойствами кососимметричности и ограниченными нелинейностями. Рассмотрен пример применимости предложенного регулятора для управления положением магнита над электромагнитом. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие эффективность предложенного подхода.

Введение. Поскольку линеаризация основана на точном знании нелинейностей системы, возможности ее применения в задачах управления реальными системами сильно ограничены. Чтобы гарантировать существование решения замкнутой системы, нелинейности должны удовлетворять определенным условиям, при этом для методов линеаризации системы управления с обратной связью важным фактором является управляемость [1]. В работе представлено несколько адаптивных схем, учитывающих линейную параметрическую неопределенность, что позволяет ослабить ограничения на согласованность моделей [2]. Благодаря свойствам универсального приближения, нейронные сети используются для аппроксимации нелинейностей, что означает, что знание точных значений параметров модели не требуется [3]. Далее предполагается, что все компоненты вектора состояния измеримы [4].

Постановка задачи. В докладе исследуется возможность построения следящего регулятора с помощью аппроксимации неизвестных функций нейронными сетями. Предполагается, что для широкого класса динамических систем при описании нелинейностей может быть использована форма Бруновского и приняты в рассмотрение свойство кососимметричности и ограниченность нелинейных функций. Рассмотрен пример применимости этого регулятора для управления положением магнита над электромагнитом.

Каноническая форма Бруновского. Каноническая форма Бруновского определяет особую форму нелинейной динамики непрерывного времени

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3, \\ \dots\dots\dots \\ \dot{x}_n = f(x) + g(x)u, \\ y = h(x), \end{cases} \quad (1)$$

где $f, g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ – неизвестные гладкие функции, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in \mathbb{R}^n$ – вектор пространства состояний, $u \in \mathbb{R}$ – управление, $y \in \mathbb{R}$ – выход [5].

Следящий регулятор и динамика ошибок. Линеаризация обратной связью будет использоваться для отслеживания выхода. Цель отслеживания описывается следующим образом: при заданном выходе $y_d(t)$ найти управляющее воздействие $u(t)$ такое, что из $y(t) = x_1(t)$ следует желаемая траектория с приемлемой точностью, с ограничениями на компоненты вектора состояния и элементы управления [6]. Отфильтрованная ошибка слежения будет иметь следующий вид:

$$r = \Lambda^T e, \quad (2)$$

Научный руководитель: к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Юрченков А.В.

где $e = x - x_d$ – ошибка приближения вектора состояния, $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}, 1)^T$ – вектор коэффициентов: полином $s^{n-1} + \lambda_{n-1}s^{n-2} + \dots + \lambda_1$ асимптотически устойчив.

Аппроксимация неизвестных функций нейронными сетями. Нейросетевой регулятор слежения имеет вид:

$$u = \begin{cases} u_c + \frac{u_r - u_c}{2} \varepsilon^{\gamma(|u_c - s|)}, & \text{если } \hat{g} \geq g_l, |u_c| \leq s, \\ u_r - \frac{u_r - u_c}{2} \varepsilon^{-\gamma(|u_c - s|)}, & \text{иначе,} \end{cases} \quad (4)$$

$$u_c = \frac{1}{\widehat{W}_g^T \sigma(\widehat{V}_g^T x)} (\widehat{W}_f^T \sigma(\widehat{V}_f^T x) + v),$$

где $\dot{\widehat{W}}_f = M_f (\widehat{\sigma}_f - \widehat{\sigma}_f \widehat{V}_f^T + fx)r - \alpha |r| M_f \widehat{W}_f$, $\dot{\widehat{V}}_f = N_f r x \widehat{W}_f^T \widehat{\sigma}_f - \alpha |r| N_f \widehat{V}_f$,

$$\dot{\widehat{W}}_g = \begin{cases} M_g (\widehat{\sigma}_g - \widehat{\sigma}_g \widehat{V}_g^T) u_c r - \alpha |r| \|u_c\| \widehat{W}_g, & \text{если } \hat{g} \geq g_l, |u_c| \leq s, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$\dot{\widehat{V}}_g = \begin{cases} N_g u_c r x \widehat{W}_g^T \widehat{\sigma}_g - \alpha |r| \|u_c\| N_g \widehat{V}_g, & \text{если } \hat{g} \geq g_l, |u_c| \leq s, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad \text{– законы обновления весов нейрон-}$$

ных сетей [7, 8], $Y_d = -x_d^{(n)} + \Lambda^T e$ – производная отфильтрованной ошибки слежения,

$u_r = -\mu \frac{|\hat{g}|}{g_l} |u_c| \text{sign}(r)$ – робастная составляющая, $K_N, K_z > 0$, Θ_m – ограничение на неизвестные нормы целевых весов [9], M, N – положительно определенные симметрические матрицы, $\alpha > 0, s > 0, \gamma < \ln \frac{2}{s}, \mu \geq 2$.

Моделирование. Рассмотрим систему управления положением магнита, подвешенного над электромагнитом. Уравнение движения для этой системы имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -g + \frac{\alpha}{M} i^2(t) - \frac{\beta}{M} x_2, \end{cases} \quad (5)$$

где $x_1(t)$, м – расстояние над электромагнитом; $i(t)$, А – ток, протекающий в электромагните; M , кг – масса магнита; g , м/с² – гравитационная постоянная; β , Па·с – коэффициент вязкого трения; α , В/м – напряженность поля. На рис. 1 представлены результаты моделирования, где красный график – желаемая траектория; синий график – приближение с помощью нейросетей [10]. Из результатов моделирования видно, что построенный на основе аппроксимации неизвестных функций регулятор может быть использован для расчета управляющего воздействия, и получения желаемой траектория с приемлемой точностью.

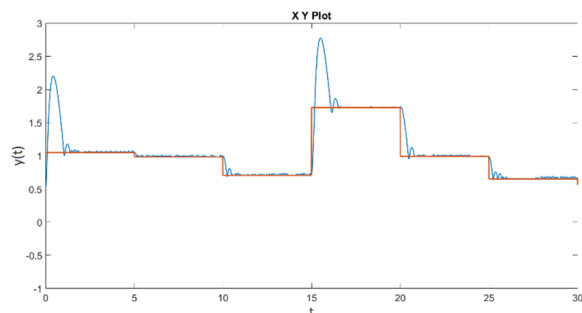


Рис. 1. Результаты моделирования

Заключение. В докладе рассмотрены возможности применения нейронных сетей для управления нелинейными объектами. Предложен нейросетевой регулятор для широкого класса нелинейных систем, включая динамические системы в канонической форме Бруновского и обладающие свойствами кососимметричности и ограниченными нелинейностями. Рассмотрен пример применимости этого регулятора для управления положением магнита над электромагнитом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Charlet, B., Levine, J. and Marino, R. (1989). On dynamic feedback linearization. *Systems and Control Letters*, 13(2), pp. 143–151.
2. Ge, S.S., Hang, C.C., Lee, T.H. and Zhang, T. (2013). *Stable adaptive neural network control*. Springer Science and Business Media.
3. Campion, G. and Bastin, G. (1990). Indirect adaptive state feedback control of linearly parameterized nonlinear systems. *Int. J. Control Signal Proc.*, 4, pp.345–358.
4. Cui, R., Yang, C., Li, Y. and Sharma, S. (2017). Adaptive neural network control of AUVs with control input nonlinearities using reinforcement learning. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(6), pp.1019–1029.
5. Yesildirek, A. and Lewis, F.L. (1995). Feedback linearization using neural networks. *Automatica*, 31(11), pp.1659–1664.
6. Hauser, J., Sastry, S. and Kokotovic P. (1992) Nonlinear control via approximate input-output linearization. *IEEE Trans. Automat. Control*, 37(3), pp. 392-398,
7. Ge, S.S. (1996). Robust adaptive NN feedback linearization control of nonlinear systems. *International journal of systems science*, 27(12), pp. 1327–1338.
8. Lewis, F.W., Jagannathan, S. and Yesildirak, A. (2020). *Neural network control of robot manipulators and non-linear systems*. CRC press.
9. Krener, A.J. (1999). Feedback linearization. *Mathematical control theory*, pp. 66–98.
10. Demuth, H., Beale, M., and Hagan, M. (1992). Neural network toolbox. For Use with MATLAB. *The MathWorks Inc.*

I.S. Trenev (Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow). **Feedback linearization control of non-linear system**

In this work, a neural network controller is developed for a wide class of nonlinear systems including dynamic systems in the Brunovsky canonical form and having skew-symmetry properties and bounded nonlinearities. An example of the applicability of this controller to control the position of a magnet over an electromagnet is considered. The modeling has been provided through the Simulink environment.

Е. А. КОПЫСОВА
(ИПМаш РАН, Санкт-Петербург)

МОДИФИКАЦИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЗАКОНОВ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РЕГУЛИРОВАНИЯ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

Рассматривается нелинейный закон управления, полученный из линейного закона путем применения к каждой компоненте вектора состояния нелинейного преобразования. Для исследования таких систем предлагается рассмотреть нечетные функции в виде произведения нелинейного углового коэффициента на аргумент. Такое преобразование позволит использовать аппарат линейных матричных неравенств (ЛМН) для анализа устойчивости получившихся замкнутых систем. Показано, что использование предложенных нелинейных законов управления позволяет уменьшить установившуюся ошибку по сравнению с линейным.

Введение. В теории автоматического управления существует практика использования различных нелинейных функций, замещающих или дополняющих существующие законы управления. Например, знаковые законы управления аппроксимируются сигмоидальными функциями [4,5] для практической реализации, а также для возможности избавиться от хаотичных высокочастотных колебаний в окрестности плоскости скольжения и исследования замкнутой системы без разрывных нелинейностей. В [1,2] для уменьшения установившейся ошибки слежения ранее разработанный закон управления [3] используют дополнительное нелинейное преобразование типа гиперболического тангенса. В данном докладе, на базе результата [6] предложен общий метод выбора нелинейного закона управления, позволяющего улучшить точность регулирования в установившемся режиме в сравнении с тем, когда нелинейные функции не использовались.

Постановка задачи. Рассмотрим линейный объект

$$\dot{x} = Ax + Bu + Df \quad (1)$$

где: $x = \text{col}\{x_1, \dots, x_n\}$ – вектор состояния, $u \in \mathbb{R}$ – сигнал управления, $f \in \mathbb{R}^l$ – неизвестное возмущение такое, что $|f| \leq \bar{f}$, A, B и D известны и имеют соответствующие размерности, пара (A, B) управляема.

Известно [5], что существует матрица $K = [k_1, \dots, k_n]$ такая, что закон управления

$$u = Kx = k_1x_1 + \dots + k_nx_n \quad (2)$$

гарантирует выполнение предельного неравенства

$$\overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} |x(t)| \leq \delta, \quad (3)$$

где $\delta > 0$ – ошибка регулирования в установившемся режиме.

Согласно [6], введем в рассмотрение нечетную функцию $\varphi(\cdot)$. С учетом этой функции и (2), построим новый закон управления

$$u = k_1\varphi(x_1) + \dots + k_n\varphi(x_n). \quad (4)$$

Требуется определить условия на функцию $\varphi(\cdot)$, при которых при заданной матрице K в (2) закон управления (4) обеспечит выполнение предельного неравенства (3) с ошибкой δ меньше, чем линейный закон управления (2).

Метод решения. Согласно [6], для исследования закона управления (4) рассмотрим представление нелинейной функции $\varphi(s)$ в виде $\varphi(s) = \rho(s)s$ с нелинейным угловым коэффициентом $\rho(s)$, $s \in \mathbb{R}$ (см. рис. 1). Такой подход позволит исследовать нелинейные законы управления (4) наряду с линейным (2), а также привлечь аппарат линейных матричных неравенств для анализа устойчивости замкнутой системы.

Обозначим $\psi(x) = \text{diag}\{\rho(x_1), \dots, \rho(x_n)\}$.
Подставив (4) в (1), запишем уравнение замкнутой системы

$$\dot{x} = (A + BK\psi(x))x + Df. \quad (5)$$

Теорема 1. Пусть для заданных K в (2) и $\tau_i > 0$ существуют $0 \leq \underline{\rho} = \rho_0 < \rho_1 < \dots < \bar{\rho} = \bar{\rho}$, $\chi_i > 0$, $\gamma_i > 0$ и $P_i = P_i^T > 0$ такие, что выполнены следующие матричные неравенства:

$$\begin{cases} (A + BK\psi_i)^T P_i + P_i(A + BK\psi_i) + \tau_i P_i & P_i D \\ P_i > \gamma_i I & -\chi_i I \end{cases} < 0, \quad (6)$$

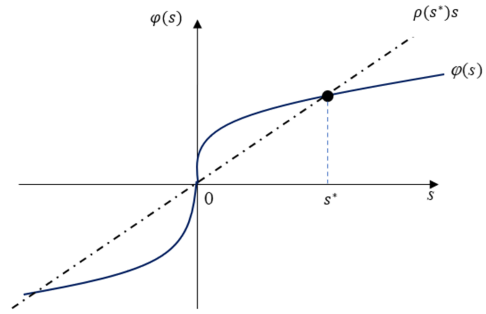


Рис. 1. Иллюстрация замены функции $\varphi(s)$ на функцию вида $\rho(s)s$

в верхних и нижних вершинах диагональной матрицы $\psi_i = \text{diag}\{\{\rho_{i-1}, \rho_i\}, \dots, \{\rho_{i-1}, \rho_i\}\}$, $i = 1, \dots, v$. Тогда область устойчивости χ , множество допустимых начальных условий χ_0 и верхняя оценка времени T вхождения в инвариантную область $|x(t)| < \varepsilon$ определяются в виде

$$\chi = \{x \in \mathbb{R}^n : \underline{x} \leq |x_i| \leq \bar{x}, i = 1, \dots, n\}, \quad (7)$$

$$\chi_0 = \left\{ x \in \mathbb{R}^n \mid |x| \leq \bar{x}_0 := \sqrt{\frac{\underline{\gamma} \bar{x}^2 - 2 \bar{x} \bar{f}}{n^2 \underline{\tau} \|\bar{P}\|}} \right\} \quad (8)$$

$$T = \frac{1}{\underline{\tau}} \ln \frac{\underline{\tau} |x(0)|^2 \|\bar{P}\| + \bar{x} \bar{f}}{\underline{\gamma} \varepsilon^2 - \bar{x} \bar{f}}, \quad (9)$$

$\underline{x} > 0$ и $\bar{x} > 0$ находятся как $s \in [-\bar{x}; -x] \cup [x; \bar{x}]$ из решения неравенств $\varphi(s) - \underline{p}s \geq 0$ и $\varphi(s) - \bar{p}s \leq 0$, $\underline{\tau} = \min_{i=1, \dots, v} \{\|\tau_i\|\}$, $\underline{\gamma} = \min_{i=1, \dots, v} \{\gamma_i\}$, $\bar{\chi} = \max_{i=1, \dots, v} \{\chi_i\}$ и $\|\bar{P}\| = \max_{i=1, \dots, v} \{\|P_i\|\}$.

Доказательство. Для анализа устойчивости замкнутой системы выберем функции Ляпунова

$$V_i = x^T P_i x, \quad i = 1, \dots, v, \quad (10)$$

потребуем, чтобы выполнялись следующие условия

$$\dot{V}_i + \tau_i V_i - \chi_i f^T f < 0, \quad i = 1, \dots, v \quad (11)$$

Подставляя (5) и (10) в (11), получим

$$x^T \left[(A + BK\psi_i(x))^T P_i + P_i(A + BK\psi_i(x)) \right] x + 2x^T P_i D f + \tau_i x^T P_i x - \chi_i f^T f < 0, \quad (12)$$

$$i = 1, \dots, v$$

Вводим новый вектор $z = \text{col}\{x, f\}$ и перепишем (12) как

$$z^T \begin{bmatrix} \Psi(x)_{11,i} & P_i D \\ * & -\chi_i I \end{bmatrix} z < 0, \quad i = 1, \dots, v, \quad (13)$$

где $\Psi(x)_{11,i} = (A + BK\psi_i(x))^T P_i + P_i(A + BK\psi_i(x)) + \tau_i P$

Неравенство (13) будет выполнено, если выполняется условие

$$\begin{bmatrix} \Psi(x)_{11,i} & P_i D \\ * & -\chi_i I \end{bmatrix} < 0, \quad i = 1, \dots, v. \quad (14)$$

Элементы диагональной матрицы $\Psi_i(x)$ принадлежат отрезку $[\rho_{i-1}, \rho_i]$. Из этого следует, что ЛМН (14) содержит политопную неопределенность. Согласно лемме [7], такое неравенство будет выполнено, если оно будет выполнено в вершинах политопы $[\rho_{i-1}, \rho_i]$. Значит, замкнутая система (6) устойчива.

Пусть для любых $\underline{x} > 0$ и $\bar{x} > 0$ выполнены неравенства $\varphi(s) - \underline{p}s \geq 0$ и $\varphi(s) - \bar{p}s \leq 0$. Тогда \underline{x} и \bar{x} будут нижней и верхней оценками множества устойчивости, записанного в виде (7). Запишем решение неравенства

$$\underline{\gamma}|x|^2 < x^T P_i x < \frac{\bar{x}\bar{f}}{\underline{\tau}} + \left(|\bar{P}|\bar{x}_0^2 + \frac{\bar{x}\bar{f}}{\underline{\tau}} \right) e^{-\pi t}, \quad i = 1, \dots, u. \quad (15)$$

Учитывая (7) и (15) и приняв $\underline{\gamma}n^2\bar{x}^2 = \frac{2\bar{x}\bar{f}}{\underline{\tau}} + \|\bar{P}\|\bar{x}_0^2$, получим результат (8).

Верхняя оценка времени T пр котором $|x(t)|$ попадут в заданную область $|x(t)| < \varepsilon$ и больше ее не покинут, определяется в виде (9) из (15).

Заключение. В работе предложен общий метод выбора нелинейного закона управления, полученный из линейного закона путем применения к каждой компоненте вектора состояния нелинейного преобразования. Определены условия на нелинейную функцию, при которых возможно использовать нелинейный закон управления без изменения заданных параметров и обеспечат меньшую ошибку регулирования по сравнению с использованием линейного закона управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов А.С., Краснова С.А., Уткин В.А. Синтез инвариантных нелинейных одноканальных систем слежения с сигмоидальными обратными связями с обеспечением заданной точности слежения Большие отклонения в линейных системах при ненулевых начальных условиях // Автоматика и телемеханика.
2. Краснова С.А., Антипов А.С. Иерархический синтез сигмоидальных обобщенных моментов манипулятора в условиях неопределенности // Проблемы управления. – 2016. – № 4. – С. 10–21.
3. Краснова С.А., Уткин В.А. Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем. – М.: Наука, 2006.
4. Краснова С.А., Уткин А.В. Сигма-функция в задачах синтеза наблюдателей состояний и возмущений // Проблемы управления. – 2015. – № 5. – С. 27–36.
5. Халил Х.К. Нелинейные системы. – М-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2009.
6. Furtat I.B. Nonlinear control laws based on linear ones using odd functions // arXiv:2112.14131. 2021. <https://arxiv.org/pdf/2112.14131.pdf>
7. Nekhoroshikh, A.N., Efimov, D., Polyakov, A., Perruquetti, W., Furtat, I.B. On finite-time stabilization of a class of nonlinear time-delay systems: Implicit Lyapunov-Razumikhin approach // Proc. IEEE Conference on Decision and Control, 2020. P. 1975-1980.

Е.А. Копысова, (Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg).
Modification of linear control laws to improve the quality of regulation in steady-state mode

Abstract. The report considers a nonlinear control law obtained from a linear one by passing each component of the state vector through a nonlinear function. To study such systems, it is proposed to represent nonlinear functions in the form of linear one with a nonlinear angular coefficient. Such a representation will allow using the apparatus of linear matrix inequalities (LMI) to study the stability of closed systems.

It is shown that the use of the proposed nonlinear control laws makes it possible to reduce the steady-state error in comparison with the linear one.

УДК 681.51

Б.Х. НГУЕН

(Институт проблем машиноведения РАН, Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

УПРАВЛЕНИЕ ЛИНЕЙНЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА БАЗЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ С ГАРАНТИЕЙ НАХОЖДЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОЙ ПЕРЕМЕННОЙ В ЗАДАННОМ МНОЖЕСТВЕ

Предложен метод синтеза закона управления линейными объектами на базе наблюдателя с гарантией нахождения выходных сигналов в заданных множествах. Для решения данной задачи использовано преобразование координат, позволяющее свести задачу с ограничениями к задаче без ограничений. Закон управления синтезирован с помощью наблюдателя Люенбергера. Результаты моделирования иллюстрируют эффективность предложенного метода.

Введение. В работах [1-3] рассмотрены новые задачи управления с обеспечением ограничения переходных процессов регулируемых сигналов в некоторых трубках, заданных разработчикам по требованиям к работе системы. Для решения таких задач в указанных работах предложен новый метод на основе специальной замены координат, позволяющий свести задачу с ограничениями к новой задаче без ограничений. В то же время законы управления синтезированы в предположении, что вектор состояния является измеряемым. Настоящий доклад посвящен разработке нового метода управления линейными системами на базе наблюдателя Люенбергера [4] при условии, что измерению доступен только выход системы.

Основная часть. Рассмотрим линейную систему

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu + Df, \\ y &= Lx,\end{aligned}\tag{1}$$

где $t \geq 0$ $x \in \mathbb{R}^n$ – не-измеряемый вектор состояния, $u \in \mathbb{R}$ – сигнал управления, $y \in \mathbb{R}$ – измеряемый выходной сигнал, $f \in \mathbb{R}^l$ – неизвестное возмущение такое, что $|f(t)| \leq \bar{f}$; матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $L \in \mathbb{R}^{1 \times n}$, $D \in \mathbb{R}^{n \times l}$ известны. Система (1) наблюдаема и управляема.

Цель работы - разработка закона управления, гарантирующего нахождение выходного сигнала $y(t)$ объекта (1) в следующем множестве

$$\mathcal{Y} = \{y \in \mathbb{R}: \underline{g}(t) < y(t) < \bar{g}(t)\} \text{ для любых } t \geq 0,\tag{2}$$

где $\underline{g}(t)$ и $\bar{g}(t)$ – ограниченные дифференцируемые функции вместе с ограниченными первыми производными по времени.

Метод решения. Рассмотрим преобразование вида

$$y(t) = \Phi(\varepsilon(t), t),\tag{3}$$

где $\varepsilon(t) \in \mathbb{R}$ – дифференцируемая функция по времени t .

Пусть $\hat{x}(t)$ – вектор состояния наблюдателя Люенбергера вида

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + Bu + K_o(y - \hat{y}), \\ \hat{y} &= L\hat{x},\end{aligned}$$

где K_o выбирается так, чтобы матрица $A - K_oL$ была гурвицева.

Зададим закон управления в виде

$$u = -(LB)^{-1}[K\varepsilon + LA\hat{x}],\tag{4}$$

Научный руководитель: д.т.н., проф. Фуртат И.Б.

где K – коэффициент управления.

Теорема 1 [5]. Пусть для системы (1) существует преобразование (3) с условиями $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} > 0$ и $\left| \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right| < \gamma$ для любых ε и t . Если для заданного $c > 0$ существуют число K и коэффициенты $\tau_i > 0, i = 1, \dots, 4$ такие, что выполнены следующие линейные матричные неравенства

$$\begin{bmatrix} -K + \tau_1 & \frac{1}{2}LD & \frac{1}{2}LA & -\frac{1}{2} \\ * & -\tau_2 I & O & O \\ * & * & -\tau_3 I & O \\ * & * & * & -\tau_4 \end{bmatrix} \leq 0, \quad (5)$$

$$-2c\tau_1 + \bar{f}^2\tau_2 + \sigma^2\tau_3 + \gamma^2\tau_4 \leq 0,$$

где “*” определяет симметричный блок соответствующей матрицы, I, O – единичная и нулевая матрицы соответствующей размерности, тогда закон управления (4) обеспечивает выполнение целевого условия (2).

Численное моделирование. Рассмотрим объект (1) со следующими параметрами:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0,1 & 2 & -3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, L = [2 \quad 1 \quad 1], \quad (6)$$

$$f(t) = 0.1 + \sin(3t) + \text{sat}(d(t)),$$

где $\text{sat}\{\cdot\}$ – функция насыщения с уровнем насыщения 1, $d(t)$ – белый шум с интенсивностью 0,1 и временем выборки 0,1.

Функция $\Phi(\varepsilon, t)$ задана как

$$\Phi(\varepsilon, t) = \frac{\bar{g}(t)e^\varepsilon + \underline{g}(t)}{e^\varepsilon + 1}, \quad (7)$$

где $\bar{g}(t) = 3.52e^{-0.5t} + 0.1$, $\underline{g}(t) = 1.62e^{-0.5t} - 0.1$.

При $c = 50$ найдем $K = 2.59$. При $c = 0,05$ найдем $K = 154.23$. Переходные процессы при двух различных значениях $c = 50$ и $c = 0,05$ по выходу $y(t)$ и ошибке оценивания состояния $\tilde{x}(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ при $x(0) = \text{col}\{\frac{5}{3}, \frac{2}{3}, -1\}$ приведены на рис. 1. Результаты моделирования показывают, что несмотря на то, что ошибка оценивания состояния не сходится к нулю, выходной сигнал всегда находится в заданном множестве.

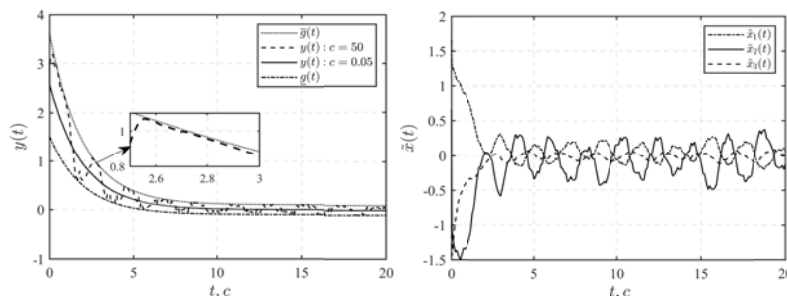


Рис. 1. Переходные процессы по $y(t), \tilde{x}(t)$ при $c = 50$ и $c = 0,05$ в замкнутой системе.

Заключение. В работе предложен новый метод управления на базе наблюдателя линейными объектами с гарантией нахождения выходного сигнала в заданном множестве. Предложенный метод позволяет синтезировать закон управления, используя наблюдатель состояний системы, причем ошибка оценивания не сходится к нулю. Полученные результаты, проверенные моде-

лированием, подтвердили теоретические выводы и доказали эффективность разработанного метода. Предложенный метод рекомендуется использовать в задачах управления электроэнергетической сетью и управление процессом поддержания пластового давления и т.д.

Исследование выполнено в ИПМаш РАН при поддержке госзадания № 121112500298-6 (ЕГИСУ НИОКТР).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Фуртат И.Б., Гушин П.А.** Управление динамическими объектами с гарантией нахождения регулируемого сигнала в заданном множестве // Автоматика и телемеханика. 2021. № 4. С. 121–139.
2. **Furtat I., Gushchin P.** Nonlinear feedback control providing plant output in given set // International Journal of Control. 2021. <https://doi.org/10.1080/00207179.2020.1861336>
3. **Furtat I., Gushchin P.** Control of Dynamical Systems with Given Restrictions on Output Signal with Application to Linear Systems // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53, no. 2. P. 6384-6389.
4. **Davis J.H.** Luenberger Observers. In: Foundations of Deterministic and Stochastic Control. Systems & Control: Foundations & Applications. Birkhäuser, Boston, MA. 2002. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0071-0_8
5. **Нгуен, Б.Х., Фуртат, И.Б., Нгуен К.К.** Управление линейными объектами на базе наблюдателей с гарантией нахождения регулируемой переменной в заданном множестве, Дифференциальные уравнения и процессы управления, № 4, 2022, стр. 95–104.

В.Н. Nguyen (IPME RAS, ITMO University, Saint Petersburg). **Observer-based control of linear plants with a guarantee of belonging of output to a given set**

Abstract. We propose a new method for synthesizing observer-based control of linear plants with a guarantee of the belonging of output signal in given set. To solve this problem, a well-known coordinate transformation is used to reduce a problem with constraints to the problem without constraints. The control law was synthesized using the Luenberger observer. The simulation results illustrate the effectiveness of the proposed method.

УДК 681.51

Б.Х. НГУЕН

(Институт проблем машиноведения РАН, Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

УПРАВЛЕНИЕ ОБЪЕКТАМИ С СЕКТОРНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ С ГАРАНТИЕЙ НАХОЖДЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМОЙ ПЕРЕМЕННОЙ В ЗАДАННОМ МНОЖЕСТВЕ

Предложен метод синтеза управления для объектов с секторной нелинейностью с гарантией нахождения выходных сигналов в заданных множествах. Для решения данной задачи использовано преобразование координат, позволяющее свести задачу с ограничениями к задаче без ограничений. Закон управления синтезирован с помощью техники линейных матричных неравенств (ЛМН). Результаты моделирования иллюстрируют эффективность предложенного метода.

Введение. На практике широко распространены задачи управления нелинейными системами. Среди них часто исследуются объекты с секторной нелинейностью. Примерами таких систем могут быть колебательные системы, электромеханические объекты, манипуляторы, электроэнергетические сети, и т.д. Существует большое количество работ, посвященных управлению такими системами, например, см. [1-3]. Однако в этих работах удается обеспечить заданное качество регулирования только в установившемся режиме. В работах [4-6] предложен метод, позволяющий гарантировать нахождение выхода в некотором заданном множестве. Предлагаемый доклад посвящен управлению с гарантией заданного качества выходного сигнала в любой момент времени с использованием метода [4-6].

Синтез закона управления. Рассмотрим нелинейную систему

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + G\phi(x(t)) + Df(t), \\ y(t) &= Lx(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где $t \geq 0$, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ – измеряемый вектор состояния, $u(t) \in \mathbb{R}$ – сигнал управления, $y(t) \in \mathbb{R}$ – выходной сигнал, $f(t) \in \mathbb{R}^l$ – неизвестное возмущение такое, что $|f(t)| \leq \bar{f}$ матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times 1}$, $L \in \mathbb{R}^{1 \times n}$, $G \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $D \in \mathbb{R}^{n \times l}$ известны. Система (1) наблюдаема и управляема. $\phi(x) \in \mathbb{R}^n$ – неизвестная нелинейная функция, которая удовлетворяет условию секторного ограничения для любых $x(t) \in \mathbb{R}^n$, т.е. $|\phi(x(t))| \leq M|x(t)|$, $M > 0$ – известная константа.

Цель работы - разработка закона управления, гарантирующего нахождение выходного сигнала $y(t)$ объекта (1) в следующем множестве

$$\mathcal{Y} = \{y \in \mathbb{R}: \underline{g}(t) < y(t) < \bar{g}(t)\} \text{ для любых } t \geq 0, \quad (2)$$

где $\underline{g}(t)$ и $\bar{g}(t)$ – непрерывные ограниченные функции вместе со своими первыми производными по времени.

Метод решения. Рассмотрим замену координат вида

$$y(t) = \Phi(\varepsilon(t), t), \quad (3)$$

где $\varepsilon(t) \in \mathbb{R}$ – дифференцируемая функция по времени t .

Зададим закон управления как

$$u = -(LB)^{-1}[K\varepsilon + LAx + M\text{sign}(\varepsilon)\|LG\| |x|], \quad (4)$$

где K – коэффициент управления, функция $\text{sign}(\varepsilon)$ определяется как

$$\text{sign}(\varepsilon) = \begin{cases} -1, & \varepsilon < 0, \\ 1, & \varepsilon \geq 0. \end{cases} \quad (5)$$

Научный руководитель: д.т.н., проф. Фуртат И.Б.

Теорема 1 [7]. Пусть для системы (1) существует преобразование (3) с условиями $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} > 0$ и $\left| \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right| < \gamma$ для любых ε и t . Если для заданного числа $c > 0$ существуют K и коэффициенты $\tau_i > 0, i = 1, \dots, 3$ такие, что выполнены следующие линейные матричные неравенства

$$\begin{bmatrix} -K + \tau_1 & \frac{1}{2}LD & -\frac{1}{2} \\ * & -\tau_2 I & O \\ * & * & -\tau_3 \end{bmatrix} \leq 0, \quad (6)$$

$$-2c\tau_1 + \bar{f}^2\tau_2 + \gamma^2\tau_3 \leq 0,$$

где “*” определяет симметричный блок соответствующей матрицы, I, O – единичная и нулевая матрицы соответствующей размерности, то закон управления (4) обеспечивает выполнение целевого условия (2).

Численное моделирование. Рассмотрим объект (1) со следующими параметрами:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0,1 & 2 & -3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0,1 & 0,1 & -0,1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, L = [2 \quad 1 \quad 1], \quad (7)$$

$$f(t) = 0.1 + \sin(3t) + \text{sat}(d(t)), \varphi(x) = \sin(x),$$

где $\text{sat}\{\cdot\}$ – функция насыщения, $d(t)$ – белый шум с мощностью 0,1 и временем выборки 0,1.

Функция $\Phi(\varepsilon, t)$ задана как

$$\Phi(\varepsilon, t) = \frac{\bar{g}(t)e^\varepsilon + \underline{g}(t)}{e^\varepsilon + 1}, \quad (8)$$

где

$$\bar{g}(t) = \begin{cases} -3\cos(t) + 0,2, & t < 2\pi, \\ \cos(t) + 2,2, & t \geq 2\pi, \end{cases} \quad \underline{g}(t) = \begin{cases} 3\cos(t) - 0,2, & t < 2\pi, \\ \cos(t) + 1,8, & t \geq 2\pi. \end{cases} \quad (9)$$

При $c = 100$ найдем $K = 6.96$, при $c = 0,1$ найдем $K = 55.62$. Переходные процессы при $c = 100$ и $c = 0,1$ по выходу $y(t), u(t)$ при $x(0) = \text{col}\{\frac{5}{3}, \frac{2}{3}, -1\}$ приведены на рис. 1.

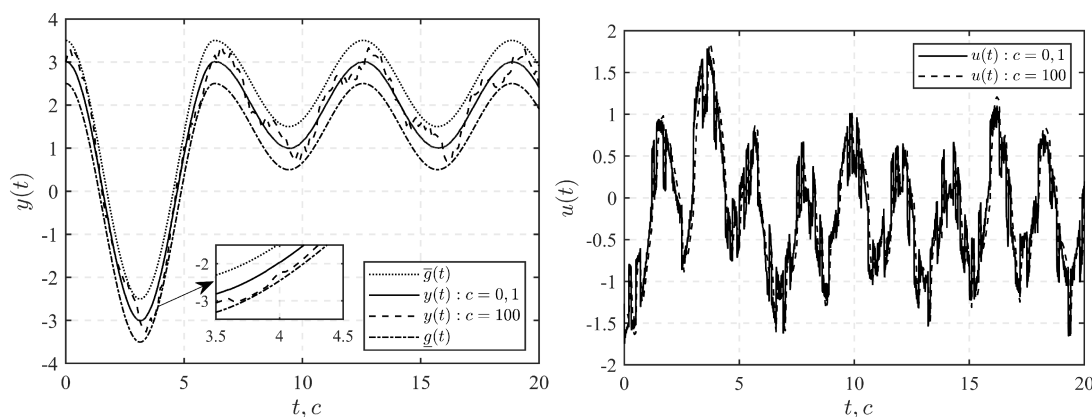


Рис. 1. Переходные процессы по $y(t), u(t)$ при $c = 100$ и $c = 0,1$ в замкнутой системе.

Заключение. В работе проверен метод управления нелинейными объектами с секторной нелинейностью и гарантией нахождения выходного сигнала в заданном множестве. В отличие от [4-6], предложенный метод позволяет рассчитать параметры регулятора с использованием техники ЛМН, что расширяет применимость полученного метода на практике. Моделирование подтвердило теоретические выводы и показало эффективность разработанного метода.

Исследование выполнено в ИПМаш РАН при поддержке госзадания № 121112500298-6 (ЕГИСУ НИОКТР).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gupta S., Joshi S. M.** Some properties and stability results for sector-bounded LTI systems, Proceedings of 1994 33rd IEEE Conference on Decision and Control, 1994, vol. 3, pp. 2973-2978.
2. **Alvergue L., Gu G., Acharya S.** A generalized sector bound approach to feedback stabilization of nonlinear control systems, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2012, vol. 23, pp. 1563-1580.
3. **Churilov A.** Stabilization of systems with sector bounded nonlinearity by a sawtooth sampled-data feedback, Cybernetics and Physics, 2019, vol. 8, pp. 222-227.
4. **Фуртат И.Б., Гущин П.А.** Управление динамическими объектами с гарантией нахождения регулируемого сигнала в заданном множестве // Автоматика и телемеханика. 2021. № 4. С. 121–139.
5. **Furtat I., Gushchin P.** Nonlinear feedback control providing plant output in given set // International Journal of Control. 2021. <https://doi.org/10.1080/00207179.2020.1861336>
6. **Furtat I., Gushchin P.** Control of Dynamical Systems with Given Restrictions on Output Signal with Application to Linear Systems // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53, no. 2. P. 6384-6389.
7. **Нгуен Б., Фуртат И.Б.** Управление объектами с секторной нелинейностью с гарантией нахождения регулируемой переменной в заданном множестве. Мехатроника, автоматизация, управление. 2022;23(7):351-355. <https://doi.org/10.17587/mau.23.351-355>

B.H. Nguyen (IPME RAS, ITMO University, Saint Petersburg). Control of plants with sector bounded nonlinearity with a guarantee of belonging of output to a given set

Abstract. We propose a new method for synthesizing control of plants with sector-bounded nonlinearity with a guarantee of the belonging of output signal in given set. To solve this problem, a well-known coordinate transformation is used to reduce a problem with constraints to the problem without constraints. The control law is synthesized using the technique of linear matrix inequalities (LMN). The simulation results illustrate the effectiveness of the proposed method.

УДК 681.51

К.К. НГУЕН
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА DREMBAO ДЛЯ НАБЛЮДАТЕЛЯ МАГНИТНОГО ПОТОКА И СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Рассматривается динамическая модель асинхронного двигателя. Предполагается, что сопротивление ротора и момент нагрузки неизвестны. Измеряемыми сигналами являются ток статора и управляющее напряжение. Применение метода расширения и смешивания динамического регрессора (DREM) позволяет получить регрессионные соотношения, на основе которых синтезируются алгоритмы оценивания сопротивления и наблюдатели магнитного потока, скорости вращения и момента нагрузки. Предлагаемый подход может быть также применен для синхронных двигателей с постоянными магнитами.

Введение. В работе рассмотрена модель электрической и механической динамики асинхронного двигателя [1, 2]. Представлен метод синтеза адаптивного наблюдателя с использованием динамического расширения и смешивания регрессора (DREMBAO) [3]. Синтезирован алгоритм оценивания сопротивления ротора и наблюдатель магнитного потока по измерениям силы тока и питающего напряжения в обмотках статора на основе электрической динамики [4, 5]. На основе полученных оценок и механической динамики построен алгоритм оценивания момента внешней нагрузки и угловой скорости вращения ротора. Показаны результаты численного моделирования.

Подстановка задачи. Рассмотрим модель асинхронного двигателя [1, 2]. Электрическая динамика описывается соотношениями:

$$\dot{\lambda} = -\left(\frac{R_r}{L_r} I_2 - n_p Y \omega\right) \lambda + R_r \beta i, \quad (1)$$

$$L_s \sigma \frac{di}{dt} = -(R_s + R_r \beta^2) i + \beta \left(\frac{R_r}{L_r} I_2 - n_p Y \omega\right) \lambda + v, \quad (2)$$

где $\lambda, i, v \in R^2$ – магнитный поток ротора, сила тока статора и управляющее напряжение соответственно, $\omega \in R$ – скорость ротора, $L_s, R_r, L_r, R_s, n_p, \sigma$ – положительные постоянные, представляющие индуктивность статора, сопротивление ротора, индуктивность ротора, сопротивление статора, количество пар полюсов и параметр рассеивания, соответственно. Для простоты обозначения, определено $\beta = \frac{M}{L_r}$, где M – взаимная индуктивность и $Y = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, I_2 – единичная матрица размерности 2×2 .

Механическая динамика, с другой стороны, имеет вид

$$J \dot{\omega} = -n_p \beta \lambda^T Y i - T_L, \quad (3)$$

где J – инерция ротора и T_L – момент нагрузки, который предполагается постоянным.

Цель состоит в том, чтобы синтезировать наблюдатель для потока ротора λ и скорости ω , предполагая, что известны электрические параметры L_s, R_s и σ и доступны измерению сила тока i и напряжение v , то есть $y = \text{col}(i, v) \in R^4$, но R_r и T_L неизвестны.

Метод решения. Для электрической динамики асинхронного двигателя (1) с измеряемыми сигналами $y = \text{col}(i, v)$ справедлива линейная регрессионное соотношение вида:

$$z(t, \alpha) = \phi^T(t, \alpha) \eta(t) + \varepsilon(t), \quad (4)$$

с вектором неизвестных параметров $\eta(t) = \text{col}(R_r, \lambda(t), R_r \lambda(t), R_r |\lambda|^2)$ и вычислимыми функциями

$$z = \rho_2, \quad \phi = \text{col}\left(\frac{2}{\alpha L_r} \rho_2 + 2\beta \rho_3; -\rho_1; \frac{2}{\alpha L_r} \rho_1 + 2\beta \mathcal{H}[i]; -\frac{2}{L_r}\right), \quad (5)$$

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

где использованы вспомогательные переменные

$$\begin{aligned}\mu_1 &= \frac{2}{\alpha\beta^2} \mathcal{H}[i^\top \mathcal{H}[v] + v^\top \mathcal{H}[i]], \quad \mu_2 = \frac{2L_s}{\alpha\beta^2} \left(\mathcal{H}[v]^\top \dot{\mathcal{H}}[i] + \mathcal{H} \left[v^\top \dot{\mathcal{H}}[i] - \frac{1}{\alpha} \dot{\mathcal{H}}[v]^\top \dot{\mathcal{H}}[i] \right] \right), \\ \mu_3 &= -\frac{2}{\alpha\beta^2} \mathcal{H}[i^\top \mathcal{H}[i]], \quad \mu_4 = -\frac{2}{\alpha\beta^2} \left(\mathcal{H} \left[i^\top \dot{\mathcal{H}}[i] \right] + \mathcal{H}[i]^\top \dot{\mathcal{H}}[i] - \frac{1}{\alpha} \mathcal{H} \left[|\dot{\mathcal{H}}[i]|^2 \right] \right), \\ \mu_5 &= \frac{2L_s}{\alpha\beta^2} \left(-|\dot{\mathcal{H}}[i]|^2 + \frac{1}{2\alpha} \dot{\mathcal{H}} \left[|\dot{\mathcal{H}}[i]|^2 \right] \right), \quad \rho_1 = -\frac{2}{\beta} (R_s \mathcal{H}[i] + \sigma L_s \dot{\mathcal{H}}[i] - \mathcal{H}[v]), \\ \rho_2 &= -\frac{2}{\alpha\beta^2} \mathcal{H}[v^\top \mathcal{H}[v]] + R_s \mu_1 + \sigma \mu_2 + R_s^2 \mu_3 + R_s \sigma \mu_4 + \sigma^2 \mu_5, \\ \rho_3 &= \frac{R_s}{\alpha\beta} \mathcal{H}[i^\top \mathcal{H}[i]] - \frac{1}{\alpha\beta} \mathcal{H}[v^\top \mathcal{H}[i]] + \frac{L_s \sigma}{\alpha\beta} \left(\mathcal{H}[i]^\top \dot{\mathcal{H}}[i] - \frac{1}{\alpha} \mathcal{H} \left[|\dot{\mathcal{H}}[i]|^2 \right] \right),\end{aligned}$$

и фильтры $\mathcal{H}[*] = \frac{\alpha}{p+\alpha} [*]$ и $\dot{\mathcal{H}}[*] = \frac{\alpha p}{p+\alpha} [*]$, $p = \frac{d}{dt}$ – оператор дифференцирования, $\alpha > 0$ – настроечный параметр, $\varepsilon(t)$ – обобщенное обозначение, соответствующее здесь и далее экспоненциально затухающим функциям времени, обусловленным начальными условиями фильтров [4, 5].

Следуя методу DREM, выберем шесть различных положительных констант α_l , $l = 1, \dots, 6$ и сформируем систему регрессионных соотношений (динамическое расширение регрессора)

$$Z(t) = \Phi(t)\eta(t), \quad (6)$$

где $Z(t) = \text{col}(z(t, \alpha_1), \dots, z(t, \alpha_6))$ и $\Phi(t) = \text{col}(\phi^\top(t, \alpha_1), \dots, \phi^\top(t, \alpha_6))$. Затем выполним смешивание расширенного регрессора с использованием нелинейных операторов Крамера:

$$\zeta(t) = (\text{adj } \Phi(t))Z(t), \quad \Delta(t) = \det \Phi(t). \quad (7)$$

что позволяет получить систему регрессионных уравнений вида

$$\zeta(t) = \Delta(t)\eta(t) + \varepsilon(t), \quad (8)$$

с общим скалярным регрессором $\Delta(t) \in R$ и вектором вычислимых функций $\zeta(t) = \text{col}(\zeta_1(t), \dots, \zeta_6(t)) \in R^6$.

На основе соотношения (8) и электрической динамики (1), (2) можно применить метод DREMBAO (адаптивный наблюдатель на основе DREM) [3].

Алгоритм

$$\dot{\hat{R}}_r = \gamma_R \Delta (\zeta_1 - \hat{R}_r \Delta) \quad (9)$$

$$\hat{\lambda} = -\frac{\sigma L_s}{\beta} i + \chi, \quad (10)$$

$$\dot{\chi} = \frac{1}{\beta} v - \frac{R_s}{\beta} i + \gamma_\lambda \Delta \left[\zeta_{23} + \left(\frac{\sigma L_s}{\beta} i - \chi \right) \Delta \right], \quad (11)$$

где $\gamma > 0$ – коэффициент адаптации и введены обозначения ζ_1 и $\zeta_{23} = \text{col}(\zeta_2, \zeta_3)$, соответствующие первым трем вектора $\zeta(t)$, обеспечивает асимптотическую или экспоненциальную сходимость к нулю ошибок оценивания неизвестного параметра R_r и потокосцепления $\lambda(t)$.

Аналогично, пользуясь методом DREMBAO, можно синтезировать алгоритмы оценивания момента нагрузки и угловой скорости вращения ротора на основе механической динамики (3):

$$\dot{\hat{T}}_L = \gamma_T \Sigma (\xi_1 - \hat{T}_L \Sigma), \quad (12)$$

$$\hat{\omega} = -\frac{1}{J} \hat{T}_L - \frac{n_p \beta}{J} \lambda^\top Y i + \gamma_\omega \Sigma (\xi_2 - \hat{\omega} \Sigma), \quad (13)$$

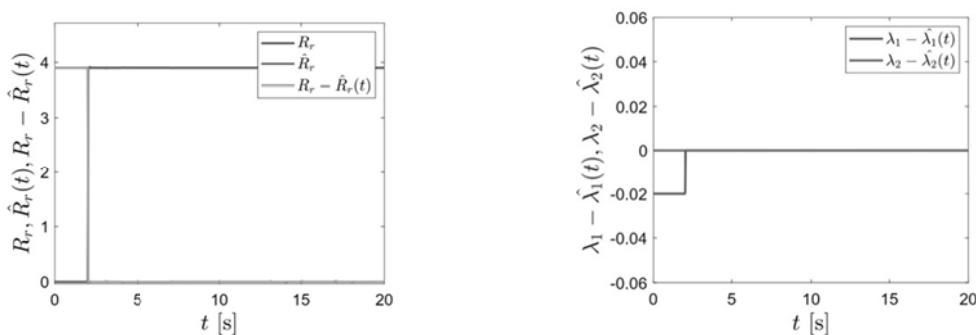
где $\gamma_T > 0$ и $\gamma_\omega > 0$ – настроечные параметры, и вычислимые функции времени

$$\xi = \text{col}(\xi_1, \xi_2) = (\text{adj } Q(t))G(t), \quad \Sigma(t) = \det Q(t), \quad (14)$$

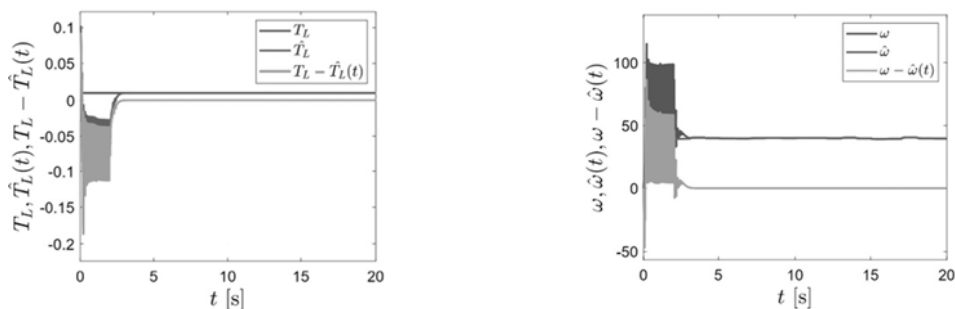
$$G = \dot{\mathcal{H}}[\lambda] + \mathcal{H}[\rho_4] + \frac{\beta}{\alpha J} \mathcal{H} \left[\rho_5^\top i \mathcal{H}[\rho_5] \right], \quad Q = \text{row} \left(\frac{1}{\alpha} \mathcal{H}[\mathcal{H}[\rho_5]]; \mathcal{H}[\rho_5] \right),$$

где использованы вспомогательные переменные $\rho_4 = \frac{R_r}{L_r} \lambda - R_r \beta i$, $\rho_5 = n_p Y \lambda$, и для простоты изложения принято, что значения параметра R_r и потокосцепления $\lambda(t)$ уже известны благодаря алгоритму (9)-(11).

Численное моделирование. Параметры двигателя: $L_s = 140$ мГн, $L_r = 140$ мГн, $M = 117$ мГн, $R_s = 1,7$ Ом, $R_r = 3,9$ Ом, $J = 0,00011$ кг.м². Амплитуда опорного потока ротора была выбрана: $|\lambda|^{ref} = 0,0455$ Вб, заданная скорость $\omega^{ref} = 40$ рад/с, начальные условия $\omega(0) = 0$ об/мин, $\lambda(0) = \text{col}(0,02; 0)$ Вб. Параметры наблюдателей были выбраны: $\alpha_1 = 10$, $\alpha_2 = 20$, $\alpha_3 = 30$, $\alpha_4 = 40$, $\alpha_5 = 50$, $\alpha_6 = 100$, $\gamma_\lambda = 100$, $\gamma_r = 0,0001$, $\gamma_\omega = 1000$, $\gamma_T = 10^6$ с соответствующими размерностями. Алгоритмы оценивания подключаются после второй секунды во избежание влияния затухающих функций $\varepsilon(t)$, связанного с переходным процессом параметризации.



а) Оценка R_r и ошибка б) Наблюдаемый поток λ и ошибка
Рис 1. Оценка сопротивления ротора и магнитного потокосцепления



а) Оценка момента нагрузки и ошибка б) Оценка угловой скорости и ошибка
Рис 2. Оценка угловой скорости и момента внешней нагрузки

Заключение. Основное преимущество предлагаемого наблюдателя состоит в том, что он не требует знания сопротивления ротора, значение которого может меняться в зависимости от температуры, частоты и амплитуды тока. Оценки мгновенных значений угловой скорости, магнитного потокосцепления и момента нагрузки могут использоваться для синтеза закона управления. Благодаря методу DREM, который лежит в основе представленного алгоритма, не требуется выполнение условия постоянного возбуждения, для обеспечения асимптотической сходимости к нулю ошибок оценивания искомых параметров и переменных состояния.

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации № МД-3574.2022.4 и Министерством науки и высшего образования РФ (паспорт госзадания № 2019-0898).

ЛИТЕРАТУРА

1. **K. H. Nam**, *AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications*, CRC press, 2010.
2. **W. Leonhard**, *Control of electrical drives*. Springer Science & Business Media, 2001.
3. **A. Pyrkin, A. Bobtsov, R. Ortega, A. Vedyakov, and S. Aranovskiy**, Adaptive state observer design using dynamic regressor extension and mixing // *Systems & Control Letters*, Vol. 133, pp. pp. 1-8, 2019.
4. **Pyrkin A., Bobtsov A., Vedyakov A., Ortega R., Vediaikova A., Sinetova M.M.** DREM-Based Adaptive Observer for Induction Motors // *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, 2019, pp. 648-653

5. **Pyrkin A., Bobtsov A., Vedyakov A., Ortega R., Vediakova A., Sinetova M.** A flux and speed observer for induction motors with unknown rotor resistance and load torque and no persistent excitation requirement // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2021, Vol. 35, No. 8, pp. 1578-1593

Q.C. Nguyen (Faculty Control Systems and Robotics, ITMO University, Saint Petersburg). **DREMBAO application for magnetic flux observer and rotation speed of the rotor of the induction motor**

Abstract. A dynamic model of an induction motor is considered. It is assumed that the rotor resistance and the load torque are unknown. The measured signals are the stator current and the control voltage. The application of the dynamic regressor extension and mixing method (DREAM) makes it possible to obtain regression relations, based on which resistance estimation algorithms and observers of magnetic flux, rotation speed and load torque are synthesized. The proposed approach can also be applied to synchronous motors with permanent magnets.

УДК 681.51

О. А. КОЗАЧЁК, Н. А. НИКОЛАЕВ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ СОСТОЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ С ЧАСТИЧНО НЕИЗВЕСТНОЙ МАТРИЦЕЙ СОСТОЯНИЯ И ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА

В докладе рассмотрена задача оценки вектора состояния нелинейных систем. Задача решена в предположении, что матрица состояния может быть представлена как сумма известной и неизвестной частей. Выходной сигнал измеряется с известным постоянным запаздыванием. Предложен адаптивный наблюдатель, восстанавливающий неизвестный вектор состояния и неизвестные переменные параметры системы.

Введение. Хорошо известно, что измерения, получаемые с помощью реальных устройств, подвержены наличию запаздывания. Это затрудняет разработку наблюдателей и синтез законов управления для динамических систем. В последнее время многие авторы посвящают свои статьи этой проблеме. В случае линейных стационарных систем эта проблема хорошо изучена [1]. Однако, исследования в отношении нестационарных и нелинейных систем всё ещё крайне актуальны [2–4].

Работа посвящена разработке адаптивного наблюдателя состояния нелинейной системы с неизвестными переменными параметрами, функционирующей в условиях запаздывания. Данная работа является развитием результатов, представленных в [3, 5–7].

Разработка наблюдателя. В работе рассматривается нелинейная система вида:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) + \sum_{i=1}^n [\theta_i(t) Q_i x(t)], \quad (1)$$

$$y(t) = C(t)x(\phi(t)), \quad (2)$$

где $x(t)$ – неизвестный вектор состояния размерности n , $y(t)$ – известный выходной вектор, $u(t)$ – известный сигнал управления. $f(x(t), u(t))$ – неизвестная функция, вход которой непрерывен и ограничен, $C(t)$ – известная матрица размерности $n \times n$, Q_i – известная матрица размерности $n \times n$, $\phi(t)$ – непрерывная известная неотрицательная функция, которая определяет запаздывание измерений:

$$\phi(t) = t - d, \phi(t) \geq 0, \quad (3)$$

где $d > 0$ – постоянное запаздывание; $\theta_i(t)$ – функция вида [8], [9]:

$$\ddot{\theta}_i(t) = -\omega_i^2 \theta_i(t), \quad (4)$$

где $\omega_i > 0$ – неизвестный постоянный параметр.

Допущение 1. Предполагается, что $C(t)$ – единичная матрица $C(t) = I_{n \times n}$.

Допущение 2. Предполагается, что матрицы Q_i удовлетворяют следующим соотношениям:

$$Q_i Q_j = 0, Q_i = Q_i^T, Q_i^2 = k Q_i, \quad (5)$$

где $j \neq i, k \in \mathbb{Z}$.

Допущение 3. Предполагается, что:

$$y^T Q_i y > 0. \quad (6)$$

Допущение 4. Предполагается, что функция $f(x(t), u(t))$ может быть представлена в виде:

$$f(x(t), u(t)) = A(y(t), u(t))x(t) + B(y(t), u(t))u(t), \quad (7)$$

где $A(y(t), u(t))$ и $B(y(t), u(t))$ – известные матрицы соответствующих размерностей.

Цель работы состоит в разработке наблюдателя вектора $x(t)$ такого, что:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{x}(t) - x(t) = 0, \quad (8)$$

где $\hat{x}(t)$ – оценка вектора $x(t)$.

Проблема синтеза наблюдателя решается в три этапа.

На первом этапе задача состоит в оценке постоянного параметра ω_i для каждого из неизвестных переменных параметров θ_i . Для этого система рассматривается в момент времени $t - d$. Производится репараметризация системы. Затем применяются линейные фильтры, что позволяет перейти к линейной регрессионной форме, содержащей неизвестный параметр $v_i = \omega_i^2$. Оценка неизвестного параметра производится с помощью градиентного метода, затем рассчитывается оценка параметра $\hat{\omega}_i$.

Вторым этапом работы является восстановление неизвестного переменного параметра θ_i . Для этого используется решение уравнения (4):

$$\theta_i(t) = a_{1i} \sin \omega_i t + a_{2i} \cos \omega_i t, \quad (9)$$

где a_{1i} и a_{2i} – неизвестные постоянные параметры. Задача оценки θ_i таким образом сводится к задаче оценки двух неизвестных постоянных параметров. Заменяя в исходной системе θ_i на выражение (9), применив линейные фильтры и рассматривая систему в момент времени $t - d$ можно перейти к линейной регрессионной форме, содержащей неизвестные параметры a_{1i} и a_{2i} . Для оценки неизвестных параметров предлагается использовать метод динамического расширения и смешивания регрессора [10-12]. Подставив полученные оценки параметров $\hat{a}_{1i}, \hat{a}_{2i}$ и $\hat{\omega}_i$ в уравнение (9), можно найти оценку $\hat{\theta}_i(t)$.

На третьем этапе работы на основе полученных оценок параметров строится наблюдатель состояния системы с запаздыванием [3]. При построении наблюдателя применяется обобщенный наблюдатель, основанный на оценке параметра [13].

После разработки наблюдателя было проведено моделирование в среде MATLAB Simulink. При моделировании были использованы следующие параметры системы: $A(y(t), u(t)) = \begin{bmatrix} 0 & 0,1 - 0,1 \sin t \\ -1 & -1 + 0,5 \cos 2t \end{bmatrix}, B(y(t), u(t)) = \begin{bmatrix} -1 \\ 4 \end{bmatrix}, C(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, u = 2 \sin t, Q_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, Q_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \omega_1 = 5, \omega_2 = 5$.

Значение постоянного запаздывания $d=2$. На рис. 1 изображены графики реального значения переменной состояния x_1 и её оценки \hat{x}_1 . На рис. 2 изображены графики реального значения переменной состояния x_2 и её оценки \hat{x}_2 .

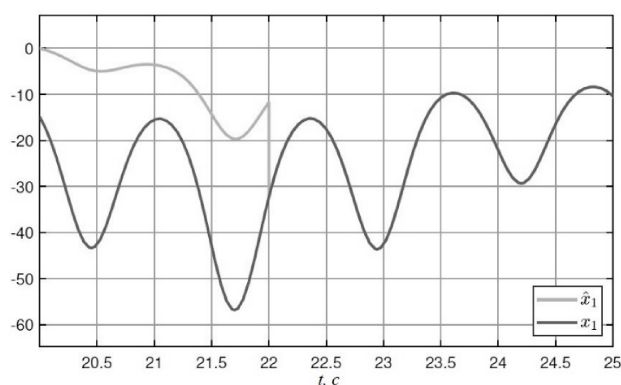


Рис. 1. Переменная состояния x_1 и её оценка \hat{x}_1

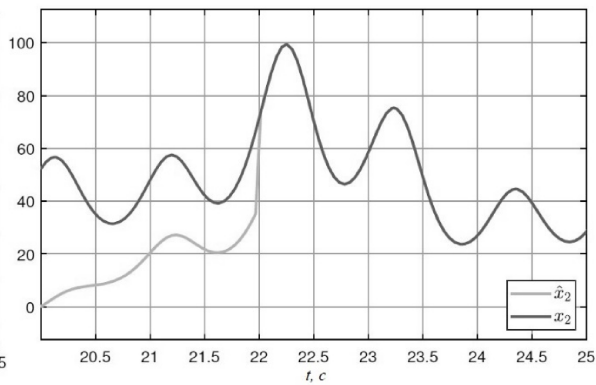


Рис. 2. Переменная состояния x_2 и её оценка \hat{x}_2

Заключение. Разработан наблюдатель состояния нелинейной системы (1), (2) с запаздыванием в измерениях. Матрица состояния системы содержит неизвестные переменные параметры. Задача оценки вектора состояния сводится к задаче оценки неизвестных постоянных параметров. Вектор состояния восстанавливается на основе полученных оценок. В ходе работы применялись обобщенный наблюдатель, основанный на оценке параметров, а

также метод динамического расширения и смешивания регрессора. В ходе моделирования была подтверждена эффективность предложенного алгоритма.

*Работа проводилась при поддержке гранта РФФ 22-21-00499,
<https://rscf.ru/project/22-21-00499/>*

ЛИТЕРАТУРА

1. Fridman E. Introduction to time-delay systems: analysis and control. *Springer*. 2014
2. Sanx R., Garcia P., Kristic M. Observation and stabilization of LTV systems with time-varying measurements delay. *Automatica*. 103. P. 573-579. 2019
3. Bobtsov A., Nikolaev N., Ortega R., Efimov D. State observation of LTV systems with delayed measurements: A parameter estimation-based approach with fixed convergence time. *Automatica*. 131. 2021
4. Rueda-Escobedo J. G., Ushirobira R., Efimov D., Moreno J. A. Gramian-based uniform convergent observer for stable LTV systems with delayed measurements. *International Journal of Control*. 93. P. 226-237. 2020
5. Bobtsov A., Nikolaev N., Ortega R., Efimov D. State observation of affine-in-the-states time-varying systems with unknown parameters and delayed measurements. *The IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems*. P. 124-129. 2021
6. Bobtsov A., Nikolaev N., Ortega R., Efimov D., Kozachek O. State observation of affine-in-the-states systems with unknown time-varying parameters and output delay. *14th IFAC International Workshop on Adaptation and Learning in Control and Signal Processing*. P. 343-348. 2022
7. Bobtsov A., Nikolaev N., Slita O., Kozachek O., Oskina O. Adaptive observer for a LTV system with partially unknown state matrix and delayed measurements. *14th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops*. P. 165-170. 2022
8. Pyrkin A., Bobtsov A., Vedyakov A., Kolyubin S. Estimation of polyharmonic signal parameters. *Automation and remote control*. 76(8). P. 1400-1416. 2015
9. Bobtsov A., Kremlev A., Pyrkin A. Compensation of harmonic disturbances in nonlinear plants with parametric and functional uncertainty. *Automation and remote control*. 72(1). P. 111-118. 2011
10. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Performance enhancement of parameter estimators via dynamic regressor extension and mixing. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 62(7). P. 3546-3550. 2017
11. Ortega R., Aranovskiy S., Pyrkin A., Astolfi A., Bobtsov A. New results on parameter estimation via dynamic regressor extension and mixing: continuous and discrete-time cases. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 66(5). P. 2265-2272. 2021
12. Bobtsov A., Bazylev D., Pyrkin A., Aranovskiy S., Ortega R. A robust nonlinear position observer for synchronous motors with relaxed excitation conditions. *International journal of control*. 90(4), P. 813-824. 2017
13. Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J. Generalized parameter estimation-based observers: Application to power systems and chemical-biological reactors. *Automatica*. 129. 2021

O. A. Kozachek, N. A. Nikolaev (ITMO university, Saint-Petersburg). **Adaptive state observer for a nonlinear system with partially unknown state matrix and delayed output signal**

Abstract. A problem of a nonlinear system state observation is considered. The problem is solved under assumption that the state matrix can be represented as a sum of known and unknown parts. The output signal is measured with a known constant delay. An adaptive observer which reconstructs unknown state and unknown time-varying parameters is proposed.

УДК 681.51

D.L. HOANG
(ITMO University, Saint Petersburg)

SYNTHESIS AND COMPARE THE CONTROL LAWS FOR TWO-WHEELED SELF-BALANCING VEHICLE

In this paper, the quasi-time optimal control law of Two-wheeled Self-balancing Vehicle is synthesis and the results are compared with known methods. The simulation results illustrate the theory and show the effectiveness of the proposed methodology.

Introduction. Two-wheeled Self-balancing Vehicle is a vehicle with two coaxial wheels. The idea of building such a vehicle is based on two pillars, one being the way human-being keeping balance on two feet and the other being the movement of two-wheeled vehicle. In this paper, the author synthesis the control law of Two-wheeled self-balancing vehicle by using the quasi-time optimal control and compare it with known methods such as proportional-integral-derivative (PID) control, Linear-quadratic regulator (LQR) control and Sliding mode control (SMC).

Main part. The author considers Two-wheeled Self-balancing Vehicle, which is schematically depicted in Fig. 1.

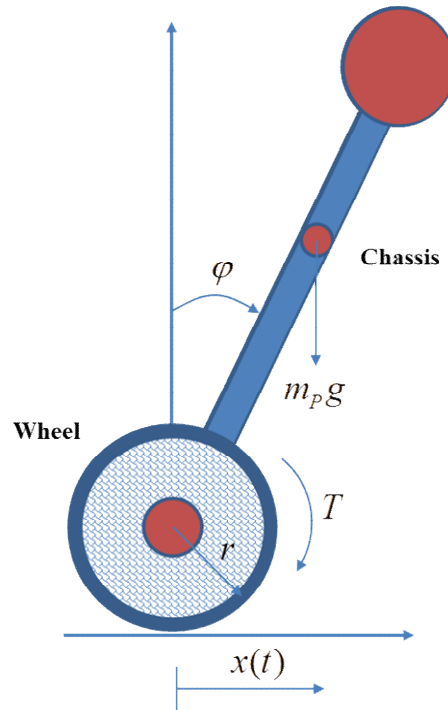


Fig. 1. Dynamic model of Two-wheeled Self-balancing Vehicle.

The mathematical model of Two-wheeled Self-balancing Vehicle is described in equations (1) [1,2,3]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\varphi} \\ \ddot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2k_m k_e (M_p l r - I_p - M_p g l^2)}{R r^2 \alpha} & \frac{M_p g l^2}{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2k_m k_e (r \beta - M_p l)}{R r^2 \alpha} & \frac{M_p g l \beta}{\alpha} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \varphi \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2k_m (-M_p l r + I_p + M_p l^2)}{R r \alpha} \\ 0 \\ \frac{2k_m (-r \beta + M_p l)}{R r \alpha} \end{bmatrix} U_a \quad (1)$$

Academic advisor Associate Professor Dudarenko N.A.

where x - displacement (m); \dot{x} - velocity of vehicle (m / s); \ddot{x} - acceleration of vehicle (m / s^2); φ - angular displacement (rad); $\dot{\varphi}$ - angular velocity (rad / s); $\ddot{\varphi}$ - angular acceleration (rad / s^2); U_a - armature voltage (V); k_m - Motor's Torque constant (Nm / A); k_e - back EMF constant (Vs / rad); R - Motor resistance (Ω); l - Distance from wheel axle to center of chassis (m); g - Gravitational constant (m / s^2); M_p - mass of the chassis (kg); r - radius of wheels (m); I_p - Moment of inertia of the chassis (Nm); I_w - Moment of inertia of the wheels (Nm); M_w - mass of the wheels (kg). In additionally, $\beta = 2M_w + 2I_w / r^2 + M_p$; $\alpha = I_p\beta + M_pl^2(M_w + I_w / r^2)$.

The quasi-time optimal control is proposed in some author's publications [4, 5]. This control law has several advantages, such as minimum setting-time, asymptotic stability and robustness.

The state-space variables: $x_1 = x$; $x_2 = \dot{x}$; $x_3 = \varphi$; $x_4 = \dot{\varphi}$. To simplify model (1), the author introduces the following variables $a = 2k_mk_e(M_plr - I_p - M_pg l^2) / Rr^2\alpha$; $b = M_pg l^2 / \alpha$; $c = 2k_m(-M_plr + I_p + M_pl^2) / Rr\alpha$; $a_1 = 2k_mk_e(r\beta - M_pl) / Rr^2\alpha$; $b_1 = M_pg l\beta / \alpha$; $c_1 = 2k_m(-r\beta + M_pl) / Rr\alpha$; $u = U_a$.

Substituting these values into equation (1)

$$f(\mathbf{x}, u) = \begin{pmatrix} x_2 \\ ax_2 + bx_3 + cu \\ x_4 \\ a_1x_2 + b_1x_3 + c_1u \end{pmatrix} \quad (2)$$

Changing state variables as follows:

$$y_1 = x - \frac{c}{c_1}\varphi = x_1 - \frac{c}{c_1}x_3; y_2 = \dot{x} - \frac{c}{c_1}\dot{\varphi} = x_2 - \frac{c}{c_1}x_4; y_3 = \varphi = x_3; y_4 = \dot{\varphi} = x_4 \quad (3)$$

Equations with state-space variables $Y = (y_1 \ y_2 \ y_3 \ y_4)^T$:

$$\dot{y}_1 = y_2; \dot{y}_2 = y_4(a - \frac{c}{c_1}a_1) + y_3(b - \frac{c}{c_1}b_1); \dot{y}_3 = \frac{c_1}{c}(y_4 - y_2); \dot{y}_4 = a_1y_4 + b_1y_3 + c_1u \quad (4)$$

The quasi-time optimal control law following u voltage is found when resolving (9) with $z_1 = y_1$. The formulas of u are not given here due to too long.

$$\dot{z}_1 = -v \frac{z_1 - y_{sp}}{\sqrt{(z_1 - y_{sp})^2 + \varepsilon_1^2}} + z_2; \dot{z}_2 = -\frac{z_2}{\varepsilon_2} + z_3; \dot{z}_3 = -\frac{z_3}{\varepsilon_3} + z_4; \dot{z}_4 = -\frac{z_4}{\varepsilon_4} \quad (5)$$

Simulation results

By the described method above, the control law is synthesized to provide stable control for Two-wheeled Self-balancing Vehicle. The values set for simulation are: $M_p = 1.24$; $M_w = 0.13$; $I_p = 0.05626$; $r = 0.05$; $I_w = 0.0002829$; $l = 0.213$; $k_e = 0.509$; $k_m = 0.2774$; $R = 7.101$; $g = 9.81$. The results of system simulation with initial system values are as follows: $y_{sp} = 0$, $x(0) = 0$, $\dot{x}(0) = 0$, $\varphi(0) = -0.05$, $\dot{\varphi}(0) = 0$. The parameters of quasi-time optimal control: $v = 1$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_4 = 0.01$.

Figure 2 shows the angle response of chassis under the quasi-time optimal control method for faster and more stable response than the traditional PID method, LQR method and Sliding Mode Control method.

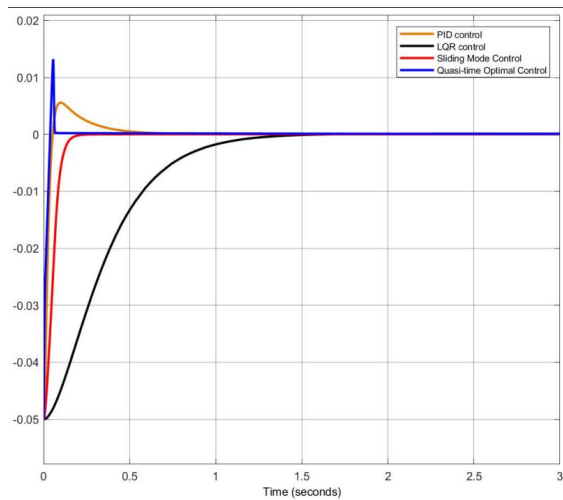


Fig. 2. The angle of the chassis.

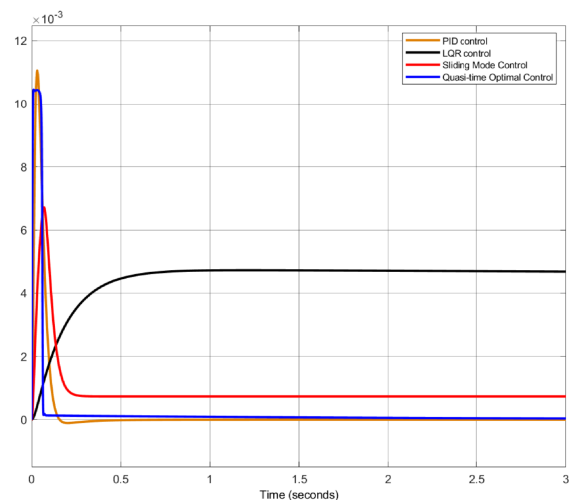


Fig. 3. The position of the vehicle.

Conclusion. The quasi-time optimal control ensures that the system optimizes the time corresponding to the desired output value while also ensuring a stable system with variable parameters and noise interference.

Future studies will add adaptive control laws when there are variable parameters or a nonlinear system which is not the form of Jordan.

REFERENCES

1. **K. Kankhunthod, V. Kongratana, A. Numsomran and V. Tipsuwanporn.** Self-balancing Robot Control Using Fractional-Order PID Controller. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2019 IMECS 2019, March 13-15, 2019, Hong Kong.
2. **Osama Jamil, Mohsin Jamil, Yasar Ayaz, Khubab Ahmad.** Modeling, Control of a Two-Wheeled Self-Balancing Robot. 2014 International Conference on Robotics and Emerging Allied Technologies in Engineering (iCREATE) Islamabad, Pakistan, April 22-24, 2014. Page 191-199.
3. **Nguyen X.C, Phan N.H, Truong D.K, Hoang D.L, Tran C.P, Do N.S.** Advance in the efficiency of type-2 fuzzy controller in embedded systems and application for control Two-wheel Self-balancing Robot. In Electronic scientific journal "Engineering Journal of Don" of Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia, March 2018, No.11.
4. **Long Hoang, Nguyen Chiem, Hai-Phan Nguyen, Truong Dang Khoa, Kien, Pham Thuy.** Building quasi-time-optimal control laws for ball and beam system. 2019 International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing (SigTelCom) at Le Quy Don Technical University, Hanoi, Vietnam, March 2019.
5. **C. X. Nguyen, H. N. Phan, L. D. Hoang, H. T. Nguyen, KH. D. Truong, and N. H. V. Nguyen.** Modeling and synthesizing quasi-time control laws for two degrees of freedom robotic arm, 15th International Scientific-Technical Conference "Dynamic of Technical Systems" (DTS-2019), Rostov-on-Don, Russia, December 2019.

D.L. Hoang (ITMO University, Saint Petersburg). **Synthesis and compare the control laws for two-wheeled self-balancing vehicle**

Abstract. In this paper, the quasi-time optimal control law of Two-wheeled Self-balancing Vehicle is synthesis and the results are compared with known methods. The simulation results illustrate the theory and show the effectiveness of the proposed methodology.

УДК 681.51

А.А. КУЗНЕЦОВ, В.Н. ШЕЛУДЬКО, М.А. ЧЕРНЫШЕВ
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫМИ ОБЪЕКТАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В докладе рассматриваются задачи синтеза управления нелинейными объектами в условиях функциональной и параметрической неопределенности. Разрабатываются и исследуются нелинейные адаптивные системы управления, синтезированные на основе двух подходов: метода адаптивного обхода интегратора с избыточной параметризацией и метода адаптивного обхода интегратора с функциями настройки.

Введение. В последние десятилетия широкое развитие получили новые подходы к синтезу адаптивных, адаптивных робастных и нелинейных робастных систем управления нелинейными объектами, применяемые в случаях нарушения так называемых «условий согласования», когда параметрические (сигнальные, функциональные) возмущения невозможно непосредственно компенсировать соответствующим управлением. Они объединяют пошаговые процедуры синтеза законов управления и алгоритмов их адаптации, основанные на параметризации нелинейных объектов и приведении их к нижнетреугольной (канонической) форме, и получили общее название методов адаптивного обхода интегратора [1-4].

В докладе рассматриваются вопросы сравнительного исследования эффективности адаптивных систем управления нелинейными объектами, построенных на основе метода адаптивного обхода интегратора с избыточной параметризацией и метода адаптивного обхода интегратора с функциями настройки [5-7]. Подробные расчеты обоих методов приведены в докладе.

Адаптивный обход интегратора с избыточной параметризацией. Рассмотрим нелинейную систему (объект), приведенную к нижнетреугольной (канонической) форме вида

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 + \varphi_1(x_1)^T \theta \\ \dot{x}_2 &= x_3 + \varphi_2(x_1, x_2)^T \theta \\ \dot{x}_3 &= u, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\varphi_1(x_1) = [x_1^2 \ 0]^T$; $\varphi_2(x_1, x_2) = [0 \ x_2]^T$ – известная вектор-функция (регрессор); $\theta = [a_1 \ a_2]^T$ – вектор неизвестных постоянных параметров; u – управление.

В результате трех шагов синтеза уравнения исходной системы (1) преобразованы к виду

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -c_1 z_1 + z_2 + w_1(x_1)^T (\theta - \mathcal{G}_1); \\ \dot{z}_2 &= -z_1 - c_2 z_2 + z_3 + w_2(x_1, x_2)^T (\theta - \mathcal{G}_2); \\ \dot{z}_3 &= -c_3 z_3 - z_2 + w_3(x_1, x_2)^T (\theta - \mathcal{G}_3); \\ \dot{\mathcal{G}}_1 &= \Gamma w_1(x_1) z_1; \dot{\mathcal{G}}_2 = \Gamma w_2(x_1, x_2) z_2; \dot{\mathcal{G}}_3 = \Gamma w_3(x_1, x_2) z_3; \\ \alpha_1 &= -c_1 z_1 - w_1(x_1)^T \mathcal{G}_1 + \dot{x}_r; \\ \alpha_2 &= -c_2 z_2 - z_1 - w_2(x_1, x_2)^T \mathcal{G}_2 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \mathcal{G}_1} \Gamma w_1(x_1) z_1 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_r} \dot{x}_r + \ddot{x}_r; \\ u &= -c_3 z_3 - z_2 - w_3(x_1, x_2)^T \mathcal{G}_3 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2} x_3 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial \mathcal{G}_1} \Gamma w_1(x_1) z_1 + \\ &+ \frac{\partial \alpha_2}{\partial \mathcal{G}_2} \Gamma w_2(x_1, x_2) z_2 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_r} \dot{x}_r + \frac{\partial \alpha_2}{\partial \dot{x}_r} \ddot{x}_r + \ddot{x}_r \end{aligned} \quad (2)$$

где $z_1 = x_1 - x_r$ – ошибка между переменной x_1 и желаемым значением x_r , $z_2 = x_2 - \alpha_1$ – ошибка между переменной x_2 и виртуальным управлением α_1 ; $z_3 = x_3 - \alpha_2$ – ошибка между переменной x_3 и виртуальным управлением α_2 ; $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3$ – оценки параметров θ .

Адаптивный обход интегратора с использованием функций настройки. В данном методе на каждом i -м шаге синтезируется стабилизирующее (виртуальное) управление α_i и функции настройки τ_i согласно выбранной функции Ляпунова V_i . Итоговый (фактический) закон управления u и алгоритм настройки параметров $\hat{\theta}$ для полной исходной системы синтезируется на финальном шаге процедуры синтеза.

В результате трех шагов синтеза уравнения исходной системы (1) преобразованы к виду

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= -c_1 z_1 + z_2 + w_1(x_1)^T \tilde{\theta}; \\ \dot{z}_2 &= -z_1 - c_2 z_2 + z_3 + w_2(x_1, x_2)^T \tilde{\theta} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} (\Gamma \tau_2 - \dot{\hat{\theta}}); \\ \dot{z}_3 &= -z_2 - c_3 z_3 + w_3(x_1, x_2)^T \tilde{\theta} + \frac{\partial \alpha_2}{\partial \hat{\theta}} (\Gamma \tau_3 - \dot{\hat{\theta}}) + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \Gamma w_3(x_1, x_2) z_2; \\ \tau_1 &= w_1(x_1) z_1; \tau_2 = \tau_1 + w_2(x_1, x_2) z_2; \tau_3 = \tau_2 + w_3(x_1, x_2) z_3; \\ \alpha_1 &= -c_1 z_1 - w_1(x_1)^T \hat{\theta} + \dot{x}_r; \\ \alpha_2 &= -c_2 z_2 - z_1 - w_2(x_1, x_2)^T \hat{\theta} + \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \Gamma \tau_2 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_r} \dot{x}_r + \ddot{x}_r; \\ u &= -c_3 z_3 - z_2 - w_3(x_1, x_2)^T \hat{\theta} + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_2} x_3 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial \hat{\theta}} \Gamma \tau_3 + \frac{\partial \alpha_2}{\partial x_r} \dot{x}_r + \frac{\partial \alpha_2}{\partial \ddot{x}_r} \ddot{x}_r + \ddot{x}_r + v_3, \end{aligned} \quad (3)$$

где τ_1, τ_2, τ_3 – функции настройки на каждом шаге; $\dot{\hat{\theta}} = \Gamma \tau_3$ – алгоритм настройки параметров, определенный на последнем шаге; $v_3 = \frac{\partial \alpha_1}{\partial \hat{\theta}} \Gamma w_3(x_1, x_2) z_2$.

Результаты компьютерного моделирования. Пусть $x_r = 0.2 \sin(2t + 2)$, $c_1 = 50, c_2 = c_3 = 100, \Gamma = 0.01 I_{2 \times 2}$.

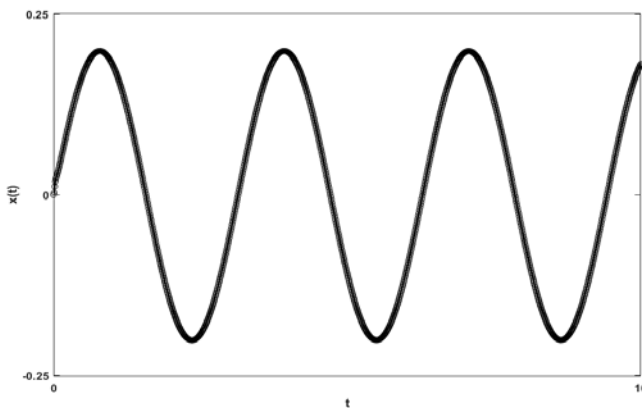


Рис. 1 График переходного процесса с адаптивным робастным управлением, построенным на основе метода адаптивного обхода интегратора с функциями настройки (сплошная линия) и с избыточной параметризацией (сплошная линия с кружком)

коэффициентов регулятора в методе с функциями настройки оказывается равным числу неизвестных параметров объекта, что существенно упрощает структуру адаптивного регулятора, построенного с использованием функций настройки.

Заключение. В данном докладе рассмотрены адаптивные системы управления нелинейными объектами, построенные на основе метода адаптивного обхода интегратора с избыточной параметризацией и метода адаптивного обхода интегратора с функциями настройки. Недостаток первого метода заключается в том, что размерность адаптивного регулятора растет многократно с ростом размерности системы и вектора неизвестных параметров θ ввиду введения на каждом шаге оценки ϑ , что вызывает избыточную параметризацию, которая была преодолена в методе с использованием функций настройки. При этом число настраиваемых параметров регулятора в методе с функциями настройки оказывается равным числу неизвестных параметров объекта, что существенно упрощает структуру адаптивного регулятора, построенного с использованием функций настройки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб.: Наука, 2000. 549 с.
2. **Андреевский Б.Р., Бобцов А.А., Фрадков А.Л.** Методы анализа и синтеза нелинейных систем управления. М.-Ижевск: Издательство «ИКИ», 2018. 336 с.
3. **Антонов В.Н., Терехов В.А., Тюкин И.Ю.** Адаптивное управления в технических системах. Учеб. пособие.-СПб.: Издательство С.-Петербургского университета, 2001. 244 с.
4. **Тюкин И.Ю., Терехов В.А.** Адаптация в нелинейных динамических системах. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 384 с.
5. **Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V.** Nonlinear and Adaptive Control Design. Wiley-Interscience, New York. 1995. 559 p.
6. **Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V., Morse A.S.** Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems. IEEE Trans. Automat. Control. 1991. Vol. 36.№ 11. P. 1241-1253.
7. **Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.V.** Adaptive Nonlinear Control Without Overparametrization. Systems and Control Letters. 1992. Vol. 19. P. 177-185.

V.N. Sheludko, A.A. Kuznetsov, M.A. Chernishov (Saint Petersburg electrotechnical university, Saint Petersburg).
Nonlinear plants control methods in uncertain conditions

The paper consider the problems of nonlinear plants control synthesis in conditions of functional and parametric uncertainties. Nonlinear adaptive control systems synthesized on the basis of two approaches are being developed and investigated: the method of adaptive bypass of the integrator with redundant parameterization and the method of adaptive bypass of the integrator with tuning functions.

УДК 681.5.011

Н. С. КОЛЕСНИК
(ИПМаш РАН, Санкт-Петербург)

АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ С ГАРАНТИРОВАННЫМ НАХОЖДЕНИЕМ УПРАВЛЯЕМОГО СИГНАЛА В ЗАДАННОМ МНОЖЕСТВЕ

Рассмотрен адаптивный алгоритм управления по выходу с целью гарантии нахождения выходного сигнала в заданном разработчиком множестве в любой момент времени. Отличительной особенностью представленного алгоритма от классического адаптивного управления, является возможность повлиять на качество переходного процесса, качество регулирования в установившемся режиме и время переходного процесса.

Введение. Адаптивное управление широко используется для управления в условиях параметрической неопределенности объекта и наличии внешних возмущений [1-3]. Зачастую цель адаптивного управления заключается в стабилизации выхода объекта в ограниченном множестве за конечное время. При этом расчет качественных характеристик переходного процесса затруднителен либо отличается высокими погрешностями. В настоящее время активно разрабатываются методы адаптивного управления, обеспечивающие заданные показатели качества переходного процесса [4-5]. Одному из них и посвящена данная статья.

Адаптивное управление. Рассмотрим динамическую систему:

$$Q(p)y(t) = R(p)u(t), \quad (1)$$

где $t \geq 0$, $u \in \mathbb{R}$ сигнал управления, $y \in \mathbb{R}$ выходной сигнал, доступный измерению, $Q(p)$ и $R(p)$ линейные дифференциальные операторы с постоянными неизвестными коэффициентами и порядками n и $(n-1)$ соответственно.

Требуется разработать закон управления, который обеспечит нахождение выходного сигнала объекта $y(t)$ в следующем множестве

$$\underline{g}(t) < y(t) < \bar{g}(t) \quad \text{для любых } t \geq 0, \quad (2)$$

где: $\underline{g}(t)$ и $\bar{g}(t)$ ограниченные функции вместе со своими первыми производными по времени. Данные функции выбираются разработчиком исходя из начальных условий и требований работы системы. Пример такого задания показан на рисунке 1.

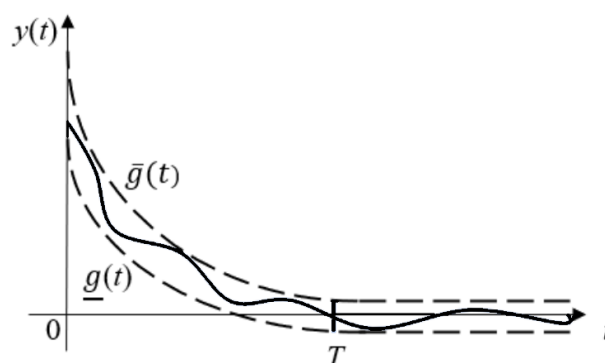


Рис. 1. Иллюстрация цели управления

Зададим вектор регрессии $\omega(t) = \text{col}(V_u(t), V_y(t), y(t))$, составленный с помощью фильтров:

Научный руководитель: д.т.н., проф. Фуртат И.Б

$$\begin{aligned}\dot{V}_u(t) &= FV_u(t) + bu(t), \quad V_u(0) = 0, \\ \dot{V}_y(t) &= FV_y(t) + by(t), \quad V_y(0) = 0.\end{aligned}\quad (3)$$

Здесь $V_u, V_y \in \mathbb{R}^{n-1}$, F - матрица в форме Фробениуса с характеристическим многочленом $M(p)$, $b = [0, 0, \dots, 1]^T$.

Согласно [4, 5], для решения задачи управления с заданными ограничениями введем замену выходной переменной y в виде:

$$y(t) = \Phi(\varepsilon(t), t) = \frac{\bar{g}(t)e^\varepsilon + g(t)}{e^\varepsilon + 1}, \quad (4)$$

где ε – непрерывно-дифференцируемая функция по t . Таким образом, преобразования координат (4) позволяют свести изначальную задачу с ограничениями к задаче без ограничений. Затем синтезируется закон управления u , который обеспечит устойчивость системы.

Зададим закон управления, состоящий из классической адаптивной части, и нелинейной составляющей:

$$u(t) = c^T(t)\omega(t) + \frac{1}{k_1} \left[ay(t) + \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} - \alpha \varepsilon(t) \right]. \quad (5)$$

Здесь $u(t)$ состоит из двух частей – классической адаптивной и гарантирующей нахождение $y(t)$ в множестве (2), $c(t)$ - вектор настраиваемых параметров, α – положительный коэффициент.

Тогда для того, чтобы система соответствовала заданным требованиям, необходимо сформировать следующий алгоритм адаптации:

$$\dot{c}(t) = -\beta(t) \left(\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} \right)^{-1} \varepsilon(t)\omega(t) - \gamma c(t), \quad (6)$$

где β и γ – положительные коэффициенты.

Заключение. В ходе работы применён новый метод адаптивного управления, гарантирующий заданное качество переходного процесса. Результаты моделирования подтвердили теоретические выводы и эффективность предложенного подхода.

Работа выполнена в ИПМаш РАН при поддержке госзадания № 121112500298-6 (ЕГИСУ НИОКТР).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л.** Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами СПб: Наука, 2000.
2. **Фрадков А.Л.** Кибернетическая физика: принципы и примеры. СПб.: Наука, 2003.
3. **Ioannou P.A., Sun J.** Robust Adaptive Control. Courier Corporation, 2012.
4. **Фуртат И.Б., Гушчин П.А.** Управление динамическими объектами с гарантией нахождения регулируемого сигнала в заданном множестве // Автоматика и телемеханика. 2021. № 4. С. 121–139.
5. **Furtat I., Gushchin P.** Nonlinear feedback control providing plant output in given set // International Journal of Control. 2021. <https://doi.org/10.1080/00207179.2020.1861336>

Kolesnik N.S. (IPME RAS, Saint-Petersburg). **Requirements to formatting the papers of the Conference of Young Scientists “Navigation and Motion Control”.**

Abstract. In this paper, an adaptive output control algorithm is considered in order to guarantee that the output signal is found in the set specified by the developer at any time. A distinctive feature of the presented algorithm from the classical adaptive control is the ability to influence the quality of the transition process, the quality of regulation in steady-state mode and the time of the transition process.

УДК 681.51

М. М. ЛИПКОВИЧ
Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург

КРИТЕРИЙ ПОПОВА В ЗАДАЧЕ АДАПТИВНОЙ АБСОЛЮТНОЙ СТАБИЛИЗИРУЕМОСТИ

Предлагается новое решение задачи адаптивной абсолютной стабилизации для систем со скалярными входом и выходом, основанное на критерии Попова и новом варианте пассивации относительно заданных входа и выхода. Предложенные условия являются необходимыми и достаточными для существования функции Ляпунова специального вида для рассматриваемого класса систем.

Введение. Теория абсолютной устойчивости играет важную роль в истории нелинейного и робастного управления. Согласно [1] нелинейная система с правой частью, состоящей из линейной части и нелинейности является абсолютно устойчивой, если она глобально асимптотически устойчива для всех нелинейностей из рассматриваемого класса. Критерии абсолютной устойчивости налагают условия на линейную часть системы. В случае, когда эти условия не выполнены можно синтезировать обратную связь, делающую систему абсолютно устойчивой [2]. Однако, данный подход требует знания параметров системы. Если параметры линейной части системы неизвестны и могут изменяться в широком диапазоне значений, то возможным решением является применение адаптивного управления. В случае, когда для системы существует адаптивный регулятор, приводящий ее к абсолютной устойчивости, систему можно назвать адаптивно абсолютно стабилизируемой.

Задача адаптивной абсолютной стабилизации была впервые сформулирована и решена для частного случая кругового критерия в [3]. Предполагалось, что нелинейности принадлежат так называемому бесконечному сектору, т.е. их графики расположены в первом и третьем квадрантах. Было показано, что гиперминимальнофазовость эквивалентна существованию квадратичной функции Ляпунова, зависящей от состояния системы и параметров адаптации. Основным ограничением [3] было рассмотрение систем с согласованными нелинейностями: управляемый вход и нелинейности находились в одних и тех же уравнениях.

Ограничение согласованности нелинейностей было снято для случая кругового критерия в работе [4]. Полученные условия также оказались эквивалентными существованию функции Ляпунова специального вида. Решение было основано на использовании специальной версии пассивируемости относительно заданных входов и выходов является ограничение на относительную степень передаточной функции от входа, соответствующего нелинейности к выходу, соответствующему аргументу этой нелинейности.

Предлагаемый доклад посвящен решению задачи адаптивной абсолютной стабилизируемости для случая, когда условие на относительную степень из [5] нарушено. Решение основано на применении критерия Попова. Полученные условия стабилизируемости являются необходимыми и достаточными для существования функции Ляпунова вида “квадратичная форма от параметров системы плюс квадратичная форма от параметров адаптации плюс интеграл от нелинейности”.

Постановка задачи. Рассмотрим нелинейную систему:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(\xi)x + b(\xi)u + b_1(\xi)\psi(y_1, t, \xi), \\ y &= c(\xi)^*x, \quad y_1 = c_1(\xi)^*x, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x = x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u = u(t) \in \mathbb{R}$, $y = y(t) \in \mathbb{R}$, $y_1 = y_1(t) \in \mathbb{R}$ являются состоянием, входом и двумя выходами соответственно; $\psi(y_1, t, \xi)$ локально липшицева функция по y_1 , непрерывная по t, ξ ; $A(\xi), b(\xi), b_1(\xi), c(\xi), c_1(\xi)$ – вещественные матрицы и векторы соответ-

ствующих размерностей, ξ – вектор дополнительных неизвестных параметров из известного множества Ξ .

Пусть нелинейности $\psi(y_1, t, \xi)$ удовлетворяют секторному условию для всех $\xi \in \Xi$:

$$\Psi(y_1) y_1 \geq 0, \tag{2}$$

что означает что графики нелинейностей лежат в первом и третьем квадрантах на плоскости.

Пусть система (1) замкнута линейным адаптивным регулятором:

$$\begin{aligned} u &= -ky, \\ \dot{k} &= -py^2, \end{aligned} \tag{3}$$

где параметр p положителен.

Будем говорить, что система (1) удовлетворяет условиям усиленной пассивности, если существует такая матрица $H = H^* > 0$ и число k , что выполнены следующие условия:

$$\begin{aligned} HA(k) + A(k)^*H &< 0, \quad A(k) = A - kbc^*, \\ HB &= C, \end{aligned}$$

где $B = [b, b_1], C = [c, c_1]$.

В работе [5] даны необходимые и достаточные условия усиленной пассивности для систем со скалярными входами и выходами.

Задача состоит в нахождении условий, при которых замкнутая система (1), (3) является абсолютно устойчивой для всех нелинейностей из класса (2).

Основной результат. Введем обозначение для некоторого $\theta > 0$: $c_2 = (A^*\theta + I)c_1$.

Теорема 1. Рассмотрим систему (1). Пусть $c_1^*b_1 = 0$, что делает условия кругового критерия не применимыми. Предположим также, что $c_1^*b = 0$. Тогда система (1) является адаптивно абсолютно стабилизируемой в классе неопределенностей Ξ и в классе нелинейностей (2), если выполнены условия усиленной пассивности для системы (1) и в условиях произведена замена c_1 на c_2 .

Теорема 2. Условия Теоремы 1 являются необходимыми и достаточными для существования функции Ляпунова следующего вида:

$$V_\xi(x, K) = \frac{1}{2} x^* H_0(\xi) x + \frac{1}{2} h |k - k^0(\xi)|^2 + \theta \int_0^{y_1} \psi(\tau) d\tau,$$

где $H_0(\xi) = H_0(\xi)^* > 0$, $k^0(\xi)$ – некоторое число.

Заключение. В работе рассмотрено решение задачи адаптивной абсолютной стабилизируемости на основе критерия Попова. Полученные условия стабилизируемости являются необходимыми и достаточными для существования функции Ляпунова специального вида. Это означает, что никакая дополнительная информация о линейной части системы не позволит ослабить условие пассивности если находиться в том же классе функций Ляпунова. Для получения новых условий необходимо расширить класс функций Ляпунова. Дальнейшие исследования в этой области могут быть посвящены распространению полученных результатов на случай нескольких нелинейностей.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 21-71-00144)

ЛИТЕРАТУРА

1. Лурье А.И., Постников В.Н. (1944). К теории устойчивости регулируемых систем // Прикладная математика и механика. Т. 8, № 3. С. 246-248.

2. **Arcak, M., Larsen, M. and Kokotovic, P.** (2003). Circle and Popov criteria as tools for nonlinear feedback design. *Automatica*, vol. 39, no. 4, pp. 643-650
3. **Fradkov, A., Lipkovich, M.** (2015). Adaptive absolute stability. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, no. 11, pp. 258–263.
4. **Fradkov, A.L. and Lipkovich, M.M.** (2019). Passification with respect to given input and output for linear SISO systems. *Differential Equations and Control Processes*, pp. 184-195.
5. **M. Lipkovich.** (2022). Adaptive Absolute Stabilization of SISO Systems Based on Circle Criterion. *IEEE Control Systems Letters*, vol. 6, pp. 2353-2358.

M. Lipkovich (IPME RAS, Saint Petersburg). **Popov criterion for adaptive absolute stabilization**

Abstract. In this paper, we propose a new solution to the problem of adaptive absolute stabilization for systems with scalar input and output, based on the Popov criterion and a new version of passification with respect to given input and output. The proposed conditions are necessary and sufficient for the existence of a Lyapunov function of a special form for the considered class of systems.

УДК 681.51

П.П. УДАЛОВ, И.А. ПОПОВ
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург)**МЕТОДИКА СИНТЕЗА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ СОСТОЯНИЕМ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ С ПОМОЩЬЮ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Предложена и апробирована методика системного моделирования теплового состояния устройства при воздействии на него внешних факторов (температуры окружающей среды, нагрев внутренних элементов) и управляющих термоэлектрических модулей (батареи Пельтье). Представлен метод алгебраической редукции для получения компактной математической модели управляемого объекта на основе его подробной конечно-элементной модели. Рассмотрены вопросы синтеза алгоритмов управления тепловым состоянием исследуемого термоэлектрически нелинейного объекта и восстановления температуры внутренних узлов гравиметра по известной температуре наружного датчика съема температуры.

Введение. В навигации и гравиметрии одной из основных является задача термостабилизации зоны расположения чувствительного элемента вследствие большой чувствительности результатов измерения к градиентам температуры [1-10]. Прямой конечно-элементный расчет прибора совместно с его системой термостатирования не всегда может удовлетворить потребностям производства вследствие вычислительной трудоемкости и неудобства включения в системную модель реального объекта [11]. В связи с этим, целесообразно применение подходов моделирования, позволяющих прогнозировать выходные параметры термоэлектрического модуля на основе компактных схем, что ускоряет время проектирования и позволяет оперативно проводить варианты расчеты и синтезировать алгоритмы управления исследуемого объекта [12-15].

Прямым конечно-элементным расчетом невозможно провести процедуру настройки и верификации системы управления вследствие громоздкости вычислений. В инженерной практике распространено применение моделей в пространстве состояний, основанных на матрицах из конечно-элементных расчетов. Вследствие возможной сложной геометрии частей устройства выгружаемые матрицы имеют большие размерности (порядка $10^5 - 10^7$), что затрудняет анализ системы в пространстве состояний из-за большого количества времени на проведение динамического расчета. Для устранения вычислительных затрат для систем с матрицами большой размерности применяются методы редукции. Данные методы позволяют строить системы с матрицами меньшей размерности при неизменности выходных характеристик (уровня установившегося сигнала, время переходного процесса и т.д.) [16-23].

Доклад посвящен получению компактной математической модели с использованием метода алгебраической редукции.

Методика построение компактной модели прибора с термоэлектрическим стабилизатором. Для построения компактной модели исследуемого объекта предлагается использовать его описание, полученное конечно-элементной дискретизацией, что включает в себя учет теплоемкости и теплопроводности соответствующей реальной геометрии объекта, а также представление всех действующих на объект тепловых нагрузок – конвекции с окружающей средой, тепловых потоков от батарей Пельтье, объёмного тепловыделения электронной части в форме узловых векторов нагрузки.

На основе подготовленной модели с помощью программного комплекса ANSYS APDL [24] были выгружены матрицы теплоемкости M и теплопроводности K , также вектора тепловых нагрузок, действующих на рассматриваемый объект.

Научный руководитель: доцент Лукин А.В.

При формировании векторов нагрузок с батарей Пельтье в качестве узлов нагружения были выбраны узлы, которые соответствуют зонам контакта батарей Пельтье с внешней стенкой объекта. На эти группы узлов поочередно подавался единичный поверхностный тепловой поток. Полученные векторы узловых усилий составляются в матрицу

$$Q_{TEM} = [Q_{TEM}^1, Q_{TEM}^2, \dots, Q_{TEM}^n], \quad (1)$$

где n – количество батарей Пельтье.

Для учета воздействий внешней среды на тепловое состояние объекта примем конвекцию между внешней стенкой устройства и окружающим воздухом. Условие конвекции имеет вид

$$q_{conv}|_{\Gamma} = \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Gamma} = \beta(T_{Room} - T) \Big|_{\Gamma}, \quad (2)$$

где \vec{n} – нормаль к поверхности Γ (внешней стенки устройства), β – коэффициент теплоотдачи $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{К}} \right]$. В дальнейшем примем, что q_{conv} – конвекционная поверхностная плотность теплового потока $\left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$, T – температура [К], T_{Room} – температура окружающей среды [К].

Для формирования вектора тепловых нагрузок конвекции необходимо приложить к границе тела тепловой поток, соответствующий единичной разности внутренней и наружной температур:

$$q_{conv}|_{\Gamma} = \beta. \quad (3)$$

После этого формируется вектор Q_{conv} , который будет ненулевым в узлах приложения условия конвекции.

Далее для учета объемного тепловыделения q_e выделим соответствующие элементы устройства. На выбранные элементы зададим следующее значение объемного тепловыделения:

$$q_e = \frac{P}{V}. \quad (4)$$

После этого формируется вектор Q_e , соответствующий объемному выделению при единичном значении силы тока I_e , протекающего в плате. Здесь $P = P(I_e)$ – интегральная мощность, V – объем платы.

После этого формируется система в пространстве состояний:

$$\begin{aligned} E\dot{T} &= AT + Bu, \\ y &= CT, \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$A = -M^{-1}(K + \text{diag}(Q_{conv})), \quad (6)$$

$$B = [M^{-1}Q_{TEM}, M^{-1}Q_{conv}, M^{-1}Q_e], \quad (7)$$

$$u^T = [q_{TEM}, T_{Room}, I_e^2], \quad (8)$$

где C – матрица наблюдения, u – вектор управления, E – единичная матрица.

При построении системы в переменных состояния обычно принимают, что $T(0) = 0$ В случаях, когда $T(0) \neq 0$, введем новую переменную $\tilde{T} = T - T(0)$ и перепишем систему (5) в терминах переменной \tilde{T} [25]

$$\begin{aligned} E\dot{\tilde{T}} &= A\tilde{T} + \tilde{B}\tilde{u}, \\ y &= C(\tilde{T} + T(0)), \end{aligned} \quad (9)$$

где

$$\tilde{B} = [B, AT(0)], \quad (10)$$

$$\tilde{u}^T = [u, 1]. \quad (11)$$

После нахождения вектора температур \tilde{T} , исходный вектор T может быть найден как

$$T = \tilde{T} + T(0). \quad (12)$$

Таким образом, описанная методика позволяет сформировать модель устройства, которая включает в себя как неконтролируемые факторы изменения температуры (температура окружающей среды, нагрев платы управления), так и контролируемые (управление потоками батарей Пельтье). Выражения для тепловых потоков на холодной и горячей сторонах батареи Пельтье имеют вид [14]:

$$q_c = a_p(T_c, T_h)T_c I + \frac{1}{2}\tau_p(T_c, T_h)I(T_h - T_c) - \frac{1}{2}I^2 R_p(T_c, T_h)(T_h - T_c) - K_p(T_c, T_h)(T_h - T_c), \quad (13)$$

$$q_h = a_p(T_c, T_h)T_h I - \frac{1}{2}\tau_p(T_c, T_h)I(T_h - T_c) + \frac{1}{2}I^2 R_p(T_c, T_h)(T_h - T_c) - K_p(T_c, T_h)(T_h - T_c),$$

где a_p – коэффициент Зеебека, τ_p – коэффициент Томпсона, R_p – электрическое сопротивление, K_p – коэффициент теплопроводности, q_c , q_h – тепловые потоки на сторонах соприкосновения с устройством и окружающей средой, соответственно. Система (9) является нелинейной системой относительно компонент вектора состояний T и переменной управляющего воздействия из-за нелинейной зависимости теплового потока от силы тока, которая определяется согласно уравнению (13).

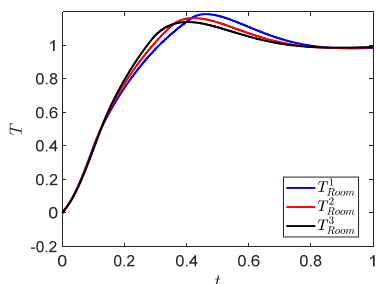


Рис.1. Зависимость безразмерной температуры T датчика температуры от безразмерного времени t при разных значениях температуры окружающей среды T_{Room}
 $(T_{Room}^1 < T_{Room}^2 < T_{Room}^3)$

Из этого следует, что нелинейное поведение системы охлаждения/нагрева объекта вызвано именно нелинейной связью температуры и теплового потока от тока, что является некоторой проблемой в плане подбора и настройки линейных регуляторов. Кроме того, при увеличении внешних параметров нагружения в случае замкнутой системы управления нелинейной системой (2), например, температуры окружающей среды, вследствие нелинейности системы (13) время выхода температуры на установившееся значение и амплитуда переходного процесса будут меняться, тогда как в линейной системе при увеличении силы тока увеличивается только амплитуда установившегося режима. Типичное поведение нормированной температуры от времени при разных значениях силы тока при некоторых параметрах PID – регулятора приведено на рисунке 1. Видно, что вследствие

нелинейности к системе (9) невозможно подобрать какой-либо линейный регулятор, который будет строго оптимальным в плане перерегулирования, времени выхода на стационарный режим и т.д. Для решения данной проблемы предложена методика исключения нелинейности на стороне соприкосновения батареи Пельтье с устройством путем ввода в систему управления линеаризующего звена, в котором определяется зависимость подаваемой силы тока I от потока на q_c . После введения нелинейного управления система (9) становится линейной для охлаждаемой стороны, и для нее возможно применять классические методы подбора линейных регуляторов, например, PID – регуляторов [26–28].

Вследствие невозможности размещения датчиков вблизи чувствительного элемента, как правило, их размещают на внешних стенках устройства и по ним же определяют температурное состояние чувствительного элемента, не измеряя напрямую его температуру. Данный подход не учитывает, что температура установившегося режима чувствительного элемента не

обязательно совпадает с показанием датчика температуры. Так в разных точках чувствительного элемента может наблюдаться разная температура, что приводит к возникновению градиентов температуры и, следовательно, возникновению температурных напряжений и формоизменению отдельных частей УС, что является нежелательным. Процедура восстановления значений температуры в узлах, в которых измерение температуры конструкционно неосуществимо, реализована в рамках данного исследования на основе работ [26–28].

Заключение. Представленная в работе методика компактного системного моделирования управляемых термоэлектрических систем с распределенными параметрами была применена к задаче разработки оптимального алгоритма термостатирования. Отмечена принципиальная физическая нелинейность рассматриваемого объекта управления и вызванные этим особенности протекания тепловых процессов в корпусе прибора.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбПУ (соглашение от 17.11.2020 № 075-15-2020-934).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С.** Результаты эксплуатации гравиметров «Чекан-АМ» // Гироскопия и навигация. 2014. №1. С. 98-104.
2. **Краснов А.А., Соколов А.В., Элинсон Л.С.** Новый аэроморской гравиметр серии «Чекан» // Гироскопия и навигация. 2014. №1. С. 26-34.
3. **Соколов А.В., Усов С.В., Элинсон Л.С.** Опыт проведения гравиметрической съемки в условиях выполнения морских сейсмических работ // Гироскопия и навигация. 2000. № 1. С. 39-50.
4. **Краснов А.А., Соколов А.В.** Изучение гравитационного поля труднодоступных районов Земли с использованием мобильного гравиметра «Чекан-АМ» // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2009. № 20. С. 353-357.
5. **Соколов А.В., Краснов А.А., Элинсон Л.С., Васильев В.А., Железняк Л.К.** Калибровка гравиметра "Чекан-АМ" методом наклона // Гироскопия и навигация. 2015. № 3. С. 41-51.
6. **Соколов А.В., Краснов А.А., Коновалов А.Б.** Автоматизация технологии изготовления кварцевой упругой системы мобильного гравиметра // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 2. С. 35-46.
7. **Журавлёв В.А., Челышев С.В., Кочетов М.В.** Опыт использования гравиметра «Чекан» и перспективы развития морской гравиметрии в ОАО «МАГЭ» // Вопросы теории и практики геологической интерпретации геофизических полей. 2020. С. 124-127.
8. **Пешехонов В.Г., Соколов А.В., Железняк Л.К., Береза А.Д., Краснов А.А.** Вклад навигационных технологий в создание мобильных гравиметров // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 4. С. 162.
9. **Громов Д.С., Краснов А. А.** Особенности обеспечения теплового режима гиростабилизированного гравиметра // Навигация и управление движением. 2013. С. 55.
10. **Иорданишвили Е.К., Бабин В.П.** Нестационарные процессы в термоэлектрических и терромагнитных системах преобразования энергии. М.: Наука. 1983. 216 с.
11. **Заворотнева Е.В.** Методика построения компактной численной модели термоэлектрического модуля на базе программного комплекса COMSOL // Навигация и управление движением. 2021. С. 56-58.
12. **Chikaraishi R., Deng M.** Operator-Based Nonlinear Control of Calorimetric System Actuated by Peltier Device // Machines. 2021. Т. 9. № 8. P. 174.
13. **De Mey G., Kos A., Górecki K.** Optimal temperature regulation of integrated circuits with Peltier heat pumps // Energies. 2022. Т. 15. № 3. P. 1125.
14. **Lineykin S. B., Ben-Yaakov S.** Pspice-compatible equivalent circuit of thermoelectric cooler // 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference. IEEE. 2005. P. 608-612.
15. **Zavorotneva E.V., Indeitsev, D.A., Lukin A.V., Popov I.A., Udalov P.P.** Technique for compact modeling of thermoelectric systems // Информатика, телекоммуникации и управление. 2021. Т. 14. № 2. С. 29-48.
16. **Castagnotto, A., Varona, M. C., Jeschek, L., & Lohmann.** sss & sssMOR: Analysis and reduction of large-scale dynamic systems in MATLAB // at-Automatisierungstechnik. 2017. Т. 65. № 2. P. 134-150.
17. **Alessandro Astolfi.** A new look at model reduction by moment matching for linear systems // 2007 46th IEEE Conference on Decision and Control. IEEE. 2007. P. 4361-4366.
18. **Ionescu T.C., Astolfi A., Colaneri P.** Families of moment matchingbased, low order approximations for linear systems. Systems & Control Letters. 2014. Т. 64. P. 47-56.
19. **Litz L., Roth H.** State decomposition for singular perturbation order reduction—A modal approach // International Journal of Control. 1981. Т. 34. № 5. P. 937-954.
20. **Villemagne C., Skelton R.E.** Model reductions using a projection formulation // International Journal of Control. 1987. Т. 46. № 6. P. 2141-2169.

21. **Grimme E.J.** Krylov projection methods for model reduction. University of Illinois at Urbana-Champaign. 1997. 233 p.
22. **Gugercin S., Antoulas A.C., Beattie C.** H_2 model reduction for large-scale linear dynamical systems //SIAM journal on matrix analysis and applications. 2008. T. 30. №. 2. P. 609-638.
23. **Benner P., Köhler M., Saak J.** Matrix Equations, Sparse Solvers: M-MESS-2.0. 1—Philosophy, Features, and Application for (Parametric) Model Order Reduction //Model Reduction of Complex Dynamical Systems. 2021. P. 369-392.
24. **Thompson M.K., Thompson J.M.** ANSYS mechanical APDL for finite element analysis.: Butterworth-Heinemann, 2017. 466 p.
25. **Bechtold T., Rudnyi E. B., Korvink J. G.** Fast simulation of electro-thermal MEMS: efficient dynamic compact models.: Springer Science & Business Media, 2006, 180 p.
26. **Evers E., Slenders R., van Gils R., de Jager B., Oomen T.** Thermoelectric modules in mechatronic systems: Temperature-dependent modeling and control //Mechatronics. 2021. T. 79. P. 102647.
27. **Bos K., Heck D., van der Kall R., Heertjes M.** Input-Output Linearized Control of a Thermoelectric Actuator using an Extended Kalman Filter Observer //Euspen Special Interest Group Meeting: Thermal Issues, Aachen. 2020. P. 9351 – 9373.
28. **Bos K., Heck D., Heertjes M., van der Kall R.** IO linearization, stability, and control of an input non-affine thermoelectric system //2018 Annual American Control Conference (ACC). IEEE, 2018. P. 526-531.

P.P. Udalov, I.A. Popov (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, High School of Mechanics and Control Processes, St. Petersburg, Russia). **Methodology for the synthesis of algorithms for controlling the thermal state of devices and appliances using thermoelectric converters**

Abstract. A method of system simulation of the thermal state of the device under the influence of external factors (ambient temperature, heating of internal elements) and control thermoelectric modules (Peltier batteries) has been proposed and tested. On the basis of a detailed coupled finite-element model by algebraic reduction methods, a compact mathematical model of the gravimeter in the state space is obtained. The synthesis of algorithms for controlling the thermal state of the thermoelectrically nonlinear object under study and for restoring the temperature of the gravimeter's internal units using the known temperature of the external temperature sensor are considered.

Секция 6.
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИБОРОВ НАВИГАЦИИ

УДК 621.91.01

Т.В. БАСОВА

(Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург)

**РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДА ОПЕРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ
ЗАГОТОВОК И РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА НА ОБОРУДОВАНИИ С ЧИСЛОВЫМ
ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОРПУСОВ
ГИДРОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЕЙ**

Рассмотрены недостатки существующих распространенных методов контроля заготовок и режущего инструмента. Описан разработанный метод операционного контроля режущего инструмента (РИ) и заготовок, основанный на мультисенсорном объединении данных от систем технического диагностирования и контроля. Новый метод включает модернизированные исходные алгоритмы функционирования систем технического диагностирования и контроля, благодаря которым обеспечивается работа оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ) в автоматическом режиме. Согласно результатам внедрения разработанного метода на участке станков с ЧПУ для изготовления корпусов гидрораспределителей производственный брак был снижен на 70%, а производственные простои были существенно сокращены.

Введение. Детали гидравлических систем, таких как гидрораспределители, в основном, характеризуются высокими требованиями к качеству обрабатываемых поверхностей и точности изготовления отверстий [1]. Основными факторами, определяющими точность механической обработки изделий приборостроения и машиностроения, являются: состояние РИ, характеристики оборудования, жёсткость технологической системы, технология производства и прочие [2].

Для минимизации технологического брака, возможно осуществление контроля обрабатываемых заготовок и РИ с помощью ручного измерительного инструмента, специальных приборов, а именно координатно-измерительных машин и прессеторов [3]. Методы контроля размеров ручными измерительными инструментами могут приводить к простоям производства, большим погрешностям результатов измерений. Контроль размеров заготовок и изделий на приборах, не встраиваемых в рабочую зону оборудования, в условиях производства может быть затруднен в связи с необходимостью транспортировки наблюдаемого объекта, а также необходимостью поддержания особых условий эксплуатации.

Для обеспечения качества изготовления деталей, а также повышения производительности, применяются системы технического диагностирования и контроля РИ и заготовок, устанавливаемые в рабочую зону технологического оборудования, например, как показано в [4]. Для работы данных систем необходима программа определения геометрических размеров (цикл измерения), разрабатываемая на специальном языке макрокоманд, поддерживаемых конкретной системой управления ЧПУ. Эта программа содержит параметры, значения которых должны быть подобраны индивидуально в зависимости от РИ, заготовки и выполняемой задачи контроля. Так как значения вносятся вручную, а также требуется предварительный сбор и обработка данных, то существует вероятность получения ошибочных результатов измерений, что может привести к поломке дорогостоящего РИ и оборудования, производственному браку и к простоям производства. Также алгоритмы функционирования систем технического диагностирования и контроля почти не адаптируются под конкретные производственные потребности, например, не предусмотрен операционный контроль [5].

В связи с указанными трудностями, без модернизации оборудования с ЧПУ невозможно настроить автономную работу технологической системы, так как требуется вмешательство спе-

Научный руководитель: к. т. н., доцент, доцент факультета Андреев Ю.С.

циалистов для её отладки, а также не обеспечивается заданное качество изготовления деталей, что особенно актуально при изготовлении деталей гидравлических систем. В связи с этим, для автоматизации изготовления деталей гидравлических систем был разработан и внедрен метод операционного контроля РИ и заготовок, основанный на мультисенсорном объединении данных, полученных одновременно двумя системами технического диагностирования и контроля режущего инструмента и обрабатываемой заготовки. Преимуществами данного подхода являются минимизация производственного брака и простоев производства за счет возможности формирования более объективной, точной и надежной информации о технологической системе. Таким образом, целью работы являлась разработка метода и алгоритмов операционного контроля РИ и заготовок системами технического диагностирования и контроля.

Разработка метода операционного контроля. Вопросы автоматизации производства при помощи систем технического диагностирования и контроля рассматривались отечественными и зарубежными специалистами. Однако, мультисенсорное объединение данных, полученных одновременно бесконтактной системой технического диагностирования и контроля режущего инструмента и контактной системой технического диагностирования и контроля обрабатываемой заготовки [6–8] ранее не изучалось. Для автоматизации производства был разработан метод операционного контроля РИ и обрабатываемой заготовки, основанный на определении геометрических размеров наблюдаемых объектов в начале и в конце технологических переходов системами технического диагностирования и контроля, которые функционируют по управляющим программам определения геометрических размеров. Значения в коде управляющей программе вносятся посредством считывания постпроцессором станка с ЧПУ данных, заполненных в разработанной базе данных технических параметров, а также информации в САМ-системе. Алгоритм функционирования по разработанному методу представлен на рисунке 1. Известный алгоритм определения геометрических размеров системы технического диагностирования и контроля, который взят за прототип, был модернизирован (рисунок 2) с учётом специфики обработки.

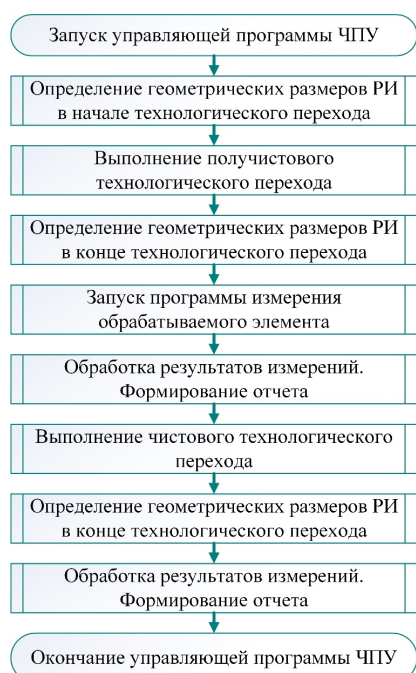


Рис. 1. Алгоритм операционного контроля РИ и обрабатываемой заготовки



Рис. 2. Модернизированный алгоритм определения геометрических размеров обрабатываемого элемента заготовки

В результате внедрения алгоритмов операционного контроля было обеспечено изготовление деталей на станке с ЧПУ по 7-8 качеству фрезерным инструментом в автоматическом режиме (без вмешательства оператора в технологическую систему) с сокращением производственного брака на 70% за счёт автоматической корректировки выявленных погрешностей обработки на чистовом технологическом переходе. Также согласно статистическим данным, простои, свя-

занные с контролем заготовки оператором станка с ЧПУ при помощи измерительных инструментов, с изготовлением элементов детали в ручном режиме на станке с ЧПУ и прочие, были сокращены или устранены на 63%.

Заключение. Разработан метод, включая алгоритмы, операционного контроля РИ и заготовок системами технического диагностирования и контроля, внедрение которого, обеспечило высокую эффективность изготовления деталей на оборудовании с ЧПУ за счёт снижения простоев производства, а также существенно минимизировало производственный брак, вызванный работой изношенным или сломанным РИ. Дальнейшие работы будут направлены на решение задачи прогнозирования технического состояния РИ с учетом результатов выполненного исследования.

Работа проводилась при поддержке Фонда содействия инновациям (договор № 17984ГУ/2022 от 26.05.2022)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кабак** М. Г., **Степин** С. П. Технология производства гидроприводов: Учебное пособие. – Машиностроение, 1974. – 192 с.
2. **Шаумян**, Г. А. Комплексная автоматизация производственных процессов / Г. А. Шаумян. - Москва: Машиностроение, 1973. - 639 с.: граф., цв. ил.; 26 см. - Библиогр.: с. 638-639
3. **Лысенко А. Ф., Изюмов А. И., Гончаров О. В.** К оценке погрешности обработки деталей при интеллектуальном управлении станком //Advanced Engineering Research. – 2014. – Т. 14. – №. 3 (78).
4. **Сидоров А. С.** Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента в мехатронных станочных системах //Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет. – 2007. – С. 122.
5. **Мартинов Г. М.** Система ЧПУ" АксиОМА Контрол": перспективы развития в поле мировых трендов //Вестник МГТУ Станкин. – 2018. – №. 1. – С. 106-110.
6. **Weckenmann A. et al.** Probing systems in dimensional metrology //CIRP annals. – 2004. – vol. 53. – No. 2. – pp. 657-684.
7. **Uekita M., Takaya Y.** On-machine dimensional measurement of large parts by compensating for volumetric errors of machine tools //Precision Engineering. – 2016. – vol. 43. – pp. 200-210.
8. **Третьяков И. В.** Мониторинг оборудования: сбор и обработка машинных данных //Автоматизация в промышленности. – 2017. – №. 10. – С. 50-53.

T.V. Basova (ITMO University, Saint Petersburg). **The development and implementation of the operational control methodology of the workpieces and cutting tools on the equipment with computer numerical control for the hydraulic control valve casings manufacture.**

The paper discusses the disadvantages of existing common workpieces and cutting tools control methods. The developed operational control method of cutting tools (CT) and workpieces based on multisensory integration of data from technical diagnostics and control systems is also described. The new method includes upgraded initial algorithms for the functioning of technical diagnostics and control systems, which ensure the operation of numerical control (CNC) equipment in automatic mode. According to research, the production defects were reduced by 70%, and production downtime was significantly reduced via method implementation.

УДК 681.51

М.А. ВЛАСОВА

(Университет ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

А.Н. ШЕВЧЕНКО

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ПОДАВЛЕНИЯ МАГНИТНОГО ЭКРАНА ОТ АМПЛИТУДЫ ПЕРЕМЕННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ СУБГЕРЦОВОЙ ЧАСТОТЫ

Рассмотрена корреляция коэффициента подавления магнитного экрана от характера магнитного поля: постоянного, переменного и квазистатического. Экспериментально исследована зависимость эффективности экранирования от амплитуды изменения индукции переменного магнитного поля субгерцовой частоты.

Введение. Магнитное экранирование имеет широкое применение, начиная от защиты приборов квантовой электроники и физических экспериментальных установок [1, 2], чувствительных к магнитным полям, до биомедицинских исследований [3, 4], для проведения которых необходимо защищать оборудование, измеряющее сверхслабые магнитные поля человеческого организма от промышленных помех. Кроме того, экранирование активно применяется в гироскопии. Такие приборы как волоконно-оптические гироскопы и ядерные магнитные гироскопы [5] имеют высокую чувствительность к внешним магнитным полям, ввиду чего возникает необходимость их экранирования.

Несмотря на такой широкий диапазон применений и большое количество публикаций по тематике расчета характеристик многослойных магнитных экранов, имеется крайне незначительное количество научно-исследовательских работ, в которых учитываются ферромагнитные свойства экранирующих материалов [6]. Под ферромагнитными свойствами понимается способность материала сохранять намагниченность при нулевом внешнем поле. Для экранов из магнитомягких материалов характерно наличие гистерезиса, сущность которого состоит в том, что значение поля внутри экрана неоднозначно определяется величиной внешнего магнитного поля и зависит от истории его изменения.

Работа посвящена исследованию зависимости коэффициента подавления магнитного экрана от амплитуды изменения индукции переменного магнитного поля субгерцовой частоты.

Методы экспериментальной оценки коэффициента подавления. При проектировании магнитных экранов необходимо отдельно учитывать требования к экранированию от постоянных, переменных и квазистатических магнитных полей. Для каждого из перечисленных случаев коэффициент экранирования определяется по-разному [7]. Эффективное значение магнитной проницаемости экранирующего материала также будут разными.

Экранирование от постоянного поля происходит за счёт эффекта шунтирования, заключающегося в том, что силовые магнитные линии концентрируются в среде с большей магнитной проницаемостью, т.е. в материале экрана. Коэффициент подавления при этом определяется как отношение магнитной индукции внешнего магнитного поля к магнитной индукции поля в объёме, защищённом экраном. Экспериментально этот коэффициент можно определить либо непосредственно после операции размагничивания экрана, либо когда начальная намагниченность экрана пренебрежимо мала в сравнении с намагниченностью во внешнем поле.

При воздействии переменного внешнего поля с магнитной индукцией $B_{\text{внеш.}} = A_{\text{внеш.}} \cdot \cos \omega t$, где: $A_{\text{внеш.}}$ – амплитуда изменения индукции переменного внешнего поля, ω – угловая частота, t – время, внутри объёма экрана образуется внутреннее поле с индукцией $B_{\text{внутр.}} = A_{\text{внутр.}} \cdot \cos(\omega t + \varphi)$,

Научный руководитель: к.т.н., начальник лаборатории Безмен Г.В.

где: $A_{\text{внутр.}}$ – амплитуда изменения индукции переменного внутреннего поля, φ – фаза, зависящая от ферромагнитных свойств материала. Коэффициент подавления в таком случае определяется как отношение амплитуды изменения индукции внешнего переменного поля к амплитуде изменения индукции внутреннего поля на соответствующей частоте, т.е. без учета постоянных составляющих.

Внешнее поле субгерцового диапазона может рассматриваться как квазистатическое, то есть изменяющееся во времени достаточно медленно в сравнении с переменным. Коэффициент подавления K при этом определяется как отношение амплитуды изменения магнитной индукции внешнего поля $\Delta B_{\text{внеш.}}$ к амплитуде изменения магнитной индукции внутреннего поля $\Delta B_{\text{внутр.}}$ в объёме, защищённом экраном:

$$K = \frac{\Delta B_{\text{внеш.}}}{\Delta B_{\text{внутр.}}} \quad (1)$$

Методика экспериментально-исследовательских работ. Для исследования поведения коэффициента экранирования был использован один из слоёв трёхслойного магнитного экрана интерферометра волоконно-оптического гироскопа, представляющий собой сплюснутый цилиндр, изготовленный из пермаллоя 79НМ [8]. Внешнее поле создавалось соленоидом, размещённым в технологическом экране, защищающем от магнитного поля Земли. Индукция магнитного поля внутри объёма экрана измерялась с помощью феррозондового магнитометра, установленного в его геометрическом центре.

Начальное значение индукции внешнего магнитного поля – 50 мкТл, амплитуды изменения индукции внешнего поля составили 12, 20, 30 и 40 мкТл, а частота 0,01 Гц. На рисунке 1 представлены зависимости индукции магнитного поля внутри экрана от индукции внешнего магнитного поля при различных амплитудах изменения индукции внешнего поля.

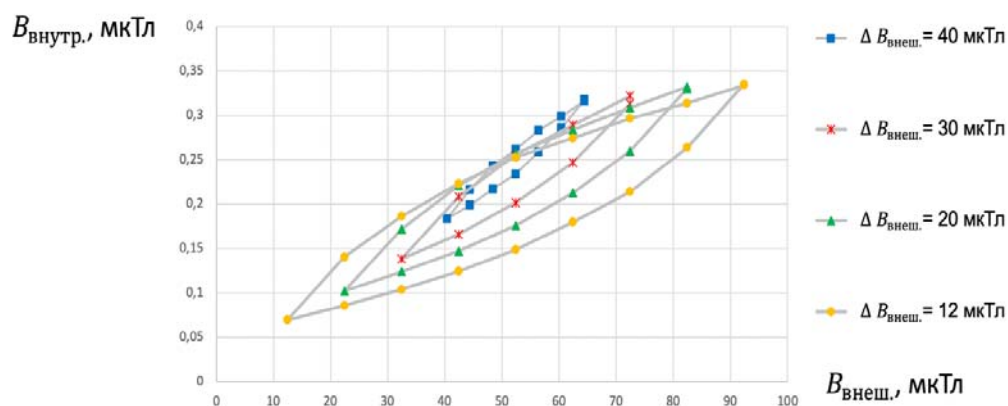


Рис. 1. Зависимости индукции внутреннего поля от индукции внешнего при различных амплитудах изменения индукции внешнего магнитного поля.

Для каждой гистерезисной кривой получен коэффициент подавления. Величина гистерезиса, выраженная в процентах, вычислялась как отношение максимальной ширины гистерезиса к его размаху [7]. Рассчитанные согласно (1) коэффициенты подавления и величины гистерезиса для каждой из амплитуд изменения индукции представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Значения коэффициентов экранирования для соответствующих амплитуд изменения индукции переменного магнитного поля

Амплитуда внешнего поля, $\Delta B_{\text{внеш.}}$, мкТл	Амплитуда внутреннего поля, $\Delta B_{\text{внутр.}}$, мкТл	Величина гистерезиса, %	Коэффициент подавления, раз
12	0,07	20,5	179,31
20	0,09	29,3	217,64
30	0,12	35,2	260,53
40	0,13	39,0	300,78

Из таблицы видно, что с уменьшением амплитуды изменения индукции внешнего магнитного поля снижается эффективность экранирования, на что указывает уменьшение значений коэффициента подавления. Также можно заметить, что зависимость между величиной гистерезиса и коэффициентом подавления является прямой. Таким образом, следует учитывать, что при уменьшении амплитуды изменения индукции внешнего поля в 3 раза, например, за счёт внешнего экрана для триады гироскопов, амплитуда изменения индукции магнитного поля внутри экрана интерферометра волоконно-оптического гироскопа уменьшается всего лишь в 2 раза.

Заключение. Рассмотрены способы определения коэффициентов подавления магнитного экрана для магнитных полей различного характера: постоянного, переменного или квазистатического. Экспериментально выявлено, что с уменьшением амплитуды изменения индукции магнитного поля субгерцевой частоты, эффективность экранирования снижается, при этом величина гистерезиса уменьшается прямо пропорционально коэффициенту экранирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kunski R., Vanier J.** On magnetic shielding in hydrogen masers (frequency standards). *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 1982. Т. 15. №. 11. С. 1207.
2. **Caplin A.D. et al.** Observation of an unexplained event from a magnetic monopole detector. *Nature*, 1986. Т. 321. № 6068. С. 402-406.
3. **He K. et al.** A high-performance compact magnetic shield for optically pumped magnetometer-based magnetoencephalography. *Review of Scientific Instruments*, 2019. Т. 90. №. 6. С. 064102.
4. **Borna A. et al.** A 20-channel magnetoencephalography system based on optically pumped magnetometers // *Physics in Medicine & Biology*. – 2017. – Т. 62. – №. 23. – С. 8909.
5. **Пешехонов В.Г.** Перспективы гироскопии. XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019, 2019. С. 36-38.
6. **Moric I. et al.** Magnetic shielding of the cold atom space clock PHARAO. *Acta Astronautica*, 2014. Т. 102. С. 287-294.
7. **Sumner T.J., Pendlebury J.M., Smith K.F.** Convective magnetic shielding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1987. Т. 20. №. 9. С. 1095.
8. **Климова Е.Н., Шевченко А.Н.** Исследование возможности использования аморфного железа в качестве магнитного экрана ВОГ. Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО, 2022. С. 49-52.

M.A. Vlasova (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, St. Petersburg), A.N. Shevchenko (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg). **Investigation of the dependence of the magnetic shield shielding factor on the amplitude of the periodic magnetic field of subHertz frequency**

The paper considers the correlation of the suppression coefficient of the magnetic screen on the nature of the magnetic field: static, periodic and quasi-static. The dependence of the magnetic shield shielding factor on the amplitude of an alternating magnetic field of subHertz frequency has been experimentally investigated.

УДК 681.7.068.2

Д.В. ГЛИТА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ТЕХНОЛОГИЯ СВЕТОВОДОВ С ПРЕДЕЛЬНО НИЗКИМИ ОПТИЧЕСКИМИ ПОТЕРЯМИ

В работе исследована проблема снижения оптических потерь в германо-силикатных одномодовых световодах для волоконно-оптических систем передачи информации и волоконно-оптических гироскопов. На основании изучения современных достижений в термодинамике высокотемпературного материаловедения проанализированы причины возникновения германиевых кислородно-дефицитных центров (ГКДЦ), определяющих минимальный уровень оптических потерь.

Введение. Объектом исследований настоящей работы являлся одномодовый волоконный световод с германосиликатной сердцевиной (ОВСГС), используемый для систем передачи информации и волоконно-оптических гироскопов. Для изучения проблемы потерь в ОВСГС необходим анализ специфики оптических потерь с привлечением современных фундаментальных достижений в термодинамике высокотемпературного равновесия стеклообразующих оксидов с газовой фазой.

Целью работы являлось выявление механизма возникновения свойственных для германо-силикатного стекла избыточных оптических потерь в технологии изготовления световодов методом модифицированного химического парофазного осаждения (англ. Modified chemical vapor deposition, MCVD) с разработкой технических решений для снижения уровня аномального затухания оптического волокна.

Исследование причин возникновения ГКДЦ. В настоящее время достигнутый уровень минимальных оптических потерь в ОВСГС при применении MCVD-технологии соответствует 0.45 дБ/км на длине волны 1.3 мкм и 0.20 дБ/км на длине волны 1.55 мкм [1].

Анализ всех компонентов оптических потерь оптических волокон показывает, что природа возникновения аномальных потерь германо-силикатных световодов в настоящее время не сформулирована окончательно. Известно, что причина потерь обусловлена возникновением германиевых кислородно-дефицитных центров, приводящих к увеличению затухания ОВСГС как за счёт поглощения [2], так и за счёт рассеяния излучения [3].

ГКДЦ в стекле сердцевины могут возникать в следующих случаях:

1. При высокотемпературном сжатии внутреннего канала трубчатых заготовок световодов из-за обеднения кислородом германо-силикатного стекла. Это возможно как при MCVD методе, так и при методе внешнего парофазного осаждения (англ. Outside vapor deposition, OVD).
2. При сушке пористых заготовок как при OVD-методе, так и при методе парофазного осевого осаждения (англ. Vapor axial deposition, VAD) при температуре (1000-1200) °С в атмосфере инертного газа может произойти восстановление GeO₂, который до этапа спекания находится не в растворенном состоянии, а в виде частиц из чистого диоксида германия [2].
3. При вытягивании волокна при высоких температурах.

Термодинамический анализ причин избыточных оптических потерь германо-силикатных световодов. Оценка степени восстановления германо-силикатного стекла в MCVD процессе проводилась на основе универсальной зависимости Юмашева Л.А. [3] для равновесного давления пара (P) веществ от их абсолютной температуры (T).

$$\lg(P, \text{ атм}) = 6.3 - 6.3(T_{\text{кип}}/T), \quad (1)$$

где $T_{\text{кип}}$ – абсолютная температура кипения вещества или температура для равновесного давления пара компонента газовой фазы, равного 1 атм.

Научный руководитель: главный научный сотрудник д.т.н. Ероньян М.А.

Известно, что атомы в конденсированной фазе мигрируют под действием разности их термодинамической активности, которая определяется их равновесным давлением. Зависимость (1) дает возможность проанализировать равновесное давление кислорода и направление его диффузии в слоях заготовки при высокотемпературном сжатии трубки, нагретой до (2100-2200) °С (рисунок 1). Точки пересечения прямых линий с осью $1/T$ соответствуют температуре равновесия кислорода с оксидами в процессе спекания пористых слоев при парциальном давлении кислорода в парогазовой смеси ≈ 8 атм. Из рисунка видно, что при температуре высокотемпературного сжатия заготовки (≥ 2000 °С) равновесное давление кислорода для германосиликатного стекла будет существенно больше атмосферного и больше по сравнению с давлением в оболочке из чистого кварцевого стекла. Поэтому кислород из сердцевины диффундирует в оболочку и испаряется во внутренний канал, продуваемый кислородом при давлении = 1 атм.

Из рисунка 1 также видно, что добавление фтора с германосиликатное стекло, снижает температуру его спекания и приводит к увеличению равновесного давления кислорода, то есть способствует окислению стекла.

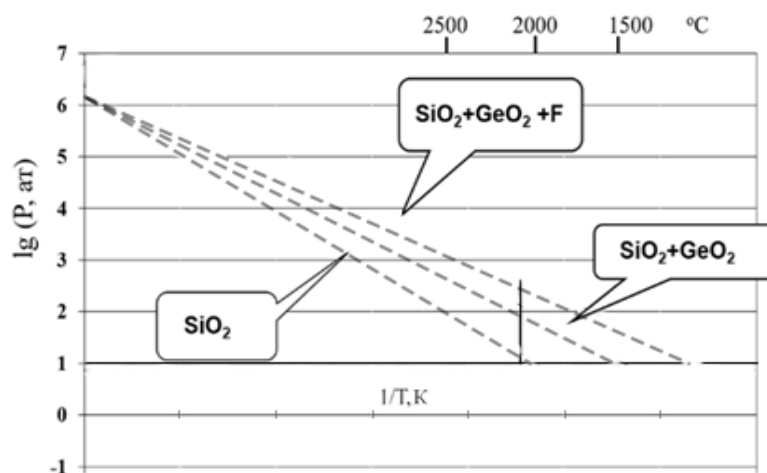


Рис. 1. Температурная зависимость давления кислорода от температуры для слоев заготовки

Экспериментальные исследования причин избыточных оптических потерь в оптических световодах с германатной сердцевиной.

Поскольку глубина диффузии кислорода в сердцевине волокна имеет конечное значение, тогда увеличив диаметр зоны диффузии в заготовке можно снизить долю дефектной зоны стекла. Однако для сохранения одномодового режима, условием которого является сохранение отношения сердцевины к наружному диаметру на уровне 1 к 15, необходима дополнительная операция «нахлопывания» кварцевой трубы на заготовку, для сохранения этого соотношения.

Другой способ снижения содержания ГКДЦ в сердцевине заключается в глубоком газофазном травлении стекла сердцевины после предварительного высокотемпературного сжатия внутреннего канала заготовки до 2-5 мм.

Такое техническое решение проверено экспериментально.

Методом MCVD изготовлена заготовка ОВСГС длиной 500 мм и наружным диаметром 15.5 мм. В процессе высокотемпературного сжатия заготовки газофазным травлением с использованием соединения SF_6 была удалена центральная дефектная зона сердцевины, в 3 раза превышающая зону провала показателя преломления (ПП). Половина заготовки модифицирована боросиликатной оболочкой методом OVD. Оценка радиального профиля ПП. (рисунок 2) показала содержание GeO_2 в сердцевине, и B_2O_3 в оболочке заготовки. Как известно, наличие низковязкой боросиликатной оболочки позволяет снижать температуру вытягивания кварцевого волокна без его разупрочнения [4].

Из двух частей заготовки были вытянуты при разной температуре нагрева отрезки световодов длиной по 500 м с однослойным эпоксиакрилатным покрытием. Скорость вытягивания волокна ≈ 50 м/мин. Оптические потери световодов с боросиликатной оболочкой измерены методом обрыва на длине волны излучения 1.55 мкм (таблица 1).

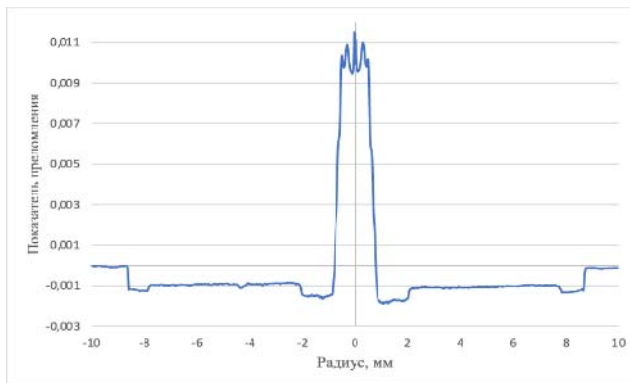


Рис. 2. Профиль показателя преломления экспериментальной заготовки

Таблица 1

Оптические потери световодов (α) с боросиликатной оболочкой

№ образца	1	2	3	4
Температура вытягивания заготовки, °C	2100	2000	1950	1900
α , дБ/км	2.56	0.74	0.34	0.21

Проведен качественный анализ рассеяния световодов с оценкой интенсивности свечения волокон с боросиликатной оболочкой, вытянутых при разных температурах в процессе их возбуждения лазером, мощностью 5 мW с длиной волны излучения 650 нм. В результате снижения температуры свечение световодов существенно снижается, а для волокна, вытянутого при температуре 1900 °C, оно еле заметно. Однако, аномальное рассеяние полностью не исчезает, о чём свидетельствует свечение волокна. Тем не менее, оптические потери световода № 4 (0.21 дБ/км) близки к предельно низкому фундаментальному уровню затухания.

Известно, что снижение температуры вытяжки волокна ухудшает его прочностные характеристики [7]. Поэтому были проведены измерения прочности волокон, вытянутых при разных температурах. Измерение прочности сводоводов производилось методом двухточечного изгиба с использованием специального устройства. Метод заключается в равномерном сжатии петли световодов, размещенной между двумя плоскими пластинами до момента его разрушения.

Прочность волокон (σ) определяли по формуле:

$$\sigma = E_o \cdot [1 + 6,9/2 \cdot (1,219d/\Delta - 1,137(d/\Delta)^2)] \cdot (1,219d/\Delta - 1,137(d/\Delta)^2), \quad (2)$$

где: d - диаметр стекловолокна (0,125 мм), Δ - расстояние между нейтральными осями петли волокна при его разрушении (мм), $E_o = 73,5$ ГПа - модуль Юнга.

На основе двадцати измерений рассчитано среднее значение прочности для каждой температуры вытягивания волокна. Результаты измерений прочности световодов (рисунок 3) свидетельствуют с 99% вероятностью для доверительного диапазона, равного трем стандартным отклонениям для среднего арифметического значения, об отсутствии влияния температуры вытягивания на механические свойства световодов с боросиликатной оболочкой. Без такой оболочки у световодов уменьшается прочность с уменьшением температуры вытягивания.

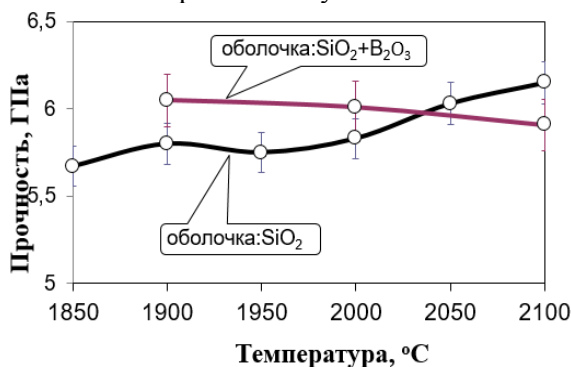


Рис. 3. Зависимость прочности ВС от температуры вытягивания

Заключение. Исследованы основные причины аномальных оптических потерь в германосиликатных одномодовых световодах, обусловленные возникновением ГКДЦ для промышленных технологий мирового производства световодов. Излучательные свойства ГКДЦ могут служить методом качественной оценки наличия дефектов германосиликатного стекла как в процессе изготовления заготовки, так и после вытягивания ОВСГС.

На основании анализа образования дефектов с привлечением последних достижений в термодинамике высокотемпературного материаловедения предложены технические решения для устранения избыточных оптических потерь при использовании MCVD технологии. Определены перспективы снижения затухания и для других промышленных технологий изготовления световодов.

Однако следует отметить, что для промышленных технологий ОВСГС (OVD и VAD), в отличие от MCVD-метода изготовления световодов, из-за специфики сушки пористых заготовок в инертной газовой среде полностью устранить ГКДЦ в стекле сердцевины не представляется возможным.

Экспериментально подтверждена эффективность новых предложений в MCVD технологии заготовок ОВСГС, в которых снижены оптические потери волокон без ухудшения их прочностных свойств.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Miya V., Terunuma Y., Hosaka T. and Miyashita T.** Ultra low loss single-mode fibers at 1/55 μm . - Electron. Lett., 1979, v. 15, p. 106-108.
2. **L. Dong, J. Pinkstone, P.St.J. Russell, D.N. Payne.** Ultraviolet absorption in modified chemical vapour deposition performs // J. Opt. Soc. Am. 1994. B. 11. P. 2106–2111.
3. **Bisyarin M.A., Eronyan M.A., Kulesh A.Y., Meshkovskiy I.K., Reutsky A.A.** Light-emitting optical fibers with controllable anomalous small-angle scattering. 2017. Optical Society of America B. 2017, 34, 2396.
4. **Андреев А.Г., Ермаков В.С., Крюков И.И., Цибиногина М.К., Шенн А.Б., Злобин П.А., Колобкова Е.В., Ероньян М.А.** Исследование процесса модифицированного химического парофазного осаждения при получении стекла системы SiO₂-GeO₂-F, Физика и химия стекла. 2006. Т. 32. № 5. С. 717-723.
5. **Юмашев Л.А.** Обобщение экспериментальных данных по давлению насыщенного пара тугоплавких соединений металлов, Труды ЦАГИ, Москва, 1980, вып. 2045, с. 1-44.
6. **Кулеш А.Ю., Мешковский И.К., Реуцкий А.А., Щеглов А.А., Ероньян М.А.** Снижение оптических потерь в высокопрочных кварцевых световодах, Оптический журнал, 2016, т. 83, № 12, с. 95-97
7. **Hiroshi Murata,** Manufacturing of optical fibers in Japan., in Optical Fiber Communications. Vol. 1, Fiber fabrication, ed. Tingye L.I. Orlando, San Diego, New York, London, Toronto, Montreal, Sydney, Tokyo: Academic press, Inc., 1985, p. 297 – 353.

D.V. Gilita (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg). **Optical fiber technology with extremely low optical losses.**

The problem of reducing optical losses in germanosilicate single-mode fibers for fiber optic information transmission systems and fiber optic gyroscopes is studied. Based on the study of modern achievements in the thermodynamics of high-temperature materials science, the reasons for the emergence of germanium oxygen-deficient centers (GODCs), which determine the minimum level of optical losses, are analyzed.

УДК 004.93¹О.А. ЕВСТАФЬЕВ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)**ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ЗАДАЧЕ ОБНАРУЖЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ДЕФЕКТОВ ЛИСТОВОГО ПРОКАТА**

В работе использовались методы глубокого обучения и компьютерного зрения для решения задачи детектирования дефектов на поверхности изделий листового проката. С использованием свёрточной нейронной сети осуществлено обнаружение и распознавание различных поверхностных дефектов листового проката с целью улучшения производственных стандартов и повышения эффективности аттестации изделий. Разработан эффективный алгоритм обнаружения и классификации поверхностных дефектов листового проката на основе нейросетевой модели.

Введение. Листовой прокат является важным процессом в производстве металлопродуктов. Его качество имеет существенное значение для конечных потребителей изделий, в которых использованы детали, изготовленные данным способом. Одним из ключевых шагов в обеспечении качества изделий, изготовленных листовым прокатом, является обнаружение и классификация дефектов [1]. С развитием технологий в области машинного обучения и компьютерной визуализации проблема разработки методов, алгоритмов и программного обеспечения для систем технического контроля и диагностирования дефектов листового проката стала актуальным направлением исследований. Основным направлением является использование свёрточных нейронных сетей для повышения процента выявляемости дефектов путём обучения модели на большой выборке данных [2]. В последние годы нейросетевые технологии стали всё более широко использоваться в этой области. Они позволяют автоматизировать процесс обнаружения дефектов и улучшить точность их классификации. Нейросетевые модели могут обучаться на огромных объёмах данных и обладают высокой способностью к обобщению [3]. Обнаружение дефектов уже довольно успешно выполняется существующими системами, но их классификация всё ещё остается сложной и актуальной задачей [4]. В работе рассматриваются методы контроля поверхностных дефектов листового проката, разработанные на основе нейросетевых моделей. Рассматриваемые методы направлены на обнаружение поверхностных дефектов по изображениям образцов стальных листов с последующей их классификацией в режиме реального времени.

Работа посвящена исследованию методов детектирования дефектов на поверхности изделий листового проката с помощью свёрточной нейронной сети. Её целью является разработка алгоритма обнаружения и классификации поверхностных дефектов листового проката на основе нейросетевой модели.

Подготовка данных. Для обучения нейронной сети были получены изображения с ленты металлопроката при разном освещении. В качестве осветителей использовалась система, состоящая из двух модулей подсветки. Использование двух модулей обуславливалась необходимостью одновременного использования рассеянного и бокового освещения [5]. Осветитель предназначался для подсветки объектов в системах машинного зрения, в частности, при совместной работе с линейными камерами машинного зрения. В работе рассматривалось пять классов наиболее типичных дефектов при производстве металлопроката: эмульсия, точечная коррозия, грязь, заDIR, отпечаток, а остальные возможные классы дефектов объединены в класс «прочие дефекты» [6]. Большинство изображений содержат дефекты как из одного, так и из нескольких классов. Количество дефектов для изображений, полученных при разном типе освещения, может не совпадать, так как распознавание дефектов зависит от типа используемого освещения.

Нейронная сеть. Для решения задачи обнаружения и классификации поверхностных дефектов за основу была выбрана архитектура сверхбыстрой свёрточной нейронной сети на основе

Научный руководитель к.т.н., доцент факультета Шаветов С.В.

регионов (англ. Faster Region-Based Convolutional Neural Network или Faster R-CNN). Faster R-CNN – это популярный алгоритм для обнаружения и классификации объектов в компьютерной визуализации. Он объединяет в себе сеть предложения регионов (англ. Region Proposal Networks, RPN) и быструю сеть на основе регионов (Fast R-CNN) для обнаружения объектов на изображении. RPN генерирует предложения регионов, которые затем подаются на вход сети Fast R-CNN для классификации и регрессии границы объекта [7]. Faster R-CNN показала хорошие результаты на различных наборах данных, что позволяет быстро и точно определять дефекты на изображении и классифицировать их.

Обучение нейронной сети и предобработка данных. Для оценки качества работы модели данные каждого класса были разделены на тренировочные (80%) и тестовые (20%), а потом снова объединены в смешанные выборки. Для решения проблемы неравномерного обучения использовалась функция потерь с неравной долей штрафования для разных классов дефектов. Значимость для каждого класса была обратно пропорциональна доле вхождения класса в обучающий набор данных. Для достижения максимальной точности распознавания системы использовался модуль предварительной обработки изображения. Были рассмотрены случаи перевода изображения в оттенки серого, сглаживание изображения с помощью медианного фильтра и удаление шума, адаптивная эквализация гистограммы, нормализация данных. Для эффективного обучения нейронной сети также были применены алгоритмы аугментации для преобразования, такие как поворот, случайная яркость и контрастность, случайная гамма, случайная тоновая кривая [8].

Выбор метрик детектирования. Для оценивания качества детектирования дефектов были выбраны следующие метрики: mAP (англ. mean Average Precision – усредненная средняя точность) и AP (англ. Average Precision – средняя точность) [9]. AP сочетает в себе обе метрики $Precision$ и $Recall$ (полнота) в качестве одного критерия. Метрика $Precision$ оценивает точность выявлений модели (сколько процентов выявлений является верными), в то время как $Recall$ оценивает, насколько хорошо модель находит все положительные примеры. Данные метрики рассчитываются по следующим формулам:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (1)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (2)$$

где TP – верно-положительные результаты, FP – ложноположительные результаты (ошибка первого рода), FN – ложноотрицательные результаты (ошибка второго рода) [10]. Для того чтобы определить выявление объекта, как истинное или ложное, необходимо использовать метод пересечения по объединению (англ. Intersection over Union, IoU) [11]. IoU описывается следующим выражением:

$$IoU(X, Y) = \frac{X \cap Y}{X \cup Y}, \quad (3)$$

где X – прогнозируемый набор пикселей, а Y – фактическое значение пикселей. После этого оценивается корректность предсказания с учетом порогового значения IoU : TP – правильное обнаружение, обнаружение с $IoU \geq$ порога; FP – неправильное обнаружение, обнаружение с $IoU <$ порога; FN – объект не обнаружен. Показатель AP может быть рассчитан с учетом IoU в задачах обнаружения объектов. В этом случае результаты сравниваются с истинными границами объектов, с использованием значения IoU . Образец считается положительным, только если IoU между предсказанной границей и истинной границей превышает некоторый порог. Тогда AP рассчитывается, как взвешенное среднее значение метрики $Precision$. Метрика mAP используется как среднее значение AP по всем классам:

$$mAP = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N AP_i, \quad (4)$$

где N – число классов, AP_i – средняя точность для i -го класса.

Результаты и обсуждение. В процессе работы проводились различные эксперименты такие как: использование только одного типа освещения, использование комбинированного освещения, предобработка данных, изменение количества детектируемых классов, изменение гиперпараметров модели обучения. В таблице 1 представлены результаты оценки качества распознавания для шести классов дефектов при использовании метрики AP . Эта метрика рассчитывалась для пороговых значений $IoU > 0,4$. Наилучшие результаты с наиболее высокой процентной достоверностью контроля были достигнуты при использовании комплексированной модели свёрточной нейронной сети с комбинированным освещением.

Т а б л и ц а 1

Точность выявления дефектов по метрике AP

Тип освещения	Класс дефектов и достоверность контроля в %					
	1 класс	2 класс	3 класс	4 класс	5 класс	6 класс
Рассеянное	80,75	80,09	82,83	56,55	84,40	90,70
Боковое	65,23	69,61	88,46	73,87	73,44	96,02
Комбинированное	80,69	90,14	79,67	74,23	83,01	91,84

Заключение. В работе использованы различные методы глубокого обучения и компьютерного зрения для решения задачи детектирования дефектов на поверхности листового проката. С помощью свёрточной нейронной сети осуществлено обнаружение и распознавание различных поверхностных дефектов листового проката для улучшения производственных стандартов и повышения эффективности аттестации листового металлопроката.

В результате работ разработан алгоритм обнаружения и классификации поверхностных дефектов листового проката на основе нейросетевой модели. Результаты показали, что свёрточная нейронная сеть Faster R-CNN может предоставить высокую точность для обнаружения и классификации поверхностных дефектов, что в свою очередь улучшает качество инспекции продукции. Архитектура Faster R-CNN обладает высокой вычислительной мощностью и способна эффективно улавливать значимые признаки в изображениях, что помогает достигать высокой точности классификации.

Как показали эксперименты, предварительная обработка изображений значительно улучшает качество распознавания. С использованием рассеянного освещения лучше обнаруживаются дефекты первого, второго и пятого классов, а с использованием бокового освещения – дефекты третьего, четвертого и шестого классов. Применение комплексированной модели свёрточной нейронной сети с комбинированным освещением позволяет достичь высоких показателей контроля для всех типов дефектов в одной модели с достоверностью контроля 92% для обнаружения и не менее 74% для классификации по каждому классу дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kostenetskiy, P. et al.** Real-time system for automatic cold strip surface defect detection // FME Transactions. 2019. Vol. 47(4). P. 765-774.
2. **Liu, Y.; Hsu, Y.; Sun, Y.; Tsai, S.; Ho, C.; Chen, C.** A computer vision system for automatic steel surface inspection. In Proceedings of the Fifth IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Taichung, Taiwan, 15–17 June 2010; pp. 1667–1670.
3. **Q. Luo, X. Fang, L. Liu, C. Yang, and Y. Sun.** “Automated Visual Defect Detection for Flat Steel Surface: A Survey,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 69, no. 3, 2020, doi: 10.1109/TIM.2019.2963555.
4. **I. Konovalenko, P. Maruschak, J. Brezinová, J. Viňáš, and J. Brezina.** “Steel surface defect classification using deep residual neural network,” *Metals (Basel)*, vol. 10, no. 6, pp. 1–15, 2020.
5. **Mohan, A.; Poobal, S.** Crack detection using image processing: A critical review and analysis // Alex. Eng. J. 2018, Vol. 57. P. 787–798
6. **И. Байндорф, Т. Анстотс, А. Эберле, Л. Эрненич, Й.-Ф. Хольцхаузер.** «Оптимизация процесса и качества коррозионностойкой полосы на основе системы контроля поверхности» – Чёрные металлы, Т. 3, с 45-56, 2005.
7. Ren S. et al. Faster r-cnn: Towards real-time object detection with region proposal networks //Advances in neural information processing systems. – 2015. – Т. 28.
8. **Qin Zou, Yu Cao, Qingquan Li, Qingzhou Mao, Song Wang CrackTree.** Automatic crack detection from pavement images, Pattern Recognition Letters. 2012. Vol. 33, Issue 3, P. 227 – 238.
9. **S. Shi Q. Wang P. Xu and X. Chu.** Benchmarking state-of-the-art deep learning software tools” CoRR vol. abs/1608.07249 2016.

10. ГОСТ Р 50779.10–2000. «Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения». — С. 26
11. **M. A. Rahman and Y. Wang.** “Optimizing intersection-over-union in deep neural networks for image segmentation,” in *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 2016, vol. 10072 LNCS, pp. 234–244.

O.A. Evstafev (ITMO University, St. Petersburg). **Usage of neural network technologies in detecting and classifying surface defects in flat steel products**

Abstract. In this work, deep learning (DL) and computer vision (CV) techniques are used to solve the problem of surface defect detection. Using a convolutional neural network (CNN), the detection and recognition of various surface defects in sheet metal is carried out to improve production standards and process efficiency. An efficient algorithm for detecting and classifying sheet metal surface defects based on a neural network model has been developed.

УДК 681.2.084

С. А. ЮДИН
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ДОВОДКИ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

В работе проведено исследование процесса финишной обработки плоскопараллельных поверхностей деталей пьезоэлектрических датчиков. Рассмотрены требования геометрической точности деталей. Определены оптимальные режимы технологической операции доводки на плоскодоводочных автоматах двухстороннего действия связанным абразивом, а также сформированы рекомендации по выбору режимов при разработке технологических процессов доводки для деталей из нержавеющей стали.

Введение. Возрастающие требования к качеству обработки поверхностей повышают требования к нормированию параметров текстуры поверхностей и методам их измерений. В зависимости от метода обработки на поверхности заготовки в результате процесса съёма материала образуются следы обработки, являющиеся неровностями поверхности различной формы. Данные неровности образуют текстуру поверхности. Получение поверхности, близкой к идеальной (номинальной), может быть осуществлено лишь дорогостоящими методами обработки, такими как шлифование, доводка, полирование и др.

Текстурой поверхности называют повторяющиеся и случайные отклонения от геометрической (номинальной) поверхности, которые формируют трёхмерную топографию поверхности [1]. Текстуру поверхности описывают такие характеристики, как волнистость, направления неровностей, отклонение формы в пределах базовой длины, шероховатость и какие-либо изъяны, например, забоины, вмятины или глубокие царапины.

Рассматривая понятие шероховатости поверхности можно заключить, что это совокупность всех неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенными с помощью базовой длины [2]. То есть, шероховатостью поверхности в данном случае можно считать следы, оставленные инструментом в результате обработки.

К деталям пьезоэлектрических датчиков выдвигают строгие требования к шероховатости поверхностей, т. к. от неё и от геометрической точности деталей зависит их точность и функциональные характеристики [3]. Также ранее было доказано, что применяемые технологические режимы доводки плоскопараллельных поверхностей при изготовлении деталей пьезоэлектрических датчиков являются неоптимальными и технически необоснованными [4, 5].

Предлагаемая работа посвящена исследованию процесса финишной обработки плоскопараллельных поверхностей деталей пьезоэлектрических датчиков и определению оптимальных по точности режимов обработки на плоскодоводочных автоматах двухстороннего действия связанным абразивом.

Описание технологической операции доводки поверхностей. Известно два способа доводки плоскопараллельных поверхностей: ручная [6] и машинная [7].

Ручная доводка заключается в выполнении круговых движений и движений восьмёркой на чугунной или стеклянной плоской доводочной плите с использованием абразивных доводочных паст, где в качестве абразива может выступать корунд, карбид кремния, кубический нитрид бора или искусственные алмазные зерна.

Машинная доводка выполняется на специальном оборудовании – доводочных станках. Станки доводочной группы современных моделей предназначены для обработки поверхностей деталей с малыми допусками формы и размеров, а также малыми параметрами шероховатости. На плоскодоводочных станках заготовки располагаются в окнах сепараторов между двумя чугунными доводочными дисками, которые имеют плоские торцевые поверхности и вращаются в

Научный руководитель к.т.н., доцент, Андреев Ю.С.

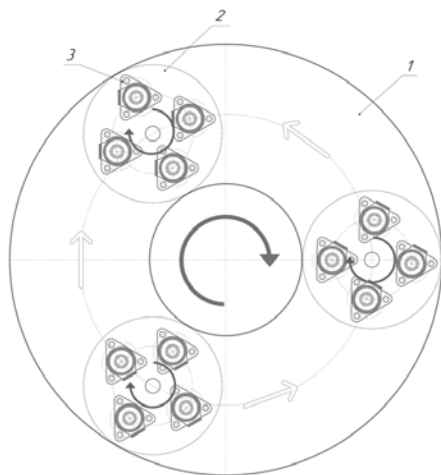


Рис. 1. Относительное перемещение при доводочной операции

противоположных направлениях с регулируемой частотой вращения (рисунок 1, где 1 – доводочный круг; 2 – сепаратор; 3 – обрабатываемая деталь). Поскольку сепараторы на доводочных дисках располагаются эксцентрично, при вращении дисков притираемые заготовки совершают сложные движения, и съём материала происходит с двух сторон одновременно. Обработка одновременно двух плоскопараллельных поверхностей повышает производительность процесса доводки и обеспечивает наилучший результат при необходимости получить малый допуск по параллельности и плоскостности.

Методика определения рациональных режимов доводки и её апробация. Для решения задачи оптимизации технологических режимов доводки была разработана методика определения оптимальных режимов доводочной операции, состоящая из пяти основных этапов:

1) изготовление и измерение геометрической точности опытных образцов с предварительным измерением допуска плоскостности, параллельности и шероховатости поверхностей; 2) определение комбинаций технологических режимов доводочной операции с использованием метода Тагути; 3) выполнение технологической операции доводки на плоскодоводочном автомате; 4) выполнение измерений и анализ полученных результатов; 5) разработка рекомендаций по определению рациональных режимов доводочной операции связанным абразивом.

После изготовления опытных образцов и выполнения предварительных измерений, выполненных на координатно-измерительной машине DEA GLOBAL Performance и профилометре Hommel Tester T8000, была сформирована ортогональная матрица Тагути, которая представлена в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Матрица Тагути для 4-х факторного эксперимента

Номер эксперимента	Скорость вращения, об/мин	Усилие прижима, Н	Длительность цикла, мин	Зернистость круга, мкм
1	16	285	10	7/5
2	16	440	25	60/40
3	16	685	40	125/100
4	32	285	25	125/100
5	32	440	40	7/5
6	32	685	10	60/40
7	48	285	40	60/40
8	48	440	10	125/100
9	48	685	25	7/5

После обработки экспериментальных образцов, выполненных из стали марки 12X18H10T, были выполнены измерения геометрической точности согласно разработанной методики. В результате рассмотрения параметров, характеризующих геометрическую точность образцов, и сопоставления с соответствующими установленными режимами обработки были выявлены закономерности между режимами доводки и параметрами, а также определена степень влияния каждого режима на конкретную характеристику поверхности с помощью метода Тагути.

Заключение. На основании экспериментальных исследований процесса финишной обработки плоскопараллельных поверхностей деталей пьезоэлектрических датчиков определены оптимальные по точности обработки режимы обработки на плоскодоводочных автоматах двухстороннего действия связанным абразивом. В результате работ сформирована таблица соответствия параметров, характеризующих геометрическую точность поверхности, и комбинации технологических режимов операции доводки, что позволяет устанавливать выбранный оптимальный режим.

ные режимы доводки при разработке технологического процесса на впервые разрабатываемые детали пьезоэлектрических датчиков, а также повысить темп выпуска уже изготавливаемых деталей датчиков.

В дальнейшем на основании проведенных исследований планируется разработка технологической документации для доводочной операции на плоскодоводочном автомате двухстороннего действия, а также проведение исследований по определению оптимальных режимов технологической операции доводки для твердосплавных марок сталей с использованием разработанной методики.

ЛИТЕРАТУРА

1. ИСО 4287:1997 Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры.
2. ГОСТ 25142–82 Шероховатость поверхности. Термины и определения.
3. **Исаев Р.М.** Влияние качества поверхностей функциональных деталей пьезоэлектрических датчиков вибрации на их эксплуатационные характеристики: дис. ... канд. техн. наук. – СПб, 2017.
4. **Isaev R.M., Andeev Y.S., Vasilkov S.D.** Effect of method for treatment of the functional surface of a piezoelectric vibration sensor on its sensitivity // *Procedia Engineering*. – Elsevier, 2017. – Vol. 176. – P. 96-106.
5. **Юдин С.А., Исаев Р.М.** Технологические особенности обработки поверхностей деталей пьезоэлектрического датчика вибрации // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение* - 2023. - Т. 66. - № 1. - С. 66-73.
6. **Косилова А.Г., Мешеряков Р.П.** Справочник технолога-машиностроителя Т. 1. – М.: Машиностроение, 1986. 656 с.
7. **Гашев Е.А.** Повышение эффективности доводки и полирования пластин интегральной оптики: дис. ... канд. техн. наук. – Рыбинск, 2018.

S.A. Yudin, (ITMO University, Saint Petersburg). **Determination of rational processing modes for the technological operation of finishing flat surfaces.**

Research of the finishing process of plane-parallel surfaces of instrument parts has been carried out. The requirements of the geometrical accuracy of the instrument parts are considered. The rational modes of the technological operation of finishing on double-acting flat-bottomed machines with a bonded abrasive are determined, and recommendations for their choice are formed when developing technological processes of finishing for stainless steel parts.

УДК 629.7.036

М.А. ТИГ, С.Н. БЕЛЯЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА УЗЛАХ ГИРОПРИБОРОВ

Рассмотрены технологические аспекты процесса формирования тонкопленочных покрытий на плоских поверхностях методом магнетронного напыления на примерах изготовления пластины-основания чувствительного элемента микромеханического акселерометра и измерительной пластины магнитометра криогенного акселерометра. Разработана математическая модель формирования покрытия равномерной толщины, определены основные значимые параметры процесса напыления. На основе экспериментальной проверки обоснована адекватность модели.

Введение. В современных инерциальных навигационных системах одну из доминирующих позиций занимают микромеханические гироскопы и акселерометры [1, 2], технологический цикл изготовления чувствительных элементов которых включает в себя напыление функциональных тонкопленочных покрытий на плоскую поверхность пластины-основания. В чувствительном элементе криогенного акселерометра (ЧЭ КА) также предполагается напыление сверхпроводящего функционального покрытия на плоскую измерительную пластину с последующим конфигурированием измерительного витка сверхпроводящего квантового интерферометрического устройства (СКВИД), (англ. superconducting quantum interference device, SQUID) магнитометра криогенного акселерометра [3, 4]. К указанным функциональным покрытиям предъявляется ряд жестких требований, в частности, по геометрическим параметрам, таким как равномерность получаемого покрытия по толщине.

В работе рассмотрено формирование методом магнетронного напыления [5] металлизационного слоя из алюминия на пластине-основании чувствительного элемента микромеханического акселерометра (ЧЭ ММА), выполненной из оксида кремния. Требуемая толщина покрытия составляет 1 мкм при неравномерности покрытия по толщине не более 0,2 мкм.

Целью исследований являлась разработка математической модели процесса нанесения покрытия равномерной толщины и создание технологии формирования тонкопленочных покрытий на плоских поверхностях, которая обеспечит требуемую равномерность покрытия по толщине.

Моделирование процесса формирования покрытия. Метод магнетронного напыления предполагает распыление материала с поверхности мишени на подложку.

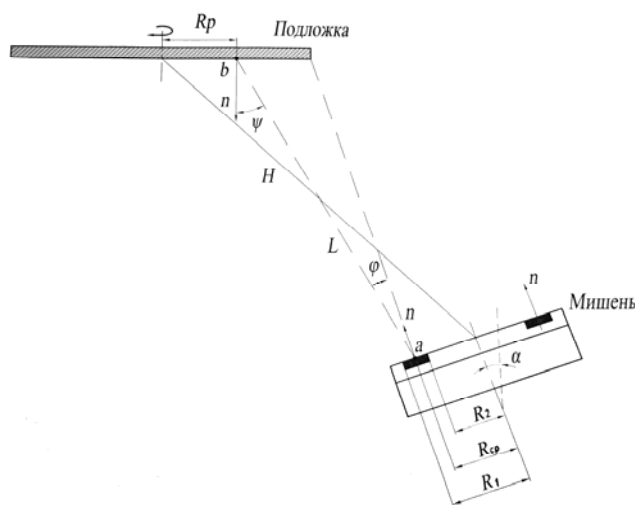


Рис. 1. Схема напыления покрытия α - угол наклона мишени относительно плоскости, перпендикулярной плоскости подложки; H - расстояние от центра мишени до центра подложки; a , b - точки на мишени и подложке, соответственно; R_1 , R_2 , $R_{ср}$, R_p - наружный, внутренний и средний радиусы кольцевой проточки на мишени, и радиус точки b на подложке, соответственно; n - нормали к поверхностям мишени и подложки; L - расстояние от точки a до точки b ; φ - угол между нормалью к плоскости мишени и вектором L ; ψ - угол между нормалью к плоскости подложки и вектором L .

Научный руководитель: д.т.н. Щербак А.Г.

При этом мишень имеет кольцевую зону испарения напыляемого материала [5- 7]. В рамках исследований рассматривались условия, когда диаметр подложки превышал диаметр мишени по меньшей мере на 50%. Основными значимыми параметрами процесса, влияющими на геометрические параметры покрытия, являются угол наклона α мишени относительно плоскости, перпендикулярной плоскости подложки (пластины-основания ЧЭ ММА или платы ЧЭ КА) и расстояние H от центра мишени до центра подложки (рис. 1). При этом очевидно, что для обеспечения требований по геометрии покрытия следует задать вращение подложки вокруг ее центральной оси.

Согласно [5], скорость роста покрытия в произвольной точке на поверхности v пропорциональна зависимости:

$$v \sim \frac{\cos \beta}{l^2} \quad (1)$$

где β – угол между направлением потока и нормалью к поверхности; l – расстояние от источника до точки поверхности. Учитывая, что время напыления – постоянная величина, толщина покрытия в произвольной точке поверхности определяется этой же зависимостью. Задавая координаты x, y, z точки a , лежащей на окружности с радиусом R_{cp} на поверхности мишени, и координаты x', y', z' точки b на подложке с центром координат, расположенном в центре мишени, можно записать, что для рассматриваемого случая (рисунок 1), толщина покрытия h на подложке в точке b , напыляемого из точки a , определяется выражением:

$$h_{(x,y,z) \rightarrow (x',y',z')} = \frac{\cos \varphi \cos \psi}{|L|^2}, \quad (2)$$

где φ – угол между нормалью к плоскости мишени и вектором L ; ψ – угол между нормалью к плоскости подложки и вектором L . Путем последовательных геометрических преобразований была установлена взаимосвязь углов φ и ψ со значимыми параметрами α (угол наклона мишени относительно плоскости, перпендикулярной плоскости подложки) и H (расстояние от центра мишени до центра подложки). Для получения выражения зависимости толщины покрытия $h(\rho')$ пластины-основания необходимо проинтегрировать по всей поверхности кольцевой зоны мишени, а затем усреднить, поскольку подложка равномерно вращается. В конечном счёте, зависимость профиля толщины покрытия имеет вид:

$$h(\rho') = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} R_{cp} \Delta R \frac{(H_z + \rho' \cos(\theta') \sin(\alpha))(-H_x \sin \alpha + R_{cp} \cos(\theta) \sin \alpha + H_z \cos \alpha)}{\left((H_x + \rho' \cos(\theta') \cos(\alpha) - R_{cp} \cos(\theta))^2 + (\rho' \sin(\theta') - R_{cp} \sin(\theta))^2 + (H_z + \rho' \cos(\theta') \sin(\alpha))^2 \right)^{3/2}} d\theta d\theta', \quad (3)$$

где ΔR – ширина кольцевой зоны мишени; H_x и H_z – компоненты вектора H , ρ', θ' – полярные координаты в плоскости подложки, θ – полярная координата в плоскости мишени.

Неравномерность по толщине определяется, как среднеквадратичное отклонение толщины от её среднего значения, нормированное на среднюю толщину. Для экспериментально-исследовательской работы было выбрано фиксированное расстояние от мишени до подложки, а варьирование угла наклона α осуществлялось в пределах от 5° до 20° . Расчет неравномерности толщины покрытия с использованием формулы (3) показал, что с увеличением угла наклона уменьшается неравномерность покрытия. Эксперименты показали, что наилучшими геометрическими характеристиками обладает покрытие, где ориентация пластины-основания производится под углом 14° (при прочих равных условиях), что согласуется с расчетом по выражению (3) где указанный угол составляет $15,5^\circ$. Некоторая погрешность в расчете обусловлена незначительным влиянием параметров напыления, таких как, например, давление рабочего газа и мощность магнетрона, которые не учитывались в расчёте в связи с тем, что они влияют в основном на скорость распыления материала. Толщина покрытия и её неравномерность исследовались на профилемере KLA-Tencor P-17. Исследования толщины производились по ступеньке на покрытии в местах фиксации экранов и трафаретов оснастки. Толщина покрытия соста-

вила 0,95-0,97 мкм, а неравномерность по толщине по диаметру пластины – порядка $\pm 0,08-0,09$ мкм, что удовлетворяет предъявляемым техническим требованиям.

Заключение. Разработана математическая модель процесса магнетронного напыления покрытия на плоскую поверхность основы с выявлением зависимости профиля толщины покрытия. Предложенный подход позволяет определить параметры процесса, обеспечивающие незначительную неравномерность покрытия по толщине. Экспериментальные данные показали согласованность расчетов с реальными результатами и подтвердили адекватность разработанной модели. Выявлены основные значимые параметры процесса напыления, такие как угол наклона магнетрона относительно плоскости, перпендикулярной плоскости подложки α и расстояние от центра магнетрона до центра подложки H . Выбраны оптимальные режимы процесса формирования покрытия. Результаты исследований могут быть использованы в технологическом цикле изготовления пластин-оснований ЧЭ ММА и измерительных пластин СКВИД магнетометра ЧЭ КА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **В.Г. Пешехонов.** Перспективы развития гироскопии. «Гироскопия и навигация», 2020, №4, с.3 – 10.
2. **А.Н. Бойко, А.Р. Заводян, Б.М. Симонов.** Микромеханические акселерометры. Моделирование элементов конструкции и изготовление. Электроника: Наука, Технология, Бизнес №8/2009, с. 100-103.
3. **D. Drung; C. Assmann; J. Beyer; A. Kirste; M. Peters; F. Ruede & Th. Schurig.** Highly sensitive and easy-to-use SQUID sensors. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 17 (2): 699–704, 2011
4. **М.А. Туманова, А.Г. Щербак.** Технологические аспекты формирования функциональных элементов при изготовлении узлов криогенных приборов. Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова, 2018 г.
5. **Б.С. Данилин, В.К. Сырчин.** Магнетронные распылительные системы. Москва, Радио и связь, 1982, с.72.
6. **Б.С. Данилин.** Применение низкотемпературной плазмы для нанесения тонких пленок. Москва, Энергatomиздат, 1989, с.328.
7. **В.В. Черниговский, С.А. Марцынюков, А.А. Лисенков, Д.К. Кострин.** Исследования распределения толщины покрытий, наносимых методом магнетронного распыления. Санкт-Петербург, Известия вузов: ЛЭТИ № 4/2018, с 5-12.

M.A. Tit, S.N. Belyaev (Concern CSRI Electropribor, JSC, Saint-Petersburg). **Modeling of the thin-film functional structures process on the units of gyro devices.**

Technological aspects of the thin-film coatings making process on flat surfaces by magnetron sputtering are considered on the examples of making a base plate for the sensitive element of a micromechanical accelerometer and a measuring plate for the magnetometer of the cryogenic accelerometer. A mathematical model for the making of a coating with uniform thickness has been developed, main significant parameters of the sputtering process have been determined. The adequacy of the model is proved on the basis of experimental verification.

УДК 681.78

А. С. ЗАВИТАЕВ, М. И. ЕВСТИФЕЕВ
(Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО ГИРОСКОПА

В работе рассматриваются технологические особенности, возникающие при проектировании ядерного магнитного гироскопа. Исследуется опыт зарубежных коллег, занимающихся проектированием систем, основанных на эффекте ядерного магнитного резонанса.

Введение. Для создания малогабаритных систем навигации высокодинамичных объектов в настоящее время существует потребность в гироскопах, превосходящих микромеханические по точности и волоконно-оптические по виброустойчивости и массогабаритным характеристикам. Указанная потребность, которая не может быть удовлетворена существующими типами гироскопов, с одной стороны, а также появление новых технологий и методов наблюдения ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с другой стороны, привели к возвращению интереса к гироскопам, принцип действия которых основан на данном эффекте.

Ядерный магнитный гироскоп (ЯМГ) – новый вид гироскопов, чувствительным элементом которого является ячейка с ансамблем атомов, обладающих макроскопическим магнитным моментом. Суть эффекта ЯМР заключается в том, что под воздействием заданного магнитного поля магнитные моменты атомов переориентируются и начинают прецессировать вдоль вектора магнитного поля. Частота прецессии магнитного момента ядер в постоянном магнитном поле зависит от угловой скорости вращения гироскопа [1, 2, 3].

При разработке ЯМГ необходимо обеспечить ряд требований к среде, в которой находятся атомы, для того, чтобы было возможно достигнуть уровня тактической точности. Для их достижения в ходе проектирования требуется решить технологические особенности, которые возникают как в силу малых габаритов гироскопа, так и набором требований. Если объединить системы гироскопа в 3 основные, а именно магнитную, систему термостатирования и оптическую, то возникнут технологические особенности в процессе разработки, которые рассматриваются в текущей работе:

- Обеспечение требуемого магнитного поля;
- Создание системы термостатирования внутреннего объема гироскопа;
- Обеспечение стабильности показателей оптической системы;
- Сохранение стабильности геометрических параметров в условиях внешних воздействий.

Технологические особенности формирования магнитного поля. Для обеспечения стабильной работы гироскопа необходимо создать экранирование от внешних магнитных полей, а так же сформировать внутреннее магнитное поле с минимальным значением градиента (порядка 10 нТл) и стабильным постоянным значение магнитной индукции (20 мкТл) [4]. Для достижения данных показателей используется 5-ти слойный экран из пермаллоя, а так же система катушек, представляющая собой систему из 4 катушек, называемая системой колец Баркера (рис. 1). Технологической особенностью является создание малогабаритных версий катушек и экранов с диаметром катушки около 10 мм. При этом необходимо соблюдать взаимное расположение катушек и ячейки с точностью на уровне 10 мкм [5]. В настоящее время предполагается изготавливать каркас катушки с применением аддитивных технологий. Иностранцы рассматривают возможность применения МЭМС технологий при изготовлении магнитной системы [5, 6].

Технологические особенности термостатирования. В ячейке ядерного магнитного гироскопа находится смесь из двух элементов: цезия (Cs) и ксенона (Xe). Для того чтобы добиться их оптимального распределения по объему ячейки, необходимо выдерживать температуру ~ 90 °С. Так как в текущей конструкции гироскопа (Рис.1) не предусмотрена термоизоляция ячейки от других эле-

ментов, то они деформируются в результате нагрева. Кроме деформаций при изменении температуры меняются параметры работы некоторых электронных устройств, к примеру при прогреве корпуса прибора снижается мощность излучения лазеров [7]. Таким образом, возникает необходимость термоизолировать ячейку от других элементов конструкции. При этом должен быть обеспечен минимальный градиент температур как внутри ячейки (~ 0.05 °C), так и по всему объему гироскопа (~ 1 °C)[4]. Решение комплекса вопросов по созданию малогабаритной системы термостабилизации представляет собой технологическую особенность.

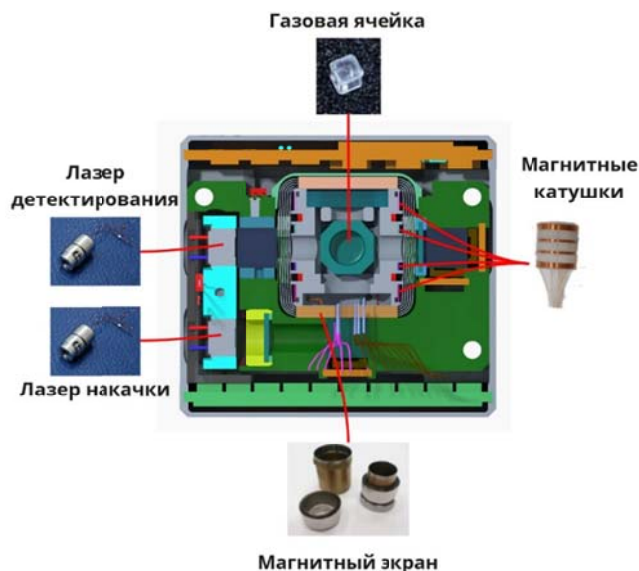


Рис. 1. Конструкция ЯМГ

Технологические особенности оптической системы. В оптическую систему входят газовая ячейка и лазеры детектирования и накачки. Необходимо обеспечить расхождение лазерных лучей на уровне не более 2° , при этом деполяризация лучей при прохождении через ячейку не должно превышать 5% [4]. Для обеспечения данных параметров необходимо обеспечивать параллельность стенок ячейки [8]. Отдельной технологической особенностью является контроль газовой смеси в изготовленных ячейках в процессе изготовления [9].

Сохранение стабильности геометрических параметров. Важно, чтобы в процессе работы геометрические параметры конструкции гироскопа оставались неизменными. Это необходимо как для обеспечения сохранности изначальных требований к точности установки катушек относительно ячейки, так и минимизации технологических погрешностей, возникающих при смещениях компонентов. Потому что из-за данных смещений возможны уменьшения предельной чувствительности гироскопа и изменения его выходного сигнала [8, 10].

Заключение. В ходе работы проведен анализ особенностей проектирования ядерного магнитного гироскопа. Выявлены основные проблемы и направления технологических исследований при проектировании магнитных, термостатирующих и оптических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко А.Н., Захарова Е.А. Исследование зависимости качества резонанса от распределения цезия в ячейке квантового датчика вращения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 567–573. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573
2. 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 ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2014. – С. 35–42.
3. Larsen M., Bulatowicz M. Nuclear magnetic resonance gyroscope: for DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program // Proc. IEEE Int. FrequencyControl Symposium, 2012. doi: 10.1109/fcs.2012.6243606

4. **А.К. Вершовский, Ю.А. Литманович, А.С. Пазгалев, В.Г. Пешехонов.** Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. №1. С. 55-80. DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080
5. Sakamoto, Y., Bidinosti, C.P., Ichikawa, Y. *et al.* Development of high-homogeneity magnetic field coil for ¹²⁹Xe EDM experiment. *Hyperfine Interact* **230**, 141–146 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10751-014-1109-5>
6. Alexander A., B., Svetlana A., Z., Denis Yu., O., & Vladimir E., T. (2018). Fabricating a high aspect ratio ferromagnetic core 3D micro-inductor using MEMS technology. *Nanoindustry Russia*, 511–511. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2018.82.511>
7. **Алексеева В.А.,** Лукин А.В., Гагарский С.В., Сибирев М.Ю., Ханков С.И. Температурная зависимость энергетических параметров лазеров на основе неодимсодержащих кристаллов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2001. №4. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/temperaturnaya-zavisimost-energeticheskikh-parametrov-lazero-va-na-osnove-neodimsoderzhaschih-kristallov>
8. R. M. Noor and A. M. Shkel, "MEMS Components for NMR Atomic Sensors," in *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 27, no. 6, pp. 1148-1159, Dec. 2018, doi: 10.1109/JMEMS.2018.2874451.
9. **Шевченко А.Н., Захарова Е.А.** Методика формирования требований к градиенту магнитного поля при определении метрологических характеристик ячеек ядерного магнитного гироскопа // Альманах научных работ молодых ученых университета ИТМО. XLVII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО. СПб., 2018. С. 176–179
10. Evstifeev M.I., Zavitaev A.S. Estimation of the nuclear magnetic gyroscope sensitivity to inertial influences // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering - 2022, Vol. 1215, No. 012014, pp. 1-8

A. S. Zavitaev, M. I. Evstifeev (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, St. Petersburg). **Nuclear magnetic resonance gyroscope engineering features**

Abstract. The paper considers specific features of nuclear magnetic gyroscope engineering. International experience in designing the systems based on the nuclear magnetic resonance effect is studied.

УДК 681.51

Н. С. КАРАНИН, О. С. ЮЛЬМЕТОВА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ГЛУБОКОГО РЕАКТИВНО-ИОННОГО ТРАВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Обоснована необходимость определения температуры чувствительного элемента во время процесса глубокого реактивно-ионного травления. Представлена комплексная модель переноса тепловой энергии от различных источников на чувствительный элемент. Представлены результаты нагрева чувствительного элемента во время процесса травления.

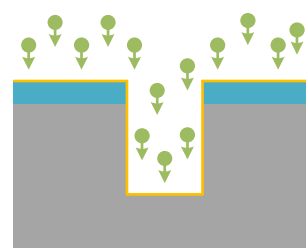
Введение. При формировании чувствительного элемента микромеханического акселерометра [1] используют чаще всего глубокое реактивно-ионное травление, основанное на Bosch процессе [2]. Вторым существующим методом является криогенное травление [3]. Преимуществами Bosch процесса являются высокие скорости травления кремния, высокая селективности кремния к оксиду кремния, фоторезисту, высокое аспектное соотношение (отношение размера вытравливаемого элемента к его глубине). К недостаткам относят влияние аспектного соотношения вытравливаемых элементов на их скорость травления [4] и микрогеометрию стенок (scallops) [5]. Параметры процесса (селективность, подтрав под маску) сильно зависят от равномерности температуры поверхности подложки. Подложкодержатель осуществляет охлаждение и поддержание постоянной температуры пластины на электроде смещения за счет накачки гелия под постоянным давлением между электродом и обратной стороной пластины [6]. Однако подвижная масса, формируемая в результате травления чувствительного элемента, удерживается торсионным подвесом [1], площадь которого составляет 1680 мкм². Кроме этого, во время травления эффективная площадь теплоотвода подвижной массы постоянно уменьшается, что приводит к неравномерному распределению температуры по поверхности чувствительного элемента, что влияет на параметры процесса травления. Целью работы являлось моделирование тепловых процессов глубокого реактивно-ионного травления для определения температуры чувствительного элемента микромеханического акселерометра с выявлением источников тепловой энергии на каждой стадии процесса.

Моделирование тепловых процессов глубокого реактивно-ионного травления. Для определения распределения температуры T по поверхности чувствительного элемента методом конечного элементного анализа используют уравнение Фурье [6]:

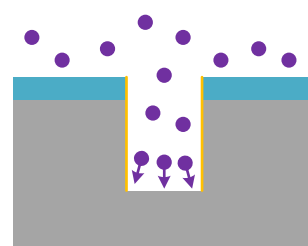
$$\frac{dT}{dt} - \lambda \Delta T = \sum J_{in} - \sum J_{out}, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $\sum J_{in}$ – сумма входящих тепловых потоков, $\sum J_{out}$ – сумма выходящих тепловых потоков, Δ – оператор Лапласа. Для определения источников входящих тепловых потоков на чувствительный элемент была проанализирована все стадии глубокого реактивно-ионного травления, представленные на рисунке 1.

1. Ионное травление пассивирующего слоя



2. Реактивное травление кремния



3. Осаждение пассивирующего слоя

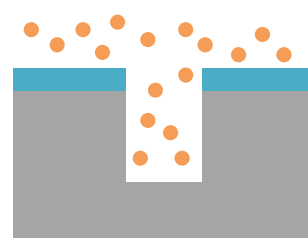


Рис. 1. Схематическое изображение Bosch процесса

Первой стадией является ионное травление пассивирующего слоя. Ионная бомбардировка является основным источником нагрева подложки в Bosch процессе [7, 8]. Удельный тепловой поток можно определить следующим образом [8]:

$$J_{ion} = 0,6n_i u_B (2kT_e + e(V_P - V_S) + E_{rec}), \quad (2)$$

где u_B – боровская скорость, n_i – концентрация ионов, T_e – температура электронов, V_P – потенциал плазмы, V_S – потенциал на подложке, E_{rec} – энергия рекомбинации ионов.

Вклад остальных составляющих теплового потока значительно меньше на этой стадии, поэтому они не учитывались [7].

Второй стадией является травление кремния, основным источником тепла является энергия, выделяемая в результате следующей экзотермической реакции:



где ΔH_{react} – тепловой эффект реакции.

Удельную мощность теплового потока в результате реакции можно определить следующим образом [8]:

$$J_{react} = \frac{\rho_{Si} v_g \Delta H_{react}}{M_{Si}}, \quad (4)$$

где ρ_{Si} – плотность кремния, v_g – скорость травления кремния, ΔH_{react} – тепловой эффект реакции, M_{Si} – молярная масса кремния.

В третьей стадии основными источниками тепла являются нейтральные частицы и энергия релаксации их возбужденных состояний на поверхности, а также энергия в результате конвекции плазмообразующего газа на поверхность подложки [8]. Также данные источники тепла были учтены во второй стадии.

На рисунках 2–3 представлены результаты моделирования тепловых процессов для микромеханического акселерометра с вытравленным чувствительным элементом. На рисунке 2 приведено распределение усредненных по времени осаждения полимера температур по поверхности фрагмента чувствительного элемента, на рисунке 3 представлены зависимости средней, минимальной и максимальной температур на подвижной массе в одном цикле Bosch процесса.

Увеличение температуры элементов подвижной массы микромеханического акселерометра при плазмохимическом травлении негативно влияет на их геометрию, а также снижает селективность процесса.

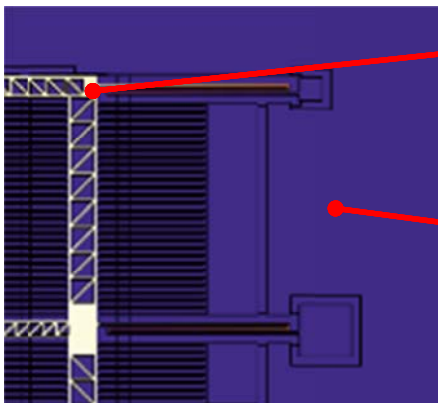


Рис. 2. Распределение температуры по поверхности чувствительного элемента микромеханического акселерометра

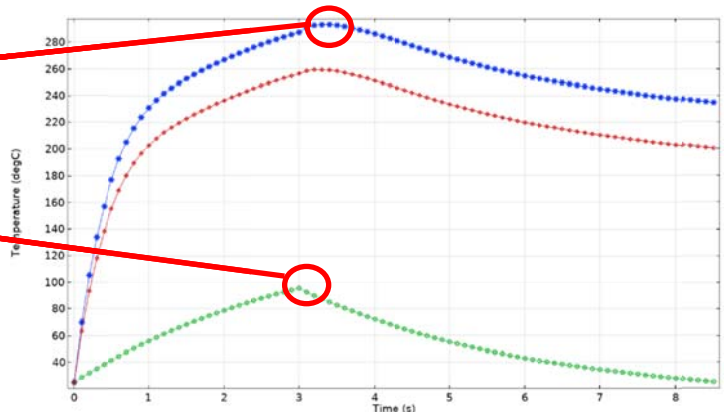


Рис. 3. Зависимости средней (красная кривая), минимальной (зеленая кривая) и максимальной (синяя кривая) температур от времени в одном цикле Bosch процесса.

Заключение. Проведено моделирование тепловых процессов глубокого реактивно-ионного травления чувствительного элемента микромеханического акселерометра. Рассмотрены основные источники тепловой энергии, приходящей на поверхности чувствительного элемента для каждой стадии цикла Bosch процесса. Приведены результаты моделирования для вытравленного чувствительного элемента микромеханического акселерометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **N.S. Karanin.** Deep Reactive Ion Etching of Device Layer during Manufacture Micromechanical Accelerometer. *2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*. 2022. pp. 962-965.
2. **Adrian J T Teo, Holden Li, Say Hwa Tan and Yong-Jin Yoon.** An optical MEMS accelerometer fabricated using double-sided deep reactive ion etching on silicon-on-insulator wafer. *IOP Publishing Ltd Journal of Micromechanics and Microengineering*. 2017. Vol. 27. № 6. 8 pp.
3. **H. Miao, L. Chen, M. Mirzaeimoghri, R. Kasica and H Wen.** Cryogenic Etching of High Aspect Ratio 400-nm Pitch Silicon Gratings. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2016. Vol. 25. № 5. pp. 963-967.
4. **S. L. Lai, D. Johnson, and R. Westerman.** Aspect ratio dependent etching lag reduction in deep silicon etch processes. *Journal of Vacuum Science & Technology*. 2006. P. 1283-1288.
5. **Park, J.S., Kang, D.H., Kwak, S.M. et al.** Low-temperature smoothing method of scalloped DRIE trench by post-dry etching process based on SF6 plasma. *Micro and Nano Syst Lett*, 2020.
6. **Yeon Ho Im, Yoon-Bong Hahn.** Heat Transfer between Wafer and Electrode in a High Density Plasma Etcher. *Korean J. Chem. Eng.* 2002. P. 347-350.
7. **H. Kerstena, H. Deutscha, H. Steffena, G.M.W. Kroesenb, R. Hipplera.** The energy balance at substrate surfaces during plasma processing. *Vacuum*. 2001. P. 385-431.
8. **Dussart Rémi, Thomann Anne-Lise and Semmar Nadjib.** A Heat Flux Microsensor for Direct Measurements in Plasma Surface Interactions. *Microsensors*. 2011. P. 87-108.

N.S. Karanin, O.S. Yulmetova (Concern CRI Electropribor JSC, Saint Peterburg). **Simulation of thermal processes of deep reactive ion etching of sensitive element of micromechanical accelerometer**

Abstract. The necessity of determining the temperature of the sensitive element during the process of deep reactive-ion etching is substantiated. A complex model of thermal energy transfer from various sources to a sensitive element is presented. The results of heating the sensitive element during the etching process are presented.

Секция 7.
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.396.

Е.Г. ЛИТУНЕНКО, Ю.М. СКОРОДУМОВ, Е.В. ЛУКОЯНОВ, Д.Ю. ПОЛЯКОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

МОДЕЛЬ СЕТИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Предлагается структура алгоритмической модели сети подводных аппаратов. Приведено описание модели сети и результаты моделирования предложенных алгоритмов.

Введение. Сети подводных аппаратов занимают важное место в современном мире [1]. Они служат для проведения различных океанографических исследований, строительства подводных сооружений, их технического обслуживания и т.д. В связи с этим проблема проектирования сетей АНПА, в том числе, их моделирование, является актуальной. Потребность в исследовании моделей сетей АНПА объясняется их существенными особенностями, одной из важнейших среди которых является низкая скорость передачи сообщений. В настоящем реферате обсуждается вариант структуры имитационной модели сети подводных аппаратов. Модель фокусируется на исследовании информационного обмена в сети подводных аппаратов.

Постановка задачи. Предполагается, что существует подводная сеть, состоящая из идентичных узлов, функционирующих по одному и тому же алгоритму. Сеть стационарна, что гарантирует постоянство средних значений интенсивностей потоков обменов (заявок), обслуживаний и очередей [2]. В результате взаимного обмена сообщениями каждому узлу известны координаты всех остальных узлов, что позволяет ему строить минимальные по расстоянию маршруты доставки сообщений. Доставка сообщений происходит с использованием некоторого известного алгоритма маршрутизации, опирающегося на таблицы маршрутизации [3]. Для любого сообщения маршрут всегда существует, т.е. аппараты не расходятся слишком далеко друг от друга. Каждый абонент сети является принимающим, передающим и ретранслирующим. С заданным периодом абоненты сети передают пакет сообщений, который состоит из собственных сообщений, сгенерированных передающим абонентом, а также из сообщений, полученных от других абонентов на предыдущем периоде, которые необходимо ретранслировать.

В общем случае различным упорядоченностям сообщений, передаваемых узлом, будет соответствовать различная оперативность доставки сообщений. Исследуемый подход ориентирован на поиск наилучшей упорядоченности [4]. В качестве критерия оперативности при этом используется либо суммарное время Δ_s доставки всех сообщений из передаваемой последовательности, либо среднее по сообщениям время $\bar{\Delta}$ доставки. При этом под временем доставки Δ сообщения, находящегося на k -й позиции в очереди рассматриваемого узла, понимается сумма времени ожидания в очереди $e_{[k]}^w$ передающего узла и времени переноса $e_{[k]}^t$ сообщения (время от момента начала передачи сообщения до момента конца его приема) между передающим узлом и узлом-адресатом

$$\Delta_{[k]} = e_{[k]}^w + e_{[k]}^t. \quad (1)$$

В случае многошагового маршрута, когда требуется ретрансляция сообщений через несколько абонентов сети, выражение для времени доставки сообщения принимает вид:

$$\Delta_{[k]} = \sum_{i=1}^{r_{[k]}} (e_{[k],i}^w + e_{[k],i}^t), \quad (2)$$

Научный руководитель: профессор, д.т.н., г.н.с. Колесов Н.В.

где $r_{[k]}$ – общее число шагов маршрута, по которому передается сообщение, находящееся на k -й позиции в очереди, i – порядковый номер шага маршрута.

Ясно, что в случае многошагового маршрута предсказать размер и содержание очередей сообщений в узлах-ретрансляторах на маршруте следования передаваемого сообщения невозможно. В связи с этим модельный эксперимент оказывается единственной возможностью для получения реальных оценок для времени доставки. Заметим, что доставка сообщений происходит с участием средств обработки информации в узлах, однако, воспользовавшись приведенными выражениями легко убедиться, что вклад времени обработки в результирующее время доставки мал и составляет доли процента.

Структура модели сети. В силу изложенных выше соображений основной особенностью предлагаемой компьютерной модели является фокусировка на процессе перемещений сообщений между узлами. При этом каждый узел в структуре данных модели представляется двумя очередями сообщений – входной и выходной. В результате формируются два двумерных массива очередей, в которых j -я строка – входная или выходная очередь сообщений j -го узла. Каждое сообщение может находиться либо в одной из этих очередей, либо в среде распространения, поэтому возникла необходимость в соответствующем массиве сообщений. Предполагается, что принимаемое сообщение находится в среде и не находится во входной очереди, пока в среде распространения присутствует хотя бы какая-то часть сообщения. Аналогично предполагается, что передаваемое сообщение находится в выходной очереди и не находится в среде распространения, пока в очереди присутствует хотя бы какая-то часть сообщения. Для удобства в модель добавлен массив доставленных сообщений.

При реализации модели используется объектно-ориентированный подход, при котором все элементы модели являются объектами соответствующих классов. Модель включает в себя следующие классы: класс узлов (абонентов) сети, отвечающий за координаты узла и траекторию движения; модем, отвечающий за обработку сообщений, излучение и прием сообщений из среды, а также маршрутизацию сообщений; генератор, передающий в модем команды на формирование излучение с заданной частотой; планировщик, отвечающий за упорядочивание выходной очереди сообщений в модеме перед излучением; класс среды распространения сигнала, отвечающий за перенос сообщений между абонентами и передачу их во входные очереди модемов. Тактирование модели для осуществления псевдопараллельного процесса моделирования и создание объектов классов осуществляется в общем потоке программы. Диаграмма классов в упрощенном виде приведена на рис. 1.

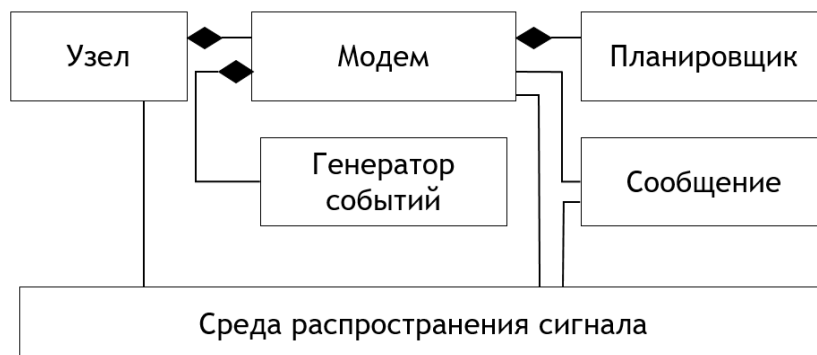


Рис. 1 Диаграмма классов

Процесс моделирования осуществляется псевдопараллельно, т.е. он разбивается на шаги. На каждом шаге все сообщения перемещаются на расстояние, определяемое длительностью шага. Время моделирования разбивается на отрезки, соотносимые с интервалами передачи отдельных узлов.

Предложенная модель позволяет произвести апробацию алгоритмов информационного обмена в сети подводных аппаратов и оценить их эффективность путем сравнения времени нахождения сообщений в сети при использовании предлагаемых алгоритмов планирования и

других известных алгоритмов. При этом, она дает возможность произвести оценку при различных параметрах сети: количество узлов, величина интервалов информационных обменов, параметры связи и т.д.

Заключение. В реферате предложена имитационная модель сети АНПА, для которой определены основные допущения, составные модули и их функционал. В имитационной модели реализованы алгоритмы упорядочивания сообщений. В ходе дальнейших исследований планируется расширение функционала имитационной модели и апробация на натуральных данных.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФ № 22-29-00339

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hamilton A., Holdcroft S., Fenucci D., Mitchell P., Morozs N., Munafò A., Sitbon J.** Adaptable Underwater Networks: The Relation between Autonomy and Communications // Remote Sensing. 2020. V.12.
2. **Клейнрок Л.** Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
3. **Тель Ж.** Введение в распределенные алгоритмы. М.: МЦНМО, 2009. 616 с.
4. **Грузликов А.М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М.** Оптимизация информационных обменов в сети автономных абонентов (ТиСУ), № 6, 2022

E.G. Litunenko, Iu.M. Skorodumov, E.V. Lukoyanov, D.Iu. Polyakov (CSRI Electropribor, Saint-Petersburg). **Simulation model of autonomous underwater vehicles network**

Abstract. The structure of the algorithmic model of the network of underwater vehicles is proposed. The description of the network model and the simulation results of the proposed algorithms are given.

УДК 681.51

С.С. ВАРВАНИН, Е.Г. ЛИТУНЕНКО
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург)

Р.Л. КРЮЧКОВ, А.Е. ПАНАРИН
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), г. Санкт-Петербург)

ОРГАНИЗАЦИЯ НАДЕЖНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА В МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЗВУКОПОДВОДНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Представлено описание макета аппаратно-программных средств для экспериментального подтверждения возможности создания надежного звукоподводного канала обмена информацией между агентами сети. Особенностью реализованного алгоритма обмена являются: установка соединения между агентами, циклическое формирование запросов на передачу информации, устранение дублирования пакетов, уведомление отправителя о результатах приема-передачи. Предложенный алгоритм гарантирует целостность передаваемой информации. Приведены результаты натурных испытаний макета в акватории Ладожского озера.

Введение. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) широко применяются при проведении работ в экстремальных условиях, что позволяет решить задачу сбора информации в интересах геологоразведочных, поисковых, океанографических и других исследований.

Одно из ограничений использования АНПА – фактор времени, например, в задачах поиска и обследования затонувших объектов, патрулирования и др. В таких случаях применяется мультиагентный подход, с обменом информацией между агентами для координации совместных действий. При построении мультиагентной системы на основе АНПА, информационное взаимодействие между аппаратами осуществляется с использованием аппаратно-программных средств (АПС) звукоподводной связи (ЗПС). Особенностью распространения сигнала ЗПС между двумя агентами сети является существенная зависимость обмена от текущих гидроакустических условий района, а также от параметров движения АНПА. Указанные особенности приводят как к существенному ограничению скорости обмена (килобиты в секунду), так и к ограничению радиуса обмена информацией между двумя аппаратами [1-3].

Среди ключевых задач, влияющих на результат выполнения миссии группой АНПА, выделяется наличие надежной связи между агентами сети, а также обеспечение взаимного позиционирования относительно друг друга [3–5]. Надежность информационного обмена обеспечивается контролем целостности передаваемой информации, а также алгоритмом и протоколом информационно-технического взаимодействия агентов, обеспечивающим предварительную установку соединения между ними, повторный запрос передачи пакетов в случае их потери, устранение дублирования при получении копий одного пакета, уведомление отправителя о результатах получения пакетов. Безусловно, организация надежной связи в сети приводит к дополнительным накладным расходам на передачу (повтору) пакетов, что ведёт к уменьшению суммарной скорости обмена, и как следствие, чем больше ошибок при разовом излучении – приеме, тем больше накладных расходов требуется для обеспечения целостности передаваемой информации.

Доклад посвящён вопросу апробирования алгоритма надежного информационного обмена в мультиагентной системе и разработки макета АПС ЗПС для экспериментального подтверждения возможности организации надежного информационного обмена между агентами сети. Приводятся результаты натурных испытаний разработанного макета.

Постановка задачи. Для подтверждения возможности организации надежного информационного обмена необходимо решить следующие задачи:

– разработать и апробировать алгоритм надежного информационного обмена в мультиагентной системе;

– разработать макет АПС ЗПС, состоящий минимум из двух агентов, имитирующих группу АНПА.

Указанные требования определяют структуру программного обеспечения и набор технических решений макета АПС ЗПС.

Структура макета АПС ЗПС и состав программного обеспечения. Разработанный в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (далее Концерн) макет АПС ЗПС состоит из приемопередающих узлов, включающих приемную и передающую аппаратуры. Все узлы оснащены ненаправленными в горизонтальной плоскости излучающими и приемными антеннами. В состав каждого узла входят:

- вычислительный модуль;
- электронные модули формирования и приема сигналов: цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи, усилители и фильтры;
- технологическая аппаратура, обеспечивающая эксплуатацию АПС ЗПС в условиях испытательного полигона;
- набор интерфейсных модулей для обеспечения взаимодействия пользователя с узлами посредством программного обеспечения системы управления и ввода/вывода данных на автоматизированное рабочее место оператора.

За основу разработки информационного обмена по гидроакустическому каналу связи между узлами макета АПС ЗПС учтен ранее полученный опыт Концерна в части осуществления гидроакустической сетевой связи [1-3,6]. Реализация информационного обмена по гидроакустическому каналу связи основана на связных комбинированных сигналах, состоящих из синхронизирующих и информационных частей [7].

Синхронизирующая часть $S(t)$ – реализуется в виде суммы широкополосного ГЧМ-импульса (гиперболическая частотная модуляция) $G(t)$ и тонального импульса $T(t)$ той же длительности:

$$S(t) = G(t) + T(t),$$

где, компонента $G(t)$ предназначена для детектирования (определения времени прихода) сигнала методом согласованной фильтрации, $T(t)$ – для определения доплеровского смещения частоты, обусловленного относительной скоростью движения агентов.

Информационная часть $I(t)$ – сигнал с фазоразностной BPSK-модуляцией (двоичной фазовой манипуляцией), обеспечивающий необходимые, в рамках поставленной задачи, скорость обмена и вероятность битовой ошибки. Вероятность битовой ошибки определяется применением контрольной суммы, сформированной как циклический избыточный код требуемой разрядности.

Синхронизирующая и информационная части сигнала разделены заданным интервалом задержки $T_{из}$. Структура сигнала, состоящего из синхронизирующей и информационной частей, представлена на рисунке 1.



Рис. 1 – Структура связного сигнала АПС ЗПС

Алгоритм передачи сообщений. По команде от системы управления агент-передатчик формирует сообщение с передаваемой и служебной информацией, содержащей идентификатор пакета, текущее время и рассчитанную контрольную сумму. На основе размера сообщения, агент проводит фрагментацию и определяет количество передаваемых фрагментов (пакетов) с учетом ограничения на время излучение одного связного сигнала.

Алгоритм организации надежного информационного обмена между агентами АПС ЗПС, представлен на рисунке 2.

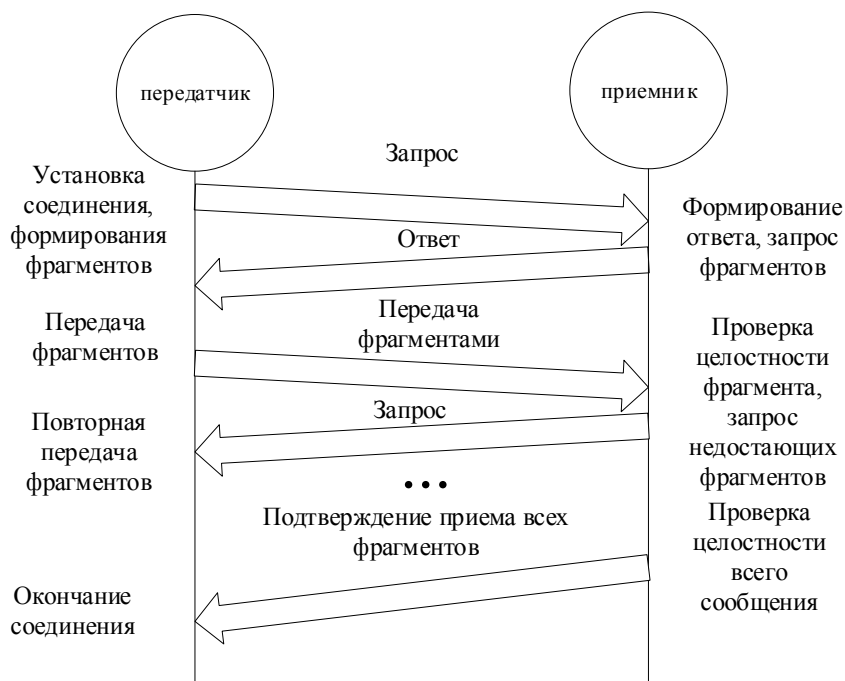


Рис. 2 – Алгоритм передачи сообщений макета АПС ЗПС

Установка соединения инициализируется по запросу от агента-передатчика сообщения агенту-получателю. Агент-передатчик отправляет запросы на передачу сообщения с заданным в системе управления периодом. Циклическая отправка запроса продолжается до момента получения первого ответа от агента-получателя.

Агент-получатель сообщения при получении запроса формирует ответ с запрашиваемыми на передачу номерами фрагментов сообщения.

Агент-передатчик, получив ответ от агента-приемника, начинает передачу запрошенной пачки фрагментов сообщения с заданным периодом. Одно сообщение соответствует передаче одного фрагмента.

Агент-получатель сообщения при получении пакета с очередным фрагментом осуществляет проверку целостности по контрольной сумме в заголовке сообщения:

- 1) При наличии ошибок в принятом фрагменте – пакет отбрасывается и должен быть повторно запрошен при последующих итерациях. При длительном отсутствии ответа от агента-получателя агент-передатчик формирует запросы статуса приема сообщения. Запросы отправляются до получения ответа или до появления команды от системы управления на отмену передачи сообщения.
- 2) При отсутствии ошибок – агент записывает в память принимаемый фрагмент и его номер, инкрементирует счетчик корректно принятых фрагментов.

При получении последнего запрошенного фрагмента сообщения или по истечении времени, отведенного на отправку, агент-получатель анализирует состояние принятого сообщения и запрашивает очередные недостающие фрагменты.

Прием сообщения подтверждается проверкой его целостности, после чего агент-приемник отправляется соответствующий пакет с подтверждением приема всей информации.

Результаты натурных испытаний. Для подтверждения алгоритма организации надежного информационного обмена между агентами и технических решений, используемых в макете АПС ЗПС, были проведены натурные испытания. Один из агентов располагался на понтоне, другой – на борту испытательного катера для обеспечения возможности маневрирования по дистанции и по направлению. В ходе проведения испытаний передавались произвольные комбинации символов и изображений, фиксировались исходные размерности передаваемых и сформированных сообщений для передачи, время передачи, число отправленных, число

повторно запрашиваемых – передаваемых фрагментов сообщений, суммарное число принятых пакетов.

В ходе натурных испытаний подтверждено корректное функционирование разработанных алгоритмов и протоколов информационно-технического взаимодействия макета АПС ЗПС. Определена скорость обмена при организации надежного канала передачи информации в зависимости от дистанции между агентами сети.

Заключение. Разработанный макет АПС ЗПС позволил апробировать алгоритм организации надежного информационного обмена между агентами в реальных условиях эксплуатации, и подтвердил корректность принятых технических решений, имитирующих группу АНПА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Skorodumov Yu.M., Gruzlikov A.M., Lukoyanov E.V., Toropov A.B., Litunenko E.G., Mukhin D.A.** Information Exchange in Underwater Acoustic Network. Proceedings of the 2022 International Conference on Ocean Studies. 2022. p. 71-76.
2. **Литуненко Е.Г., Грузликов А.М., Скородумов Ю.М.** Моделирование энергоэффективного алгоритма маршрутизации сообщений в сети подводных аппаратов // Материалы XXIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2022.
3. **Грузликов А. М., Колесов Н.В., Литуненко Е.Г., Скородумов Ю.М.** Маршрутизация сообщений в сетях автономных необитаемых подводных аппаратов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики, №6, том 21, 2021, с.767 - 773.
4. **К. Г. Кебкэл, А. И. Машошин, Н. В. Мороз.** Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования// Гироскопия и навигация. Том 27, № 2 (105), 2019, с. 106-135.
5. **González-García J et. al.** Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions\Appl. Sci. 2020, 10, 1256; doi:10.3390/app10041256.
6. Пелевин А.Е., Скородумов Ю.М., Торопов А.Б., Зайцев О.В., Елисеев Д.П., Лукоянов Е.В., Юхта Е.Д., Поляков Д.Ю., Павлова С.В., Фесенко И.А., ЛитуненкоЕ.Г., Варварин С.С. Способ осуществления гидроакустической связи с быстроходным подводным объектом. Патент R U 2 7 3 3 4 8 9 C1. Заявка 2020104824 от 03.02.2020.
7. Голубев А.Г. Методы повышения эффективности систем цифровой связи с шумоподобными сигналами. – СПб: Буквально. 2019. 317с.

S.S.Varvanin, E.G.Litunenko (State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Electropribor, JSC, Saint Petersburg), A.E. Panarin, R.L. Kryuchkov (CSRI Electropribor, Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg). **Organization of reliable information exchange in a multi-agent system using a sound-subnea communication channel**

Abstract. The paper presents a description of the layout of hardware and software for experimental confirmation of the possibility of creating a reliable channel of information exchange between agents of the network. The peculiarity of the realized algorithm of the exchange through the sound-submarine channel is the preliminary installation of the connection between the agents, the formation of repeated requests for transmission of packages, elimination of duplication, notification of the sender of the transmission results, thereby guaranteeing the integrity of the transmitted information. The paper presents the results of full-scale tests of the model in the water area of Lake Ladoga.

УДК 681.518.54

Р.Л. КРЮЧКОВ

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург)

Е.В. ЛУКОЯНОВ, Ю.М. СКОРОДУМОВ

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург)

ПОДХОДЫ К ДИАГНОСТИРОВАНИЮ СИСТЕМ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Рассматривается проблема создания средств диагностирования для систем обработки информации и управления с целью повышения уровня отказоустойчивости автономных обитаемых подводных аппаратов. Обсуждаются различные подходы и практики, приводятся их преимущества и недостатки.

Введение. Проблема создания автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА) широко обсуждается в современной научно-технической литературе [1, 2]. АНПА уже не являются только предметом исследования научно-исследовательских институтов, а стали коммерчески важным инструментом в морской и океанографической инфраструктуре, с помощью которого ежедневно решаются задачи добычи углеводородов, обслуживания межконтинентальных подводных кабелей связи, обеспечения безопасности прибрежных вод, экологического мониторинга и глубоководных исследований [3, 4].

Как и для большинства роботизированных систем, существенным ограничением АНПА является, как правило, детерминированная модель поведения, которая не содержит сценариев для непредвиденных событий, таких как отказ компонентов или неожиданное взаимодействие с окружающей средой. Это приводит к большим потерям времени, потере данных и перерасходу средств. Чтобы миссия АНПА была эффективна, оператор при формировании миссии должен предсказывать все такие ситуации, что явно нецелесообразно. Особенно критичны в данном случае отказы элементов системы обработки информации и управления (СОИиУ) [5, 6], так как их корректное функционирование непосредственно влияет на качество решения, поставленных перед АНПА задач. При этом принципиальной особенностью при проектировании средств диагностирования (СД) для СОИиУ являются существенные ограничения АНПА по габаритам и энергопотреблению.

Таким образом, задачи совершенствования традиционных и создание новых подходов к проектированию средств диагностики СОИиУ являются актуальными, так как влияют на повышение уровня отказоустойчивости АНПА в целом.

Концепции обеспечения отказоустойчивости. Концепции отказоустойчивости являются важным аспектом обеспечения надежной работы АНПА. Основной принцип отказоустойчивости заключается в обеспечении корректной и безопасной работы объекта, даже если какой-либо компонент или подсистема выйдет из строя.

Наиболее распространенные подходы к обеспечению отказоустойчивости основаны на различных вариантах резервирования аппаратуры [7]. В этом случае выводы о техническом состоянии системы формируются, например, в результате сравнения выходов основной системы с выходами дополнительных резервных систем. При неработоспособности основной системы ее роль передается одной из резервных систем, и потери качества в реализации функций системы не происходит. Возможен другой вариант [8], характерный для распределенных вычислительных систем, когда при отказе процессора его программы распределяются между исправными процессорами с повышением их тактовой частоты. В этом случае потери качества реализации функции системы также не происходит. Если упомянутые

Научный руководитель: главный научный сотрудник д.т.н., проф. Колесов Н.В.

два подхода могут оказаться затратными, то следующий подход представляется наименее затратным, а значит, и более предпочтительным для АНПА. Отказы в этом случае приводят к потере качества. Он возможен, когда система построена по модульному принципу, а ее функция может быть реализована на разных подмножествах (конфигурациях) этих модулей, но и с разным качеством [9]. В этом случае после возникновения отказа, наступает этап восстановления системы, в результате которого осуществляется переход к новой конфигурации, не содержащей отказавший модуль.

Для относительно простых систем концепция отказоустойчивости может быть другой. Если рассматривать диагностируемую систему с точки зрения теории управления существующие подходы можно разделить на пассивные и активные [10]. В пассивном варианте робастность системы по отношению к внешним и внутренним возмущениям обеспечивается на стадии проектирования. Во втором случае происходит постоянный мониторинг системы с целью обнаружения, локализации и идентификации отказов её компонентов. Данный подход позволяет обнаруживать отказы на ранней стадии и принимать корректирующие меры для восстановления системы после отказа. В результате возможны несколько сценариев для системы принятия решений: реконфигурация системы, изменение цели миссии АНПА или безопасное аварийное выключение.

Подходы к диагностированию систем обработки информации и управления. Исторически подходы к диагностированию СОИиУ разделились на три основные группы: на основе знаний, основе моделей, на основе данных. Далее рассмотрим преимущества и недостатки каждого из подходов.

Диагностирование на основе знаний (Knowledge-based fault diagnosis)

Методы, основанные на знаниях, используют эвристический опыт человека-эксперта или другими словами качественную оценку процессов, происходящих в системе, выраженную в формате, пригодном для использования машиной (вычислителем) [11]. Обычно знания представляются в виде базы правил, которая содержит выражения в форме утверждений «если-то», а методы нечеткой логики используются для их обобщения [12]. Правила получаются путем внешнего наблюдения за системой и не отражают динамику поведения каких-либо внутренних механизмов, поэтому полученные в результате знания называются «поверхностными» (soft knowledge). Основными преимуществами использования методов на основе знаний являются:

- способны работать со сложными системами, когда синтез модели невозможен;
- малая вычислительная сложность.

Однако, существуют следующие ограничения:

- нет знания о том, почему происходит отказ, а существует только взаимосвязь между «симптомами» и неисправностями;
- множественные отказы трудно изолировать друг от друга;
- отсутствие гибкости, так как можно диагностировать только ранее встречавшиеся отказы.

Диагностирование на основе моделей (Model-based fault diagnosis)

Методы, основанные на моделях, появились раньше других, поэтому являются наиболее проработанной научной областью [13, 14]. Как следует из названия в основе этих методов лежит модель диагностируемой системы, полученная на основе знаний о физических принципах, либо методов идентификации, поэтому знания о системе можно назвать «глубокими» (hard knowledge). Как правило, в процессе диагностирования происходит сравнение выходных данных системы с ожидаемым её поведением, предсказанным моделью, а затем по их разнице (невязке) принимается решение об отказе. Для решения задачи поиска отказов обычно используют банки моделей.

Достоинства методов на основе моделей заключаются в том, что:

- предоставляют точную и подробную информацию о системе и происходящих в ней процессах;
- возможность обнаружения множественных, внезапных и зарождающихся дефектов в системе.

К недостаткам можно отнести:

- моделирование сложных динамических систем высокого порядка, а также систем имеющих нелинейную динамику является трудоемкой задачей, с точки зрения вычислений;
- внешние помехи различной природы, возмущения и шумы измерений, не учтенные в модели, могут влиять на качество обнаружения отказов.

Диагностирование на основе данных (Data-driven fault diagnosis)

Методы, основанные на данных, по сравнению с методами на основе знаний можно назвать количественными, так как в их основе лежат статистические [15] и нестатистические [16] методы для выявления закономерностей в измерениях, полученных, например, с датчиков диагностируемой системы. Полученные данные используются для классификации работоспособного и состояний с отказами. Существует большое отличие между методами обнаружения отказов, заключающееся в используемом методе обучения: с учителем или без учителя. В подходе с учителем для обучения используются предварительно размеченные данные: в работоспособном состоянии системы и в состоянии с отказом. После этапа обучения система диагностики должна самостоятельно обнаруживать отказы во входном потоке данных. Во втором подходе данные изначально не размечены и могут быть получены, например, только для работоспособного состояния. В этом случае цель средств диагностики состоит в том, чтобы самостоятельно найти закономерности в данных и далее классифицировать их по группам (кластерам).

К достоинствам подходов на основе можно отнести:

- не обязательно быть экспертом в предметной области объекта диагностирования или располагать его всеобъемлющей моделью, достаточно лишь располагать данными (datasets) об этом объекте;
- способность выявлять закономерности в диагностируемом процессе, которые другими подходами не обнаружить.

Однако, принимая во внимание многочисленные подтвержденные успехи методов машинного обучения, следует осознавать и их недостатки:

- не всегда удается располагать достаточным для обучения алгоритмов объемом натуральных данных, и не всегда эти данные способны отразить полный перечень возможных отказов;
- сложность интерпретации результатов работы в отсутствие строгого математического доказательства их работоспособности и устойчивости;
- реализация алгоритмов требует значительных вычислительных ресурсов, что может быть критично для бортовых вычислителей.

Заключение. В работе рассмотрена проблема создания средств диагностирования, как средств повышения уровня отказоустойчивости, для систем обработки информации и управления автономных необитаемых подводных аппаратов. Рассмотрены основные концепции обеспечения отказоустойчивости. Приведено описание, а также преимущества и недостатки трех основных подходов к диагностированию: на основе знаний; на основе моделей и на основе данных. В каждом конкретном случае разработчик сам выбирает, какие методы уместно реализовать для решения задач обнаружения и поиска отказов.

Важно подчеркнуть, что для создания полноценной отказоустойчивой системы диагностирования СОИиУ АНПА кроме рассмотренных вопросов, большое значение имеет и решение задач, связанных прогнозом остаточного ресурса аппаратуры и формирования рекомендации для бортовой системы принятия решений, которые в настоящей работе они не рассматривались.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ №22-29-00339.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Inzartsev A., Kiselev L., Kostenko V., Matvienko Yu., Pavin A., and Shcherbatyuk A.** Underwater robotic complexes: systems, technologies, applications //Vladivostok: IMTP FEB RAS. – 2018. 368 p.

2. **Sahoo A., Dwivedy S. K., and Robi P. S.** Advancements in the field of autonomous underwater vehicle //Ocean Engineering. – 2019. – Т. 181. – С. 145-160.
3. **Konoplin, A. Y., Borovik, A. I., Mikhailov, D. N., Vaulin, Y. V., Scherbatyuk, A. F., Boreiko, A. A., Babaev R. A., Bolovin D. A., and Tregubenko, D. I.** Application of Autonomous Underwater Vehicles for Research of Ecosystems in the Southern Ocean //Antarctic Peninsula Region of the Southern Ocean: Oceanography and Ecology. – 2021. – С. 421-432.
4. **Ghis S., Fischer E.** Record-Setting AUV Pipeline Inspection in Deepwater West Africa //Offshore Technology Conference. – OnePetro, 2017.
5. **Lukoyanov E. V., Kolesov N.V., Gruzlikov A. M.** Diagnostics of Onboard Information Processing and Control Systems of Autonomous Underwater Vehicles //2022 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – IEEE, 2022. – С. 638-643.
6. **Zhao, Y., Chen, Y., Chen, L., Deng, X., Jiang, N., and Hou, L.** Intelligent Fault Diagnosis Method for AUV Integrated Navigation System //2021 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS). – IEEE, 2021. – С. 896-901.
7. **Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В.** Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование. СПб: ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2014. 185 с.
8. **Грузликов А.М., Колесов Н.В., Костыгов Д.В., Ошуев В.В.** Энергоэффективное планирование в распределенных вычислительных системах реального времени //Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2019. – №. 3. – С. 66-76.
9. **Агеев А.М., Бронников А.М., Буков В.Н., Гамаюнов И.Ф.** Аналитический подход к формированию конфигураций технических систем //Автоматика и телемеханика. – 2017. – №. 9. – С. 67-83.
10. **Rodriguez-Guerra J., Calleja, C., Pujana, A., Elorza, I., & Macarulla, A. M.** Fault-tolerant control study and classification: Case study of a hydraulic-press model simulated in real-time //International Journal of Electrical and Information Engineering. – 2019. – Т. 13. – №. 2. – С. 115-127.
11. **Silva J. C. Saxena, A., Balaban, E., and Goebel, K.** A Knowledge-based system approach for sensor fault modeling, detection and mitigation //Expert Systems with Applications. – 2012. – Т. 39. – №. 12. – С. 10977-10989.
12. **Isermann R.** On fuzzy logic applications for automatic control, supervision, and fault diagnosis //IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans. – 1998. – Т. 28. – №. 2. – С. 221-235.
13. **Chen J., Patton R. J.** Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems. – Springer Science & Business Media, 2012.
14. **Gao Z., Cecati C., Ding S. X.** A survey of fault diagnosis and fault-tolerant techniques—Part I: Fault diagnosis with model-based and signal-based approaches //IEEE transactions on industrial electronics. – 2015. – Т. 62. – №. 6. – С. 3757-3767.
15. **Muradore R., Fiorini P.** A PLS-based statistical approach for fault detection and isolation of robotic manipulators //IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Т. 59. – №. 8. – С. 3167-3175.
16. **Lei Y. Yang, B., Jiang, X., Jia, F., Li, N., and Nandi, A. K.** Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap //Mechanical Systems and Signal Processing. – 2020. – Т. 138. – С. 106587.

R.L. Kryuchkov, E.V. Lukoyanov, Iu.M. Skorodumov (CSRI Electropribor, Saint-Petersburg). **Approaches to the diagnostics of AUV information processing and control systems**

Abstract. The problem of diagnostic tools synthesis for AUV information processing and control systems is considered in meaning of increasing the level of fault tolerance. Various approaches and best practices are discussed, their advantages and disadvantages are presented.

УДК 681.51

В.С. ТЮЛЬНИКОВ

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург)

А.М. ГРУЗЛИКОВ

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ ДЛЯ ОПИСАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Представлен обзор сетей Петри для построения формальных динамических моделей асинхронных параллельных процессов. Обсуждается вопрос применимости рассматриваемых сетевых моделей для описания бортовой вычислительной системы реального времени на всех этапах разработки – анализа, реализации и верификации.

Введение. Создание бортовых распределенных вычислительных систем охватывает широкий круг взаимосвязанных вопросов, начиная от вопроса построения формальной модели системы на начальном этапе, до вопросов отработки системы на этапе её опытной эксплуатации. На фоне жестких требований по времени выполняемых функций, по достоверности и надежности современные бортовые вычислительные системы также характеризуются разнообразием информационных связей и протоколов информационного обмена между её компонентами. Как следствие, разработка методов описания модели системы, которые позволят сократить сроки разработки является актуальной и сложной задачей. Один из таких подходов заключается в использовании поведенческих моделей, которые применяются для представления и анализа отношений между компонентами (объектами) системы. Кроме того, разработчику необходимо обеспечить поддержку реализации модели конкурирующих асинхронных параллельных процессов, когда выполнение функций будет зависеть не только от текущего состояния объектов, но и от времени и готовности самой задачи обработки информации. Одной из таких моделей для описания бортовых распределенных вычислительных систем реального времени является сеть Петри.

В работе представлен обзор различных видов сетей Петри для построения формальных динамических моделей асинхронных параллельных процессов, обсуждается вопрос применимости сетей Петри для описания модели бортовой системы на различных этапах жизненного цикла разработки бортовой системы.

Сеть Петри. Сети Петри, описанные немецким учёным Карлом Адамом Петри в 1962 г. в докторской диссертации [1, 2], представляют собой двудольный ориентированный мультиграф, состоящий из вершин двух типов – позиций (обозначаются кружками) и переходов (обозначаются прямоугольниками), соединённых между собой дугами. Любая дуга ведёт либо от позиции к переходу, либо наоборот. Дуги, соединяющие две позиции или два перехода, запрещены. Позиции, у которых нет входящих дуг, называются входными. Позиции, у которых нет исходящих дуг, называются выходными. Каждая позиция сети Петри может содержать ноль или более меток. Распределение меток по позициям сети называется её разметкой. Переход является активным, если каждая его входная позиция содержит по крайней мере одну метку. Активный переход может сработать, при срабатывании переход поглощает по одной метке из каждой своей входной позиции и размещает по одной метке на каждой своей выходной позиции. В каждый момент времени для срабатывания из всех активных переходов недетерминированным образом выбирается один, если активных переходов нет, то работа сети на этом завершается.

Основные свойства сети Петри:

- ограниченность (безопасность сети) – число меток в любой позиции сети не может превысить некоторое заданное значение. В части модели бортовой системы – наличие

формирования очередей на входе задач обработки. Данный параметр является обязательным при анализе выполнения требований системой обработки информации в реальном времени;

- сохраняемость – постоянство загрузки ресурсов;
- достижимость – основная задача анализа сети Петри. Проверка перехода сети из одного заданного состояния (распределение меток) в другое заданное состояние;
- живость – возможность срабатывания любого перехода при функционировании моделируемого объекта.

В основе исследования перечисленных свойств лежит анализ достижимости. Методы анализа свойств сетей Петри основаны на использовании графов достижимых (покрывающих) маркировок, решении уравнения состояний сети и вычислении линейных инвариантов позиций и переходов. Применяются также дополнительные методы редукции, позволяющие уменьшить размер сети с сохранением её свойств, и декомпозиции, разделяющие исходную сеть на подсети.

Пример правил изменения маркировок сети Петри приведён на рисунке 1.

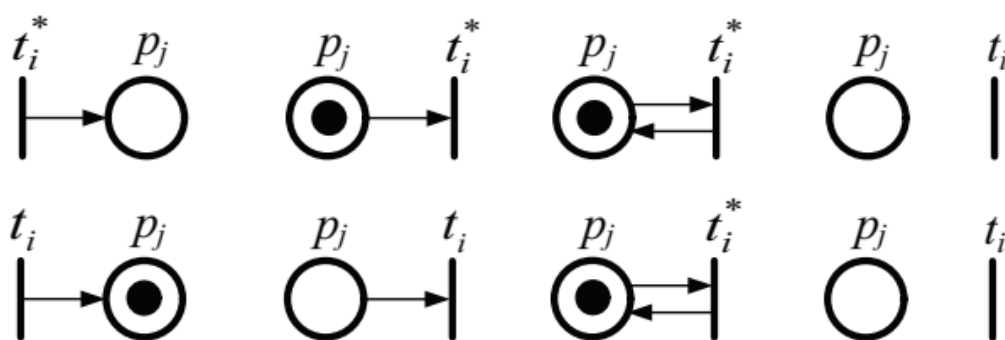


Рис. 1. Правила изменения маркировок для каждой позиции сети Петри

Разновидности сети Петри:

- временная сеть (переходы обладают весом, определяющим продолжительность срабатывания [3, 4] или минимальное и максимальное время срабатывания);
- стохастическая сеть [5, 6] (задержки переходов являются случайными величинами);
- функциональная сеть [7] (задержки переходов определяются как функции некоторых аргументов, например, количества меток в каких-либо местах);
- цветная сеть [8] (метки могут быть различных типов, т. е. могут быть использованы для передачи информации; переходы могут содержать информацию о действиях, которые можно совершить с данной информацией, дуги, в свою очередь, описывают поведение сети);
- ингибиторная сеть [9, 10] (возможны ингибиторные, т. е. подавляющие, дуги, запрещающие срабатывания перехода, если во входной позиции, связанной с переходом ингибиторной дугой, находится метка);
- иерархическая сеть [11] (содержит немгновенные переходы, в которые вложены другие, возможно, также иерархические сети; срабатывание такого перехода характеризует выполнение полного жизненного цикла вложенной сети);
- WF-сеть [12] (существуют только 1 начальная и 1 конечная позиции, все остальные вершины расположены на пути от начальной до конечной).

Описание моделей бортовых систем с помощью сетей Петри. Определим элементы сети Петри для построения формальных динамических моделей асинхронных параллельных процессов бортовых распределенных вычислительных систем (РВС). Для моделирования периодического потока (например, опрос датчика с заданным периодом) введём позицию –

генератор, т. е. позицию, метка в которой появляется с определенной, заранее заданной частотой. Каждой дуге сети Петри присвоим вес – время, требуемое для передачи информации от одной позиции до другой (имитация задержки передачи). С каждым переходом соотнесем некоторое число – время, требуемое для обработки информации. Также определим позиции-процессоры, которые предназначены для имитации неразделяемого вычислительного ресурса. Переходы в свою очередь представляют задачи по обработке входящей информации и, будучи активными, могут поглотить метку процессора и, таким образом, «захватить» его, сделав недоступным для других переходов. После срабатывания перехода метка возвращается процессору, делая его доступным для «захвата» другими переходами. Также во время моделирования бортовой РВС с использованием сети Петри следует учесть тот факт, что в бортовой РВС могут быть использованы несколько процессоров, т. е. в условный момент времени сработать может не один, а несколько переходов, если, конечно, в этот момент времени есть свободные процессоры.

Таким образом, для формального описания бортовой вычислительной системы реального времени, необходимо использовать временную сеть Петри с нововведениями в виде позиций-генераторов, позиций-процессоров и возможности срабатывания нескольких переходов.

Заключение. В работе представлен обзор сетей Петри для построения формальных динамических моделей асинхронных параллельных процессов. Показано, что для описания бортовой вычислительной системы реального времени с использованием сети Петри, необходимо провести расширение классического представления, а именно использовать временные, иерархические и цветные сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котов В. Е. Сети Петри – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – с. 16.
2. C. A. Petri. Communication with Automata // Tech. Rep. RADCTR-65-377. — 1966. — Vol. 1, Suppl. 1. — Pp. 89.
3. C. Ramchandani. Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri nets // Project MAC. — Technical Report 120. — 1974. — Pp. 220.
4. W. Penczek, A. Pólrola. Advances in Verification of Time Petri Nets and Timed Automata: A Temporal Logic Approach. – Springer, 2010.
5. Molloy M. Performance analysis using stochastic Petri nets // IEEE Trans. on Comput. — 1982. — Vol. 31, N 9. — Pp. 913 — 917.
6. P. Haas. Stochastic Petri Nets: Modeling, Stability, Simulation. – Springer, 2010.
7. Zaitsev D. A., Sleptsov A. I. State Equations and Equivalent Transformations of Timed Petri Nets // Cybernetics and System Analysis. — 1997. — Vol. 33. — Pp. 659 — 672.
8. K. Jensen, *Coloured Petri Nets*. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
9. Agerwala T. A complete model for representing the coordination of asynchronous processes // Hopkins Computer Research. — Report 32. — 1974. — Pp. 58.
10. Agerwala T., Flynn M. Comments on capabilities, limitations, and “correctness” of Petri nets // Proc. of First Annual Symposium on Computer Architecture. — 1973. — Pp. 81 – 86.
11. G. Dittrich. Modeling of Complex Systems Using Hierarchically Represented Petri Nets // Proc. Intl. Conference on Systems, Man and Cybernetics. — 1995. — Pp. 2694 – 2699.
12. Van der Aalst W. The application of Petri nets to workflow management // Journal of Circuits, Systems and Computers. — Vol. 8. — Pp. 21 – 66.

V. S. Tyulnikov, (CSRI Electropribor, ETU «LETI» Saint-Petersburg Electrotechnical university, Saint Petersburg), A. M. Gruzlikov (CSRI Electropribor, Saint Petersburg). **Distributed computing models for description of real-time embedded systems**

The paper presents an overview of Petri nets for building formal dynamic models of asynchronous parallel processes. The question of the applicability of the considered network models for describing the real-time onboard computing system at all stages of development - analysis, implementation and verification is discussed.

УДК 681.51

В.С. ТЮЛЬНИКОВ, А.П. ПАВЛОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ НА ОСНОВЕ ВРЕМЕННОЙ СЕТИ ПЕТРИ

Рассматривается решение задачи дискретной комбинаторной оптимизации по распределению ресурсов в бортовой вычислительной системе реального времени. Особенностью постановки задачи является использование модели на основе временной сети Петри для описания информационного взаимодействия процессов бортовой распределенной системы. Исходная модель системы дополняется описанием конкурирующих ресурсов, и далее реализуется поиск распределения с использованием генетического алгоритма. Приводятся результаты исследования эффективности предложенного алгоритма.

Введение. Под назначением будем понимать процедуру соотнесения с каждым процессором бортовой распределенной вычислительной системы (РВС) некоторого списка решаемых на нем задач. Эта процедура предшествует любым вычислениям в многопроцессорных системах. Данная проблема относится к классу NP-трудных задач [1, 2]. В виду высокой сложности оптимальных алгоритмов на практике отдают предпочтения эвристическим методам [2, 3]. Действительно, в ситуации, достаточно типичной для практики создания РВС, когда число размещаемых задач превышает сотню, применение оптимальных алгоритмов, предполагающих перебор вариантов, оказывается невозможным за приемлемое время.

Доклад посвящён вопросу решения задачи назначения (распределения) вычислительных ресурсов для бортовых распределенных систем реального времени на основе применения модели системы заданной временной сетью Петри [4, 5].

Постановка задачи. Рассмотрим следующую постановку задачи:

1. Пусть рассматриваемая бортовая вычислительная система представлена моделью на основе временной сети Петри. Назавём временной сетью Петри пару $\langle PN, f \rangle$, где $PN = \langle P, T, E, \mu^0 \rangle$ – сеть Петри (P – конечное множество позиций; T – конечное множество переходов; $E: P \times T \cup P \times T \rightarrow (0,1)$ – функция инцидентности, указывающая наличие дуг, связывающих позиции с переходами и переходы с позициями; μ^0 – начальная маркировка), а f – функция задержки выполнения переходов ($f: T \rightarrow N^+$, где N^+ – множество целых неотрицательных чисел). Таким образом, каждому переходу сети приписывается некоторое число, которое обозначает временную задержку до срабатывания перехода (имитация обработки входных сообщений).

2. Каждый переход необходимо соотнести с вычислительным ресурсом (процессором), при условии обеспечения требования по ограниченности сети.

3. Для исходной модели, необходимо найти такое распределение задач по процессорам системы, при котором число процессоров будет минимальным.

Решение задачи назначения. До определения процедуры поиска распределения вычислительных ресурсов, опишем эвристический метод стохастического поиска, основанного на идее биологической эволюции, а именно генетический алгоритм (ГА) [6].

Генетический алгоритм использует несколько генетических операторов и стратегий для поиска решения для определенных задач. Существует три генетических оператора: скрещивание, мутация, отбор, которые имитируют размножение, спонтанное изменение и отбор некоторых особей согласно определенным правилам. Индивидуум, также известный как особь/хромосома, представляет собой решение задачи и обычно кодируется заданным представлением. Набор особей, используемый ГА, называется популяцией. Неявный параллелизм и возможность глобального поиска являются основными характеристиками ГА.

Следовательно, ГА подходит решения задач комбинаторной оптимизации, таких как задача планирования и назначения.

Определим следующую итеративную процедуру ГА:

Шаг 1. Сформировать популяцию – случайное распределение вычислительных ресурсов по задачам;

Шаг 2. Для каждой особи из популяции:

Шаг 2.1. Закодировать, т.е. сформировать вектор распределения ресурсов;

Шаг 2.2. Вычислить количество необработанных сообщений после работы модели с учётом имитации асинхронных процессов (включая возможного наличия конфликтов в системе).

Шаг 3. Выполнить отбор особей на основе заданного гиперпараметра отбора.

Шаг 4. Выполнить скрещивание и/или мутацию особей.

Шаг 5. Провести селекцию новой популяции.

Шаг 6. В случае завершения эволюции вывести результат решения, иначе перейти к шагу 2.

Исследование эффективности гиперпараметров генетического алгоритма.

Исследование эффективности гиперпараметров генетического алгоритма можно разделить на следующие этапы:

1. Формирование исходных тестовых примеров моделей бортовых распределенных вычислительных систем;
2. Решение задачи назначения с использованием предлагаемого алгоритма. По результату выполнения фиксировать следующие значения:
 - a. результат решения задачи назначения (распределения задач по процессорам);
 - b. время поиска решения.

Для тестов были выбраны 2 типа сетей Петри: конвейер и дерево. Для каждого типа сети и набора задач генерировались 20 случайных тестов для 7 комбинаций параметров генетического алгоритма. Полученные в ходе моделирования значения усреднялись для каждого количества задач. Тест представляет собой случайный набор времён, соотносённых с переходами – имитация обработки информации. Например: [3, 5, 2, 6, 10, 3, 1, 7, 7, 2, 2, 3, 6, 8, 10, 8, 7, 4, 4, 6], где, число, стоящее на *i*-ой позиции означает время срабатывания *i*-го перехода. После генерации теста в тестируемую модель последовательно вводятся процессоры: от одного до количества задач включительно. В начале работы генетического алгоритма задачи случайным образом распределяются по всем доступным процессорам, затем происходит работа сети Петри – оценка полученного распределения задач по процессорам. В том случае, когда по результатам моделирования не произошло переполнения очереди входных сообщений в какой-либо позиции, работа генетического алгоритма завершается, а такое распределение считается подходящим. В противном случае в модель вводится дополнительный процессор, производится повторная оценка до тех пор, пока не будет найдено необходимое количество процессоров или достигнуто максимальное число процессоров (число задач в РВС).

В качестве гиперпараметров выбирались следующие параметры:

- в части селекции: турнирная селекция, метод рулетки, выбор лучших;
- в части скрещивания: одноточечное, равномерное, скрещивание смешением;
- в части мутации: мутация инверсией, перетасовкой, гауссова мутация.

В результате исследования оценки эффективности гиперпараметров генетического алгоритма для решения задачи назначения были получены следующие результаты:

- для бортовых сетей типа конвейер наилучшим образом подходят турнирный отбор, мутация перетасовкой, одноточечное скрещивание;
- для бортовых сетей типа дерево наилучшим образом подходят выбор лучших, мутация перетасовкой, одноточечное скрещивание.

Отработка алгоритма проводилась на языке python с использованием пакета DEAP [7], а также собственной реализацией временной сети Петри.

Заключение. Разработан алгоритм назначения распределения вычислительных ресурсов в бортовой вычислительной системе реального времени заданной моделью на основе временной

сети Петри. Используемая модель соответствует представлению асинхронных параллельных процессов бортовой системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рафгарден Тим Совершенный алгоритм. Основы. – СПб.: Питер, 2019. – 256 с.: ил. – (Серия «Библиотека программиста»)
2. Рафгарден Тим Совершенный алгоритм. Алгоритмы для NP-трудных задач. – СПб.: Питер, 2021. – 304 с.: ил. – (Серия «Библиотека программиста»)
3. Грузликов А.М. Графовый подход к назначению заданий в распределенных системах реального времени. / А.М. Грузликов, Н.В. Колесов, Ю.М. Скородумов, М.В. Толмачева // Известия РАН. Теория и системы управления – 2014 – № 5. – С. 84 – 94.
4. Котов В. Е. Сети Петри – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – с. 16.
5. С. А. Petri. Communication with Automata // Tech. Rep. RADCTR-65-377. — 1966. — Vol. 1, Suppl. 1. — Pp. 89.
6. Вирсански Э. Генетические алгоритмы на Python / пер. с англ. А. А. Слинкина. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 286 с.: ил.
7. Документация Deap: сайт. -URL: <https://deap.readthedocs.io/en> (дата обращения: 20.03.2023). – Текст: электронный.

V. S. Tyulnikov, A. P. Pavlov (CSRI Electropribor, ETU “LETI” Saint Petersburg Electrotechnical university, Saint Petersburg). **Solution of the assignment problem using a distributed computing model based on a time Petri net.**

Abstract. The paper considers the solution of the problem of discrete combinatorial optimization for the distribution of resources in an embedded real-time computer system. A feature of the problem statement is the use of a model based on a time Petri net to describe the information interaction of the embedded system processes. The initial model of the system is supplemented with a description of competing resources, and then a distribution search is implemented using a genetic algorithm. The results of the study of the efficiency of the algorithm for solving the problem of assigning the tasks of the embedded system by computing modules are presented.

УДК 681.51

Е. И. МОСЕЙКО,
(СПбГУ, ООО «СКЗ», Санкт-Петербург)

В. Е. ЕРШОВ
(СПбГУ, Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СЕРВИСА НАВИГАЦИИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

Рассматривается архитектура управления сервисами дополненной реальности на основе адаптивного протокола обмена. Использование специфичных для области применения (навигации) особенностей поведения клиентов позволяет сделать протокол обмена более эффективным за счёт децентрализации взаимодействия между серверами, предоставляющими услугу дополненной реальности в навигаторе. Предлагаемая в рамках архитектуры оптимизация позволяет размещать в системе большее количество сложных объектов без снижения качества услуги.

Введение. В последнее десятилетие дополненная реальность (Augmented Reality, AR) стала одной из технологий, привлекающих множество людей во всем мире. Современные системы дополненной реальности ставят множество новых задач перед архитекторами и разработчиками этих продуктов. Особенно перспективными областями применения AR являются интерактивные туры, маркетинг, городские информационные системы, интерактивные навигаторы-помощники в торговых центрах, аэропортах и фабриках.

В связи с ростом применения цифровых технологий, в науке появляется все больше работ, посвященных исследованиям адаптивных методов управления потоками данных [1] и подходов, основанных на распределенной оптимизации вычислений [2]. Многие новые исследования в области разработки и анализа алгоритмов кооперативного управления [3, 4] могут быть применены в AR-технологии. В работе описывается структура распределённого серверного решения с адаптивным протоколом обмена для мультиагентной среды дополненной реальности. Для децентрализованной балансировки нагрузки в мультисерверной и мультиклиентских сетях с переменной топологией в условиях неопределённости (во входных данных и в наблюдениях за работающей системой содержится случайный шум) используется протокол локального голосования [5].

Доклад посвящён разработанной серверной архитектуре и технологии оптимизации распределения нагрузки между серверами, предоставляющими услуги дополненной реальности, и методу оценки качества работы системы. Предлагаемая технология может быть использована в современных программах-помощниках, предназначенных для ориентирования гостей в крупных промышленных или торговых центрах. Многие создатели систем локальной навигации по сложным объектам используют мобильные приложения и информационные панели, которые можно снабдить понятными людям элементами-подсказками не только физическими, но и виртуальными, корректно размещёнными в реальном пространстве. При этом данные устройства должны обеспечивать выполнение основного функционала (например, выполнять функции интернет-магазина) без потери качества из-за высокой AR-нагрузки.

Распределённое серверное решение и применение технологии адаптивного обмена.

Постановка задачи. Система дополненной реальности представляет собой совокупность устройств (смартфоны, планшеты + удалённо размещённые сервера), позволяющих клиентам, например, покупателям в торговом центре, посетителям музея или мероприятия, видеть кроме объектов реальности так же и заранее сгенерированные и «привязанные» к определённым местам пространства новые объекты. Предположим, мы находимся на Никольской улице в г.

¹Научный руководитель: проф., д. ф.-м.н. Граничин О.Н.

Москва. Пользователь системы наводит камеру смартфона на интересующее его место и может увидеть там, кроме физических объектов, стрелки навигации до заданного места (конкретного магазина или выставочного комплекса), подсказки о назначении объектов, историческую справку об объекте, а так же может принять участие в виртуальной экскурсии (виртуальный мальчик-гид озвучит заранее загруженный звуковой файл) или прогуляться по этой улице так, как будто бы это было в прошлом. Для посетителя крупного торгового центра это может быть внутренним навигатором внутри здания, т. к. привязки объектов осуществляются относительно конкретных позиций, например, точки входа в здание, с учётом географической высоты.

Представим себе, что уже есть некоторая как-то работающая система, обеспечивающая выполнение описанного выше функционала. Такая система включает в себя мобильные устройства с камерами, приложения для этих мобильных устройств, сервер или сервера с программным обеспечением, обрабатывающим запросы от клиентов.

Назовём *провайдером* услуги дополненной реальности совокупность всех стационарных устройств и программ, участвующих в оказании услуги дополненной реальности по описанной выше технологии с фиксированным протоколом обмена информацией.

Назовём *получателем* услуги дополненной реальности любое устройство, способное взаимодействовать с провайдером услуги, т. е. посылать ему запросы и использовать ответы.

Качеством услуги назовём числовую характеристику (вектор чисел), для которой определена *функция качества* и описана *операция сравнения качества*.

Будем говорить, что получатель *удовлетворён качеством*, если качество оказываемой услуги не ниже некоторого личного для него, но постоянного значения качества.

Требуется решить задачу предоставления услуги для совокупности клиентов таким образом, что вероятность удовлетворённости качеством услуги была не ниже любой наперёд заданной при наименьшей возможной стоимости решения для провайдера.

Другими словами, требуется научиться оценивать и сравнивать аппаратные и программные версии системы с целью повысить количество клиентов, удовлетворённых качеством услуги (определяется в первую очередь возможностью использовать данный функционал), без существенного увеличения вычислительных и сетевых мощностей на серверной стороне, тем самым обеспечивая экономическую целесообразность содержания данной системы для заказчика услуги (например, организатора форума или фестиваля, директора торгового центра, организатора, желающего продемонстрировать достопримечательности какого-либо объекта).

Итоговой целью является динамическое перераспределение заданий с учётом свободных в заданный момент времени ресурсов распределённых серверов для успешной обработки максимального количества запросов в сети переменной топологии, узлы которой могут быть географически заметно удалены от серверов (т. е. задержки не являются постоянной величиной и меняются в достаточно широком диапазоне). Критерием является функция качества, то есть процент успешных выполнений заданий при пиковой нагрузке как на сеть, так и на процессоры, память, диски серверов. Т.е. мы получили задачу оптимизации в которой требуется максимизировать качество при фиксированных ресурсах либо минимизировать ресурсы при фиксированных значениях качества.

Описание решения. Т.к. в AR-системе количество физических машин в сети, совокупно обеспечивающих решение вычислительных задач сервисов AR сравнительно небольшое (порядок не превышает 103), то топологию сети удобно представить в виде ориентированного графа, где вершинами являются микросервисы, а ребрами – наличие возможности взаимодействия (возможно, только в одну сторону). Клиентов может быть сколь угодно много в совокупности (порядок, превышающий количество серверов), но в каждый момент их количество варьируется в зависимости от выполняемой задачи.

Детерминированный алгоритм плохо подходит для решения задачи, т. к. параметров много и они меняются во времени. Для моделирования поведения клиентов и доказательства эффективности рандомизированного подхода в вопросе изменения качества услуги воспользуемся теорией рандомизации алгоритмов и работами по практическому применению [6] различных модификаций метода LSCR [7].

Так же для минимизации стоимости услуги для провайдера воспользуемся идеями и практикой применения мультиагентной технологии на основе протокола локального голосования, представленной в работе [8].

Решение по оптимизации представляет собой композицию из нейронной сети на основе сети Кохонена, используемой для кластеризации запросов по географическому признаку, и сети, осуществляющей динамический подбор весов для запросов на основании статистики времени исполнения и потребления вычислительного ресурса по запросам данного типа и их интенсивности. Запросы, поступающие на вход выбранного сервера, поступают на вход сервиса-анализатора и перенаправляются либо другому сервису этого же сервера, либо снабжаются весом и перенаправляются такому же сервису на другом сервере. После того, как выбор для запроса осуществлён учитывается результат исполнения и, если он удовлетворительный, то повышается вес данного выбора. В противном случае ничего не происходит. Вектор изменения весов для различных типов заданий на доступных серверах является “подсказкой” для клиентского приложения.

Специфика применения результатов, полученных нейронными сетями, заключается в том, что основная цель их использования не только снижение пиковой нагрузки на сервера, но и построение распределённого микросервисного решения, лучшего по сравнению с предыдущими. Получаемые в процессе кластеризации и балансировки значения используются нейронной сетью для обнаружения параметров, существенно влияющих на стабильность работы всей системы в целом. Микросервисная архитектура с адаптивным протоколом управления позволяет внедрять промежуточные модули оптимизации и контроля без нарушения целостности основной функциональной части.

Методика сравнения распределённых решений. Пусть система с некоторым взаимодействием между серверами и клиентами решает задачу предоставления качества услуги не ниже x с вероятностью p_x . Тогда добавление к имеющейся системе модулей оптимизации хотя бы одного из двух видов (на паре клиент-сервер и паре сервер-сервер) обеспечивает качество услуги не ниже x с вероятностью строго больше p_x .

Техническое описание прототипа и тестового окружения. Для подготовки прототипа решения использовались тестовые сервера уже работающей системы дополненной реальности. Программное обеспечение создано на основе образа с операционной системой Linux Debian 11 и бесплатного мобильного приложения под Android. Взаимодействие между серверами и клиентами осуществляется по описанному в документации к используемой технологии интерфейсу [9] по RESTful API – программному интерфейсу, используемому двумя компьютерными системами для безопасного обмена информацией через Интернет.

Модули, оптимизирующие поведение клиента, поставляются дополнительно к приложению и расширяют имеющееся API взаимодействия с серверами.

Заключение. В работе описан один из подходов к управлению многосерверной системой с формирующейся мультиагентной кластеризацией. Мобильные приложения, обеспечивающие пользовательский интерфейс в том числе и для отображения подсказок для более простой навигации в сложных пространствах, не могут обеспечить качественное позиционирование самостоятельно, поэтому обращаются по API к программному обеспечению, размещаемому на удалённых серверах. Для повышения качества сервиса навигации и поддержания адекватной скорости отклика для большего количества одновременных пользователей используются дополнительные модули динамической подстройки весов для параметров системы в целом на основе протокола локального голосования и самоорганизующейся сети Коханена.

Разработан прототип мультисерверного решения с адаптивным протоколом обмена для координации запросов между микросервисами, выполняющими задания на нескольких физических серверах.

Приведённое в работе решение является на сегодняшний день новаторским. Это и дальнейшие исследования в этом направлении актуальны в системах, в которых количество и география выполняемых запросов огромны или слишком медленны для одного вычислительного сервера.

*«Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ №21-19-00516
в ИПМАШ РАН»*

ЛИТЕРАТУРА

1. Thiruchelvi, G. and Raja, J. 2012. Active Queue Management Based Adaptive Flow Control Mechanism for Unresponsive Flows. *European Journal of Scientific Research*, 70, 67-80.
2. Wang, D., Wang, Z., Wang, W., Chen, M. 2018. Distributed optimization for multi-agent systems with constraints set and communication time-delay over a directed graph. *Information Sciences* Vol. 438, April 2018, P. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.01.040>
3. JProskurnikov A., Granichin O. Evolution of clusters in large-scale dynamical networks // *Cybernetics And Physics*. Vol. 7. No. 3. 2018, pp. 102-129.
4. Xia, Z., Du, J., Wang, J., Jiang, C., Ren, Y., Li, G., and Han, Z. 2022. Multi-agent reinforcement learning aided intelligent uav swarm for target tracking. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 71(1), 931–945. doi:10.1109/TVT.2021.3129504.
5. Амелина Н.О., Граничин О.Н. Управление балансировкой загрузки в вычислительных сетях // Глава 13 в монографии «Проблемы сетевого управления» СПб.: Наука, 2015, с. 297-318.
6. Волкова М.В., Граничин О.Н., Волков Г.А., Петров Ю.В. О возможности применения метода знако-возмущенных сумм для обработки результатов динамических испытаний // *Вестник СПбГУ. Сер. 1. Том 63. Вып.1. 2018. С. 30–40.*
7. Marco Dalai a , Erik Weyer b , Marco C. Campi. 2007. Parameter identification for nonlinear systems: Guaranteed confidence regions through LSCR. *Automatica* 43, p.1418 – 1425
8. Н. О. Амелина. 2013, Применение протокола локального голосования для децентрализованной балансировки загрузки сети с переменной топологией и помехами в измерениях // *Вестник СПбГУ. Сер. 1. 2013. Вып. 3*

Е.Мосейко (St.Petersburg State University, “CVS” LCD, St.Petersburg), V.Ershov (St.Petersburg State University, IPME RAS). **Multiagent technologies to improve the quality of navigation service under uncertainty**

Abstract. The paper considers the architecture of augmented reality service management based on an adaptive exchange protocol. The use of application-specific (navigation) features of client behavior makes it possible to make the exchange protocol more efficient by decentralizing the interaction between servers that provide the augmented reality service in the navigator. The optimization proposed within the framework of the architecture makes it possible to place in the system a larger number of complex objects that reduce the quality of the service.

УДК 629.054

И.У. ЗАРИПОВ, А.А. ШИРЯЕВ, И.А. КОПЫЛОВ
(АО «Лётно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Жуковский)

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЯ И ОЦЕНИВАНИЯ БОРТОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ В ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

Изложены результаты разработки программного обеспечения контроля навигационных систем на борту воздушного судна в процессе летного эксперимента на основе данных от накопителя информации ТНЗ-КБТИ. Программное обеспечение отлажено на летающей лаборатории и позволяет инженеру на борту воздушного судна следить за измерениями параметров бортовых систем, контролировать ход выполнения полетного задания.

Введение. С 2021 года в ЛИИ им. М.М. Громова проводится разработка изделия ТНЗ-КБТИ, которое сочетает в себе возможности твердотельного накопителя ТНЗ, как регистратора параметров бортовых систем, и возможности комплекса бортовых траекторных измерений (КБТИ) для вычисления траекторных параметров на основе измерений спутниковых навигационных систем. В настоящее время для обеспечения летных испытаний широко используется КБТИ, который наряду с регистрацией параметров бортовых пилотажно-навигационных систем и определением траекторных параметров воздушного судна предоставляет возможность оператору на борту воздушного судна во время полета с помощью ноутбука наблюдать за параметрами бортовых систем [1-3]. Реферат посвящен разработке составных частей специального программного обеспечения, предоставляющего оператору разрабатываемого изделия ТНЗ-КБТИ возможности на борту воздушного судна, аналогичные КБТИ: по информации, извлекаемой из накопителя ТНЗ-КБТИ, контролировать выполнение полетного задания, наблюдать за поведением погрешностей навигационных параметров бортовых систем. Рассмотрены особенности реализации программного обеспечения (ПО).

Описание разрабатываемых изделия и программного обеспечения.

Изделие ТНЗ-КБТИ. На базе НИО-9 ЛИИ им. Громова совместно со специалистами АО «Конвект-6 ЛИИ» разработано изделие ТНЗ-КБТИ (далее – Изделие), предназначенное для обеспечения летных испытаний в части регистрации информации бортовых систем и определения траекторных параметров на основе сигналов глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС и GPS. Изделие состоит из бортового твердотельного

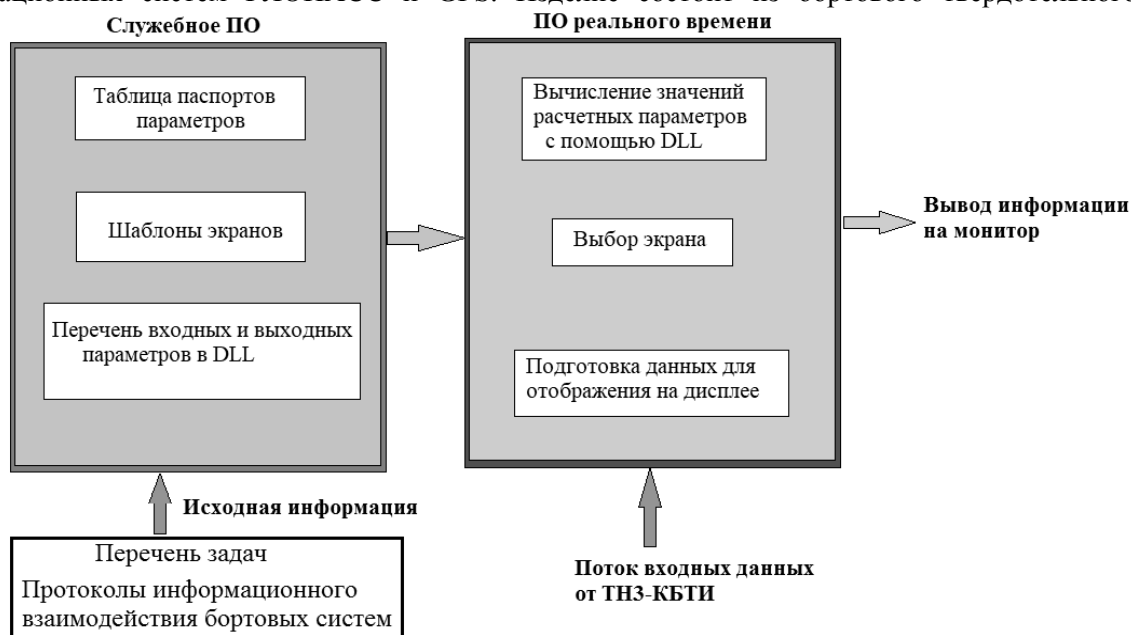


Рис.1 Структура разрабатываемого ПО

накопителя цифровой и аналоговой информации, встроенного приемника спутниковой навигационной системы и программно-математического обеспечения [4].

Информация, накапливаемая в памяти Изделия, в реальном времени передается по шине Ethernet в ноутбук. Разработанное специальное ПО позволяет выполнять произвольные вычисления с параметрами из входного потока, вычислять текущие значения погрешностей навигационных параметров бортовых систем, отображать информацию в табличном и графическом видах на дисплее ноутбука. Структура разработанного ПО приведена на рисунке 1 и включает в себя служебное ПО и ПО реального времени.

Служебное ПО. Входной поток данных от Изделия может содержать большое количество параметров. За какими из них вести наблюдение в реальном времени – зависит от набора задач, решаемых на борту воздушного судна. Всем параметрам, значения которых могут быть выведены на дисплей ноутбука, соединенного с Изделием по шине Ethernet, следует предварительно присвоить идентификатор и указать тип, размерность и местонахождение во входном потоке данных в соответствии с протоколами информационного взаимодействия бортовых систем.

До начала летного эксперимента также необходимо задать шаблон экрана, который будет выводиться на дисплей ноутбука. Шаблон содержит информацию о том, какие параметры, в каком месте и виде выдаются на экран, определяет количество знаков после десятичной запятой в значении каждого параметра при отображении в табличном виде.

Для проведения вычислений с входными параметрами, формирования погрешностей навигационных параметров бортовых систем, пользователь должен задать перечень входных и выходных параметров программы, производящей расчеты. При формировании погрешностей навигационных параметров бортовых систем значения параметров встроенного приемника сигналов спутниковых навигационных систем принимаются за действительные. Программа вычислений оформляется в виде динамически подключаемой библиотеки (DLL – Dynamic Link Library) [5] и является частью ПО, выполняемого в реальном времени.

ПО реального времени. После запуска программы реального времени на ноутбуке, соединенном с Изделием, пользователю в диалоговом режиме следует выбрать служебный файл с паспортом параметров, шаблонами экранов и перечнями входных и выходных параметров для динамически подключаемой библиотеки. Во время полета ПО выполняет следующие задачи:

- принимает информационный поток от Изделия по шине Ethernet;
- формирует входной поток параметров в DLL и запускает динамически подключаемую библиотеку на выполнение;
- в соответствии с выбранным пользователем шаблоном экрана подготавливает требуемые значения параметров к выдаче и отображает их в заданном шаблоне на дисплее ноутбука.

Для отладки ПО реального времени Изделие было установлено на летающей лаборатории на базе вертолета Ми-8. Настройка ПО производилась с использованием перечня задач, решаемых на борту и перечня отображаемых параметров. Оператор во время полета следил на дисплее ноутбука за поведением навигационных параметров бортовых систем. С помощью подготовленных шаблонов экранов оператор наблюдал за траекторией полета в горизонтальной и вертикальной плоскостях, поведением погрешностей навигационных параметров бортовых систем. После каждого полета оператор формулировал свои пожелания к представлению и выдаче информации, которые учитывались при подготовке к следующему полету.

Заключение. Благодаря разработанному программному обеспечению для изделия ТНЗ-КБТИ инженер-исследователь, находясь на борту воздушного судна в испытательном полете, обладает возможностью наблюдать за поведением выходных параметров бортовых систем, отслеживать поведение погрешностей навигационных параметров, следить за ходом выполнения полетного задания. ПО отлажено в летных экспериментах на летающей лаборатории.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харин Е.Г., Копылов И.А. Технологии летных испытаний бортового оборудования летательных аппаратов с применением комплекса бортовых траекторных измерений. М.: МАИ-ПРИНТ, 2012. – 360 с.
2. Kharin E.G., Polykarov V.G., Kopylov I.A., Kopelovich V.A., Kozhurin V.R. Usage Of Onboard Trajectory Measurement Complex To Estimate Characteristics Of Onboard Equipment Systems And Complexes At Flight Tests- 13th Saint Peterburg International Conference On Integrated Navigation Systems. 29-31 May 2006. SPb, Russia: CSRI «Electropribor», pp. 78-81.
3. Харин Е.Г., Копылов И.А., Копелович В.А., Якушев А.Ф., Макарова А.Ю. Совершенствование методов оценивания характеристик бесплатформенных систем в летных испытаниях. - М.: Новости навигации, 2017, №3. Стр. 6-19.
4. Бортовой твердотельный накопитель цифровой и аналоговой информации ТНЗ. Руководство по технической эксплуатации. – 2011, 166 с.
5. Леднев А.В., Семенов И.А., Сторожевых В.А. Динамически загружаемые библиотеки: структура, архитектура и применение. – Прикладная информатика, №2 (14), 2008. Стр. 31-84.

I.U. Zaripov, A.A. Shiryaev, I.A. Kopylov (Gromov Flight Research Institute, Zhukovsky). **Development of software for control and evaluation of onboard navigation systems in real time flight tests**

Abstract. The article presents the results of the development of software designed to control navigation systems on board an aircraft during a flight experiment based on the analysis of information from the TN3-KBTI storage device. The software has been debugged in flights at the flying laboratory and allows the engineer on board the aircraft to monitor the measurements of the parameters of the onboard systems and control the progress of the flight task.

УДК 629.7.058.47

А.Ю. ФЕДОРИНОВ, М.А. ЕПРИНЦЕВ
(Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург)

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ВИРТУАЛЬНОЙ АЭРОМЕТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрена целесообразность создания и использования виртуальной аэрометрической системы. Моделирование осуществлено в среде LabView, так как она обладает всеми необходимыми элементами и алгоритмами, а для упрощения процесса использует графическое представление элементов алгоритма. Таким образом возможно наглядно изучить принципы построения сложных пилотажно-навигационных систем типа интегрированных систем резервных приборов.

Введение. Дублирующие пилотажно-навигационные устройства летательного аппарата (ЛА) условно объединяют в систему резервных приборов. На примере интегрированной системы резервных приборов (ИСРП) возможно детальное рассмотрение основных принципов получения и обработки полетной информации. ИСРП – это современный прибор резервной системы, необходимый для обеспечения экипажа летательного аппарата информацией о параметрах полета в случае отказа основной системы электронной индикации или невозможности его использования. Стоит отметить, что интегрированные системы резервных приборов применяются на всех типах современных воздушных судов. Резервное оборудование является обязательным на всех бортах ЛА. Целью работы является разработка прототипа виртуальной автономной ИСРП. Как в ходе ее разработки, так и во время работы с ней обучающиеся могут изучить большинство функциональных связей авиационных приборов и сигналов обмена информации на борту ЛА.

Схема функционирования ИСРП. Использование автономных резервных аэрометрических систем позволяет обеспечить полеты на воздушных судах более безопасными. Обобщенная функциональная схема автономной системы резервных приборов в соответствии с [1] приведена на рис. 1.

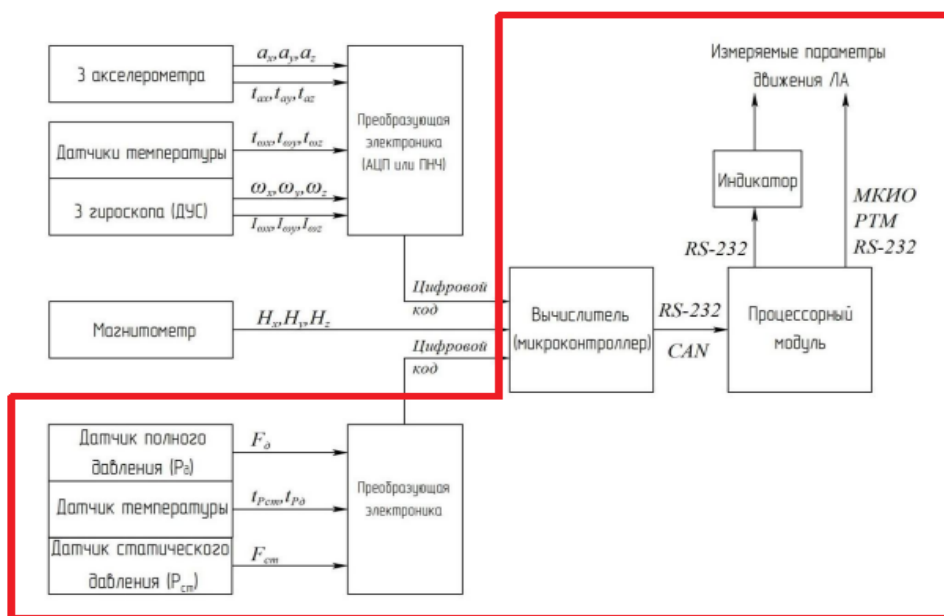


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема автономной системы резервных приборов

Научный руководитель: к.т.н., доцент В.В. Перлюк

На рисунке 1 использованы следующие сокращения и обозначения: a_x, a_y, a_z – измерительные ускорения в связанной системе координат; t_{ax}, t_{ay}, t_{az} – температура акселерометров; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – измеренные угловые скорости в связанной системе координат; $t_{\omega x}, t_{\omega y}, t_{\omega z}$ – температура датчика угловых скоростей; $I_{\omega x}, I_{\omega y}, I_{\omega z}$ – токи потребления датчика угловых скоростей; H_x, H_y, H_z – измеренные проекции вектора магнитного поля в связанной системе координат; F_d, F_{cm} – полное и статическое давление; $t_{p_{cm}}, t_{p_d}$ – температура датчика полного давления и датчика статического давления.

Преобразующая электроника (аналого-цифровой преобразователь (АЦП) или преобразователь напряжения – частота (ПНЧ)) служит для преобразования аналоговых сигналов (для датчиков давления – частотных сигналов) в цифровой код и его последующей передачи в вычислитель (микроконтроллер) для расчета значений параметров углового положения и высотно-скоростных параметров ЛА [2]. В процессорном модуле реализуются основные алгоритмы функционального программного обеспечения ИСРП такие как: алгоритмы внешнего информационного обмена, алгоритмы внутреннего контроля и коррекции, алгоритмы обмена данными с индикатором и т.д. Для организации внутреннего информационного обмена используется интерфейс RS-232, для обмена данными с внешними цифровыми устройствами применяются отечественные авиационные стандарты МКИО и РТМ [3, 4], являющиеся аналогами американских военных стандартов. На индикатор выводятся измеряемые параметры движения ЛА [4]. Для наглядности рассматривается работа ИСРП-21, предназначенного для замены группы резервных электромеханических пилотажно-навигационных приборов, обеспечивающих экипаж информацией о пространственном положении, высотно-скоростных и навигационных параметрах [5]. Проведение исследования и моделирование системы высотно-скоростных параметров в составе системы резервных приборов проведено в программной среде LabView, с заданием таких воздушных параметров как давление и истинная воздушная скорость [6]. Далее полученная информация используется для вычисления значений таких величин как число Маха, приборная скорость и высота полета.

Результаты работы. Для изучения теоретических основ аэрметрических параметров ЛА необходимо выполнить виртуальное моделирование интегрированной системы резервных приборов [7]. Имитация работы аэрметрических приборов выполнена для указателей приборной скорости, числа Маха (М) и барометрического высотомера. На основании обобщенной функциональной схемы автономной интегрированной системы резервных приборов, показанной на рисунке 1, разработана упрощенная функциональная схема аэрметрической части. Функциональная схема моделируемой аэрметрической части резервного прибора изображена на рисунке 2. Датчики давления и истинной высоты используются для введения соответствующих значений вручную.

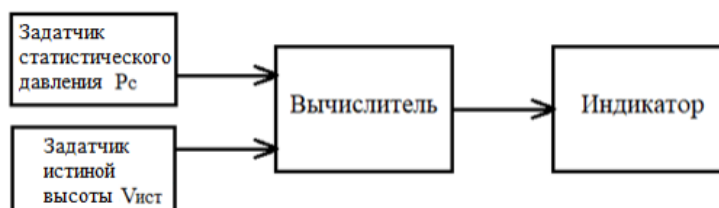


Рис. 2. Функциональная схема моделируемой аэрметрической части резервного прибора

В соответствии с концепцией лабораторной работы оператор задает численные значения величины статического давления, соответствующего моделируемой высоте полета, и значение истинной воздушной скорости. На основе этих данных виртуальный вычислитель согласно аэрметрическим алгоритмам, вычисляет значения приборной скорости, числа М и барометрической высоты полета. Вычисления параметров аэрметрической части системы резервных приборов осуществляются по уравнениям, используемыми для расчета этих величин [8]. В моделируемой ИСРП предусматривается отображение запрограммированных параметров полета от взлета до посадки или на отдельных этапах полета. Кроме того, модель ИСРП допускает отображение аэрметрических параметров по результатам обработки

зарегистрированной полетной информации, при этом в качестве полетной информации могут быть использованы как реальные полетные данные, так и значения, заданные вручную. Под комплексной системой ИСРП следует понимать совокупность приборов служащих для обработки первичной полетной информации, поступающую с первичных измерительных аэрометрических приборов и датчиков.

Заключение. В ходе работы выделены основные блоки приема необходимой полетной информации в комплексе ИСРП. Создание виртуальной аэрометрической системы ИСРП позволяет обучающемуся наглядно увидеть зависимость показаний приборов от входных параметров. В соответствии с концепцией лабораторной работы обучаемый задает численные значения величины статического давления, соответствующего моделируемой высоте полета, и значение истинной воздушной скорости. На основе этих данных виртуальный вычислитель согласно аэрометрическим алгоритмам, вычисляет значения приборной скорости, числа Маха и барометрической высоты полета, и отображает на виртуальной панели. В дальнейшем система может быть усложнена, путем добавления новых связанных параметров полета, программное обеспечение Labview позволяет это реализовать. Рассматривая ИСРП как набор задаваемых значений с последующим вычислением полетных параметров облегчает восприятие для обучающихся, и позволяют наглядно оценить происходящие процессы в системе приборов. Такой подход эффективен в обучении и обеспечивает более глубокое понимание предмета, связанного с обработкой сигналов

ЛИТЕРАТУРА

1. **Корнилов А.В., Корчагин К.С., Лосев В.В.** Разработка алгоритмов комплексной измерительной навигационной системы авиационного применения на отечественной элементной базе // Труды МАИ. - 2021. - №117. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-algoritmov-kompleksnoy-izmeritelnoy-navigatsionnoy-sistemy-aviatsionnogo-primeneniya-na-otechestvennoy-elementnoy-baze> (дата обращения: 07.06.2023).
2. **Чачикян Р. Г., Дмитриев А.В.** (ред.) Навигационно-пилотажные приборы, 1973 г. с. 245
3. ГОСТ 18977-79. Комплексы бортового оборудования самолетов и вертолетов. Типы функциональных связей. Виды и уровни электрических сигналов.
4. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории, 2014. [Электронный ресурс] URL: http://www.mak.ru/russian/info/add_doc/files/AP25_2014.pdf
5. **Алешин Б. С., Антонов Д. А., Веремеенко К. К., Зимин Р. Ю., Жарков М. В., Кузнецов И. М.** Малогабаритный интегрированный навигационно-посадочный комплекс // Труды МАИ. - 2013. - №5.
6. **Семенович К.С.** Категории надежности электроснабжения: автономный резервный источник питания // Ленинградский юридический журнал. - 2017. - №1 (47). [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kategorii-nadezhnosti-elektrosnabzheniya-avtonomnyy-rezervnyy-istochnik-pitaniya> (дата обращения: 17.02.2023).
7. **Суранов А. Я.** LabVIEW: Справочник по функциям. - М.: ДМК Пресс, 2005.
8. Приборное оборудование воздушных судов и его летная эксплуатация: учебное пособие / Е. В. Антонец, В. И. Кочергин, Г. А. Федосеева; Ульяновск : УВАУ ГА (И), 2014. - с. 34.

A.Yu. Fedorinov, M.A. Yeprintsev (St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg).
Experience in developing a virtual aerometric system

Abstract. The paper considers the feasibility of creating and using a virtual aerometric system. The simulation was carried out in the LabVIEW environment, as it has all the necessary elements and algorithms, and uses a graphical representation of the algorithm elements to simplify the process. Thus, it is possible to visually study the principles of building complex flight navigation systems such as integrated backup instrument systems.

С. В. ОКУНЬКОВ, И. В. УЛИТИН, М. А. БАРУЛИНА
(Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов,
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н. Г. Чернышевского, г. Саратов)

ВЛИЯНИЕ НЕСБАЛАНСИРОВАННОГО ДАТАСЕТА НА РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ МУЛЬТИКЛАССОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

В работе изучена взаимосвязь размера набора данных и его несбалансированности с результатами решения задачи мультиклассовой классификации на примере классификации степени хронической варикозной недостаточности по фотографиям нижних конечностей. Было установлено, что при решении ряда задач видится целесообразным пожертвовать общим качеством модели, взяв более маленький, но сбалансированный набор данных, и получив в результате более точный прогноз для малочисленных классов. Показано, что для моделей нейронных сетей, на которых дисбаланс классов сказывается хуже всего, этот способ позволяет получить более качественные прогнозы в целом.

Введение. При решении различных задач методами и алгоритмами машинного часто возникают две основные проблемы, связанные с данными для обучения и верификацией результатов: недостаток данных и их несбалансированность. Первая проблема в определенной мере может быть решена одним из множества различных способов, которые зависят от специфики поставленной задачи [1]. Решение второй проблемы сопряжено с определенными трудностями, особенно для задач классификации, связанных с медициной, так как данная проблема обусловлена изначальным дисбалансом количества пациентов с запущенными случаями заболеваний по сравнению с пациентами, обращающимися к доктору на ранних стадиях болезни. Таким образом, эти две проблемы при решении задач классификации в медицине можно рассматривать в определенной степени взаимосвязанными, так как при увеличении набора данных будет естественным образом расти и степень его несбалансированности. **Целью работы** является изучение взаимосвязи размера набора данных и его несбалансированности на результат решения задачи мультиклассовой классификации на примере классификации степени хронической варикозной недостаточности по фотографиям нижних конечностей. Другими словами, в работе было исследовано, какая выборка для обучения нейросети лучше: маленькая, но сбалансированная, или большая, но имеющая существенный дисбаланс по количеству данных в разных классах.

Обучение моделей нейронных сетей. Для проведения экспериментов были выбраны три предобученные нейронные сети ResNet50, DeiT, ViT, которые показали себя достаточно хорошо для решения задач мультиклассификации. В качестве данных для обучения была использована выборка из 11 118 изображений, полученный авторами ранее в работе [2] для создания автоматической классификации хронической варикозной недостаточности нижних конечностей по фотографиям. Изображения разделялись согласно классификации CEAP [3]: от C0 (норма) до C5 (зажившая трофическая язва) и C6 (активная трофическая язва).

Чтобы определить какая (относительно маленькая, но сбалансированная или большая, но несбалансированная) выборка лучше для обучения нейросети, было проведено обучение выбранных нейронных сетей на различных датасетах, включая начальный. Для определения общего качества прогнозирования использовалась метрика F1-score, как одна из широко используемых метрик для мультиклассовой классификации в том числе на несбалансированном датасете [1]. Для определения качества были также использованы метрики, позволяющие оценить качество распознавания отдельных классов, особенно тех, кто содержит наименьшее количество данных. Для определения насколько хорошо модель может видеть отдельные классы использовалась метрика True Positive (TP). В рассматриваемом в работе датасете самыми малочисленными классами были классы C5 и C6.

На первом этапе был использован начальный датасет из 11 118 изображений. Этот датасет был несбалансирован, соотношение классов составило C0 (7,84%), C1 (25,27%), C2 (13,43%), C3(33,67%), C4 (13,76%), C5 (3,62%), C6 (2,4%). На этом этапе все модели показали достаточ-

но хороший результат не только относительно основной метрики F1-score, которая оказалась больше 0.75 для всех нейросетей, кроме ResNet50. Для всех обученных в работе моделей в Таблице 1 приведены общая метрика F1-score и вероятности правильной классификации (TP) для редких классов C5 и C6. Относительно прогнозов редких классов для сети ViT для самых редких классов C5 и C6 вероятность правильной классификации составила 0.6, DeiT - 0.4 (C5) и 0.55 (C6) соответственно. Модель ResNet50 оказалась самой слабо устойчивой, показав F1-score равный 0.61, а метрика TP для самых редких классов C5 и C6 составила 0.29 и 0.4 соответственно [4].

Таблица 1

Метрики моделей нейронных сетей, полученные на различных этапах

		F1-score	TP C5	TP C6
ResNet50	1 этап	0.61	0.29	0.4
	2 этап	0.58	0.29	0.56
	3 этап	0.72	0.5	0.72
ViT	1 этап	0.75	0.6	0.6
	2 этап	0.7	0.12	0.63
	3 этап	0.75	0.51	0.69
DeiT	1 этап	0.77	0.4	0.55
	2 этап	0.73	0.44	0.71
	3 этап	0.75	0.49	0.7

На втором этапе начальный датасет был дополнен до 20971 изображений, дисбаланс классов в котором незначительно увеличился по сравнению с начальным датасетом. Так, соотношение классов в большом датасете составило: C0 (11,89%), C1 (26,2%), C2 (13,64%), C3(32,66%), C4 (11,38%), C5 (2,18%), C6 (2,04%). Несмотря на то, что размер датасета был увеличен, а его дисбаланс изменился незначительно, качество классификации у всех моделей ухудшилось. Больше всего увеличение дисбаланса выборки сказалось на нейронной сети ViT. Данная модель перестала видеть класс C5, TP для этого класса составила всего 0.12. При этом для ResNet50 увеличение дисбаланса в классах сказалось положительно - TP для C5 не снизился, а для C6 увеличился до 0.56 [4].

На третьем этапе большой датасет был произвольным образом сокращен так, чтобы он был практически сбалансирован. Так образом, количество изображений в нем составило 3169, при этом соотношение классов составило C0 (14,36%), C1 (14,1%), C2 (15,3%), C3(13,94%), C4 (14,33%), C5 (14,45%), C6 (13,47%). В результате обучения метрика F1-score немного упала у моделей DeiT и ViT по сравнению с первым обучением, однако все так же был выше 0.75, а для ResNet50 наоборот увеличился до 0.72. При этом прогнозирование более редких классов улучшилось. В случае определения класса C5 прирост TP для всех моделей составил около 9% процентов, а в случае C6 15-20%, а для всех остальных классов метрика либо незначительно упала на 1-5%, либо выросла на то же значение.

Заключение. В результате проведенных экспериментов было установлено, что предобученные модели нейронных сетей на больших объемах несбалансированных данных обучаются хуже, чем на маленьких, но сбалансированных. При этом больше всего дисбаланс классов сказывается при обучении моделей на большом количестве данных, что доказывается результатами первого и второго экспериментов: при примерно одинаковом уровне несбалансированности классов результат был хуже во втором эксперименте, где общее количество данных было больше. При сравнении же результатов первого и третьего этапа было установлено, что результаты обучения на сбалансированных маленьких выборках в целом становятся немного хуже, но прогнозирование редких классов улучшается. Таким образом, можно сказать, что для решения определенных задач можно частично пожертвовать общим качеством прогнозирования, взяв более маленький, но сбалансированный, датасет, и получив более точный прогноз для малочисленных классов. При этом для моделей, на которых дисбаланс классов сказывается хуже всего, этот способ позволяет получить более качественные прогнозы в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kotsiantis, S., Kanellopoulos, D., Pintelas, P.** Handling imbalanced datasets: A review. *GESTS international transactions on computer science and engineering*. 2006, 30, 1.
2. **Barulina M., Sanbaev A., Okunkov S., Ulitin I., Okoneshnikov I.** Deep Learning Approaches to Automatic Chronic Venous Disease Classification. *Mathematics* 2022, 10, 3571. <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/19/3571>
3. **Ortega M., Fraile-Martinez O., Garcia-Montero. C., Blvarez-Mon M., Chaowen C., Ruiz-Grande F.; Pekarek L.; Monserrat J., Asunsolo A., Garcia-Honduvilla N.** et al. Understanding chronic venous disease: A critical overview of its pathophysiology and medical management. *J. Clin. Med.* 2021, 10, 3239
4. **Окуньков С.В., Улитин И.В., Барулина М.А., Санбаев А.К.** Влияние несбалансированности датасета на результат обучения моделей искусственного интеллекта на примере классификатора хронической венозной недостаточности. *Фундаментальная и прикладная медицина: материалы Всероссийской конференции молодых ученых. Саратов, 29–30 ноября 2022 г.* / редакционная коллегия: С. И. Киреев (ответственный редактор), А. С. Фалькович, А.В. Полиенко. – Саратов: Амирит, 2022. 134 - 135

S. V. Okunkov, I.V.Ulitin, M.A.Barulina , (Precision Mechanics and Control Problems Institute, Saratov. Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov). **Influence of data set size and its unbalance on the multi-classification problems results**

Abstract. In the work, the correlation between the results of solving multi classification problems and some dataset characteristics was studied. By way of example the classification of the degree of chronic varicose insufficiency by lower limbs photos was considered. The dataset size and the imbalance level of the dataset were taken as dataset characteristics under study. The research showed that it can be reasonable for some kind of classification problems to take a smaller, but balanced, dataset. This approach can lead to more accurate predictions for classes with small quantities of items, but the overall quality of the model can get worse. Moreover, this method allows to obtain better predictions for models, which are worst affected by the class imbalance.

И.В. УЛИТИН, С. В. ОКУНЬКОВ,
(Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов,
Саратовский национальный исследовательский государственный университет
имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов)

Е.В ВНУКОВ
(Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов,
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов)

МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ГРАДАЦИЯХ СЕРОГО

В работе исследована возможность использования современных алгоритмов искусственного интеллекта для решения задач классификации изображений в градациях серого с минимальной ошибкой отнесения к ошибочному классу. Проведенные эксперименты показали, что использование нейросетевых ансамблей является одним из способов решения данной задачи.

Введение. Задача классификации изображений является одной из наиболее распространенных задач в области машинного обучения [1]. Среди всех видов этой задачи можно выделить классификацию изображений, представленных в градациях серого, для которых важно минимизировать ошибку отнесения объекта к ложному классу. Примером такой задачи является задача классификации результатов рентгеновской маммографии, когда ошибочное отнесение изображение к определенному классу приводит или к не получению необходимого, или получению ненужного оперативного вмешательства.

Целью данной работы является исследование возможностей применения алгоритмов, которые способны решать задачи классификации изображений в градациях серого с минимальной ошибкой отнесения к ошибочному классу. Для достижения поставленной цели были обучены широко распространенные нейросетевые решения-классификаторы (такие как DenseNet201 и Xception), а также современные модели-трансформеры (ViT, DeiT), которые впервые были описаны в 2020-2021 году [2]. Набор данных для дообучения (fine-tuning) был взят из специальной базы данных маммограмм mini-MIAS (the mini-MIAS database of mammograms) [3]. Набор данных представляет собой 322 изображения в градациях серого, которые хранились в формате png, и для каждого изображения предоставлялась дополнительная текстовая информация. Изображения классифицировались по следующим категориям: норма (207 изображений), доброкачественное отклонение (64 изображения), злокачественное отклонение (51 изображение).

Обучение нейронных сетей и анализ результатов. На первом этапе была осуществлена предобработка данных посредством программной библиотеки Pandas. Изображения были конвертированы в формат TIFF, требуемый для обучения вышеупомянутых нейросетей. Каждому изображению была сопоставлена соответствующая категория.

В качестве одной из оценок качества работы модели была использована матрица искажений (confusion matrix), которая позволяет сделать выводы о том, насколько хорошо модель научилась определять объекты данного класса. Матрица искажений включает в себя такие величины как True Positive, False Positive, True Negative, False Negative для каждого из классов, относительно которых осуществляется классификация. True Positive (TP) или True Negative (TN) - количество объектов “класса А” или количество объектов не из “класса А”, которые были правильно распознаны нейросетью. Величины False Positive (FP) и False Negative (FN) - количество объектов, которые были неправильно отнесены или не отнесены к “классу А”, соответственно.

На втором этапе была решена задача классификации изображений на три различных класса (норма, доброкачественное отклонение, злокачественное отклонение). Результаты представлены в Таблице 1. Как видно, нейросети-трансформеры (ViT, DeiT) примерно в 33% случаев неправильно относили изображения с новообразованиями к объектам класса “Норма”. Другими

словами, 33% людей с возможным отклонением (т.е. со злокачественными образованиями) при классификации с помощью этих алгоритмов могут не узнать об имеющемся у них отклонении, что может привести к летальному исходу. Наименьшее значение FP (0.028) и при этом достаточно неплохое значение TP (0.64) имеет нейросеть DenseNet201, что делает ее в рамках данного эксперимента наиболее предпочтительной для выявления объекта класса “Норма” по сравнению с другими тремя нейросетями.

Т а б л и ц а 1

Оценка результатов работы нейронных сетей с помощью матрицы искажений

Значения матрицы искажений класса “Норма”

	TP	TN	FP	FN
DenseNet201	0.64	0.97	0.028	0.36
Xception	0.12	1	0	0.88
ViT	0.67	0.66	0.34	0.33
DeiT	1	0.67	0.33	0

Значения матрицы искажений класса “Доброкачественное отклонение”

	TP	TN	FP	FN
DenseNet201	1	0.63	0.37	0
Xception	1	0.23	0.77	0
ViT	0.82	0.67	0.33	0.18
DeiT	0.8	0	1	0.2

Значения матрицы искажений класса “Злокачественное отклонение”

	TP	TN	FP	FN
DenseNet201	0.98	0.67	0.33	0.018
Xception	1	0	1	0
ViT	0.85	0	0	0.15
DeiT	0.86	1	0	0.14

После анализа результатов обучения было принято решение о целесообразности использования ансамбля из различных нейронных сетей для решения поставленной в работе задачи. Поэтому на заключительном этапе было осуществлено решение задачи о двух последовательных бинарных классификациях вместо одной тернарной. Сначала применялась классификация на объекты класса “Норма” и “Отклонение”, а затем - классификация на объекты “Злокачественное отклонение” и “Доброкачественное отклонение”.

При изучении результатов обучения удалось определить, что для первичной классификации наиболее подходящей нейросетью для используемой выборки является DenseNet201, которая может хорошо осуществить классификацию объекта на “Отклонение” (TP = 0.93). При этом допускается, что объекты класса “Норма” могут также быть отнесены к ложному классу (FP = 0.78), однако в данном случае ошибка не представляет угрозу человеку, а лишь подразумевает возможное дополнительное обследование на предмет наличия отклонения.

Для осуществления вторичной классификации на виды отклонения лучше всего из исследуемых нейросетей себя показывают нейросети ViT и Xception. ViT отлично определяет доброкачественное отклонение (TP = 1 и TN = 0.59), но также соотносит к нему часть объектов из другого класса (FP = 0.41). В свою очередь, Xception может хорошо определять злокачественное отклонение (TP = 0.9), но она с трудом отделяет от него доброкачественное (FP = 0.77 у злокачественного).

Заключение. В работе показана возможность применения алгоритмов ИИ для решения задач классификации изображений в градациях серого с минимальной ошибкой отнесений к ошибочному классу. Были проведены эксперименты, которые показали, что одним из способов решения данной задачи является использование нейросетевых ансамблей. В частности, использование двух последовательных бинарных классификаций вместо одной тернарной позволяет минимизировать шанс ошибки отнесения объекта в неправильный класс, но вместе с этим требует большего количества ресурсов для реализации. Качество классификации может быть улучшено увеличением набора данных, снижением его несбалансированности и с помощью других подходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Barulina M., Sanbaev A., Okunkov S., Ulitin I., Okoneshnikov I.** Deep Learning Approaches to Automatic Chronic Venous Disease Classification. *Mathematics*. 2022. 10, 3571. <https://www.mdpi.com/2227-7390/10/19/3571>
2. **Touvron H.** Training data-efficient image transformers & distillation through attention. International conference on machine learning. – PMLR, 2021. – С. 10347-10357.
3. **Suckling J.** The Mammographic Image Analysis Society Digital Mammogram Database Exerpta Medica. International Congress Series. 1994. 1069. P. 375 –378.

I.V.Ulitin, S.V.Okunkov (Precision Mechanics and Control Institute, Saratov National Research State University named after N.G. Chernyshevsky, Saratov), E.V.Vnukov (Precision Mechanics and Control Institute, Saratov, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov). **Methods of grayscale images classification problems solving on the example of X-Ray mammography images.**

Abstract. The paper is devoted to studying the possibility of using modern AI algorithms to solve problems of grayscale images classification with a minimum error of assignment to erroneous classes. The experiments showed that neural network ensembles can be considered as one of the possible ways to solve this problem.

УДК 004.89

А.В. АСТАФЬЕВ, А.С. АСТАФЬЕВ, О.С. АСТАФЬЕВА

(Муромский институт федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ РАДИОУСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ О СОСТОЯНИИ КАНАЛА СВЯЗИ, ТРИЛАТЕРАЦИИ И ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

В работе рассматривается информация о состоянии канала связи как базовая информация для определения дальности между приемником и передатчиком, которая впоследствии используется для позиционирования приемника внутри помещений. Используются искусственные нейронные сети на базе моделей RVM и Softmax и алгоритм трилатерации. Вероятность определения дальности с помощью RVM составила 93.7%. Вероятность определения дальности с помощью Softmax составила 98.8%. Ошибка позиционирования не превысила 22 см.

Введение. Использование навигационных приборов для планирования поездок, определения собственного местоположения и местоположения интересующих объектов стало неотъемлемой частью повседневной жизни практически любого человека. В открытом пространстве задачи позиционирования эффективно решаются с использованием систем глобальной навигации, таких как ГЛОНАСС, GPS и т.д. Однако решение подобных задач в закрытых пространствах требует большей точности и масштабируемости, чем могут предложить существующие системы. Использование систем глобальной навигации внутри помещений осложнено наличием большого количества физических преград и эффектом многолучевого распространения. Исходя из этого, для решения задачи позиционирования внутри помещений используются методы, основанные на радиочастотной информации [1], информации магнитного поля [2], технического зрения [3] или их объединения [4]. Каждый из методов навигации имеет свои преимущества и недостатки, однако в силу доступности WiFi

[5- 10] технологий, представляется, что наиболее экономичным является подход, основанный на анализе радиочастотной информации. Использование этих методов позволяет достичь высокой точности, но масштабируемость таких систем довольно сложна. Исходя из этого, можно сделать вывод, что разработка новых алгоритмов позиционирования, основанных на более детальной информации о состоянии среды распространения сигнала, является актуальной научно-технической задачей. Ввиду этого, предлагаемый доклад посвящён исследованию применимости информации о состоянии канала связи (Channel State Information, CSI) для организации позиционирования внутри помещений.

Описание решаемой задачи. Информация о состоянии канала связи описывает, как сигнал распространяется от передатчика до приемника. Согласно стандарту IEEE 802.11n [11], регламентирующего работу беспроводных сетей WiFi, при передаче информации используется модуляция OFDM (англ. Orthogonal frequency-division multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов). При передаче информации канал связи между устройствами разделяется на большое количество менее быстрых подканалов, которые называются поднесущие или подортогональные. Использование технологии MIMO (англ. Multiple Input Multiple Output — метод пространственного кодирования сигнала) позволяет задействовать несколько антенн для одновременной передачи информации между радиоустройствами. Таким образом, при извлечении CSI из радиоустройств при передаче информации можно получить пакет в формате $N \times M \times S$, где N – количество передающих антенн, M – количество принимающих антенн, а S – количество поднесущих. В настоящем исследовании используются два радиоустройства, соединенные по технологии WiFi на частоте 2.4 ГГц, что позволяет получить пакет CSI размером $2 \times 2 \times 56$. Общий вид передачи пакета CSI приведен на рисунке 1.

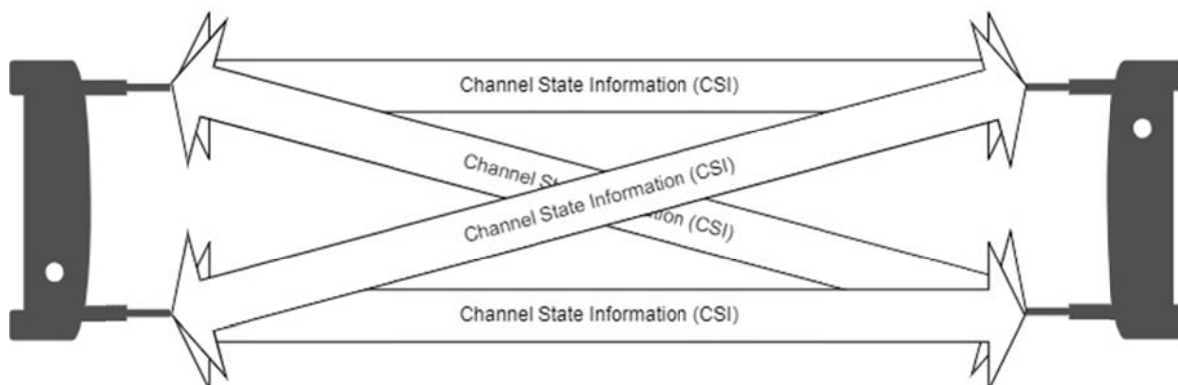


Рис. 1. Общий вид передачи пакета CSI

Каждый элемент пакета CSI содержит информацию о фазе и амплитуде сигнала на конкретной поднесущей по определенной паре антенн и может быть описан набором формул:

$$CSI = [csi_1, csi_2, csi_3, \dots, csi_s], \quad (1)$$

$$csi_s = a_s + b_s j, \quad (2)$$

$$\varphi_s = \arctg\left(\frac{b_s}{a_s}\right) * \frac{180}{\pi}, \quad (3)$$

$$A_s = \sqrt{a_s^2 + b_s^2}, \quad (4)$$

где φ_s – фаза сигнала на s -ной поднесущей, A_s – амплитуда сигнала на s -ной поднесущей.

Таким образом, за одно измерение CSI можно получить 448 анализируемых значений. Исходя из специфики информации и анализа научно-технической литературы, было принято решение организовать позиционирование с использованием алгоритма трилатерации (по трём измеренным расстояниям). Определение расстояния предлагается рассматривать как задачу классификации расстояний между радиоустройствами на основе CSI. Если алгоритм трилатерации подробно описан в литературе [12], то алгоритм определения расстояния между радиоустройствами необходимо разработать. В работе предлагается использование аппарата искусственных нейронных сетей для определения расстояния между радиоустройствами.

Описание эксперимента. Для формирования обучающей выборки был проведен эксперимент в технической лаборатории размером 6х5 метров. В дальней части лаборатории устанавливался стационарный принимающий маршрутизатор. В качестве объекта интереса выступал передающий маршрутизатор, который последовательно перемещался в различные точки наблюдения. Точки наблюдения располагались в прямой видимости принимающего маршрутизатора с шагом в 25 сантиметров. Для учёта углового смещения были проведены замеры со смещением в 50 сантиметров. Общее количество точек сбора информации о состоянии канала связи составило 90. Для каждого расстояния было собрано более 6000 измерений. Таким образом, обучающая выборка включает в себя 70 000 измерений информации о состоянии канала связи: 15 680 000 значений фаз и 15 680 000 значений амплитуд.

В качестве моделей искусственных нейронных сетей были использованы ограниченная сеть Больцмана (RBM), как частный случай автоэнкодера и полносвязная нейронная сеть с функцией активации Softmax в выходном слое. Суть модели RBM заключается в снижении размерности входного сигнала с целью выявления скрытых состояний. Анализ скрытых состояний предлагается производить путём формирования эталонных сигнатур и сравнения с ними текущих данных. Модель Softmax имеет в выходном слое количество нейронов, равное количеству исследуемых классов. Каждый нейрон выходного слоя характеризует вероятность отношения входного сигнала к анализируемому классу.

Проведенные экспериментальные исследования показали возможность определения расстояния между маршрутизаторами в наблюдаемом помещении на основе информации о состоянии канала связи. Вероятность определения расстояния модели RBM составила 93.7%. Это значит, что модель RBM верно классифицировала расстояние в 93.7% случаев от общего коли-

чества. Вероятность определения расстояния модели Softmax составила 98.8%. Ошибка позиционирования не превысила 22 см.

Выводы. Решена задача определения дальности между приемником и передатчиком с использованием информации о состоянии канала связи CSI. В качестве алгоритмов использованы искусственные нейронные сети на базе моделей RBM и Softmax и алгоритм трилатерации. Вероятность определения расстояния модели RBM составила 93.7%. Вероятность определения расстояния модели Softmax составила 98.8%. Ошибка позиционирования не превысила 22 см.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ 21-71-00133

ЛИТЕРАТУРА

1. **Danklang, P., & Pranekunakol, T.** (2021). An RSSI-based weighting with accelerometers for real-time indoor positioning. 2021 13th International Conference on Knowledge and Smart Technology (KST). doi:10.1109/kst51265.2021.9415843.
2. **A. Poulouse, J. Kim and D. S. Han,** Indoor localization with smartphones: magnetometer calibration, 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 2019, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICCE.2019.8661986.
3. **Carlos Campos, Richard Elvira, Juan J. Gómez Rodríguez, José M. M. Montiel and Juan D. Tardós,** ORB-SLAM3: An accurate open-source library for visual, visual-inertial and multi-map SLAM, IEEE Transactions on Robotics 37(6):1874-1890, Dec. 2021.
4. **R. R. Bikmaev** Improving the accuracy of supporting mobile objects with the use of the algorithm of complex processing of signals with a monocular camera and LiDAR. 2019 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2019, pp. 1-4, doi: 10.23919/ICINS.2019.8769360.
5. **LaMarca, A.** (2005) PlaceLab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild. In Proceedings of Pervasive 2005, pp. 116-133. [Available online at: <http://PlaceLab.org/publications/pubs/pervasive-PlaceLab-2005-final.pdf>].
6. **E. Mok; G. Retscher.**: Location Determination Using WiFi – Fingerprinting Versus WiFi – Trilateration Journal of Location Based Services, 2007г
7. **Ishrat J. Quader, Binghao Li, Wendi (Patrick) Peng, Andrew G. Dempster.**: Use of Fingerprinting in Wi-Fi Based Outdoor Positioning International Global Navigation Satellite Systems Society IGNS Symposium 2007
8. **Hernandez, N.; Parra, I.; Corrales, H.; Izquierdo, R.; Ballardini, A.L.; Salinas, C.; Garcia, I.** WiFiNet: WiFi-based indoor localisation using CNNs. Expert Systems with Applications 2021, 177, 10, doi:10.1016/j.eswa.2021.114906.
9. **Wang, F.; Feng, J.W.; Zhao, Y.L.; Zhang, X.B.; Zhang, S.Y.; Han, J.S.** Joint Activity Recognition and Indoor Localization With WiFi Fingerprints. Ieee Access 2019, 7, 80058-80068, doi:10.1109/access.2019.2923743.
10. **Zhao, Y.C.; Xu, J.; Wu, J.; Hao, J.; Qian, H.Y.** Enhancing Camera-Based Multimodal Indoor Localization With Device-Free 682 Movement Measurement Using WiFi. IEEE Internet Things J. 2020, 7, 1024-1038, doi:10.1109/jiot.2019.2948605.
11. IEEE Std. 802.11n-2009: Enhancements for higher throughput. <http://www.ieee802.org>, 2009.
12. **Astafiev A.V., Zhiznyakov A. L., Zakharov A. A., Privezentsev D. G.** Algorithm for Preliminary Processing Channel State Information of the WIFI Communication Channel for Building Indoor Positioning Systems. 24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), 2022, pp. 1-4

A.V. Astafiev, A.S. Astafiev, O.S. Astafieva (Murom Institute (branch) Federal state budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nickolay Grigoryevich Stoletovs", Murom). **Development of algorithm for radio device positioning based on channel state information, trilateration and artificial neural networks**

Abstract. The modern development of information technology places ever greater demands on the accuracy of positioning and navigation algorithms. The paper considers channel state information as basic information for organizing positioning indoors. For positioning, artificial neural networks based on RBM and Softmax models and the trilateration algorithm are used. The average distance accuracy of the RBM model was 93.7%. The average distance accuracy of the Softmax model was 98.8%. The positioning error did not exceed 22 cm.

УДК 004.032.26

И. Н. КОЦ, А. С. ИСАЕВА, М. А. ДЕНИСЕНКО
(Южный Федеральный университет, г. Таганрог)**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТИПА ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА С ПОМОЩЬЮ МИКРОФОНА**

В докладе рассматривается задача классификации дорожного покрытия трех типов: асфальтированная дорога, грунтовое покрытие и мощеная дорога. С помощью микрофона и одноплатного компьютера Nvidia Jetson Nano были собраны образцы аудиоданных при проезде на автомобиле по всем трем покрытиям. По собранным данным была обучена сверточная нейронная сеть. Вероятность распознавания на тестовой выборке составила 99%.

Введение. В связи с неизбежным износом дорожного полотна во время его эксплуатации возникает необходимость его своевременного обслуживания. Состояние дорожного полотна может быть оценено неразрушающими испытаниями на прогиб поверхности [1]. Существует множество различных подходов для оценки состояния дорожного полотна с помощью машинного обучения, например, [2]. В докладе описан способ определения типа дорожного полотна с помощью сверточной нейронной сети.

Постановка задачи. Решается задача классификации. Дана обучающая выборка $X = \{(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)\}$, $i = 1..N$, где x_i – это аудиозапись проезда по дорожному покрытию, а $y_i \in Y$ – это тип дорожного покрытия (асфальт, грунт или мощение), где Y – множество классов. Необходимо на основе обучающей выборки построить алгоритм $a : X \rightarrow Y$, способный соотнести произвольную аудиозапись x с одним из трех классов y .

Качество алгоритма a оценивается с помощью доли правильных ответов (вероятности) на тестовой выборке. Вероятность определения класса определяется по следующей формуле:

$$P = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}, \quad (1)$$

где TP – количество истинно положительных ответов, TN – количество истинно отрицательных ответов, FP – количество ложноположительных ответов, FN – количество ложноотрицательных ответов.

Цель работы – определить вероятность распознавания типа дорожного покрытия с использованием выбранной нейронной сети.

Описание эксперимента. Для обеспечения сбора данных использовались микрофон SVEN MK-150 и модуль SIM7600G-H для Jetson Nano.

Для сбора аудиоданных был написана программа на языке Python с использованием библиотеки `pyaudio`. Запись происходила при частоте дискретизации 44100 Гц, количество отсчетов в одном кадре составляло 512. Аудиоданные сохранялись в виде NumPy массивов длиной 44032 отсчетов в одном файле, длительность которого примерно соответствовала одной секунде. В имени файла содержится дата и время снятия сигнала для контроля перезаписи. Всего было собрано 1090 файлов. С помощью объединения и нарезки файлов с 10% перекрытием удалось увеличить обучающую выборку в 100 раз относительно размера собранных данных. Таким образом, общее количество данных составило: для асфальтового полотна – 21200 файлов, для грунтовой дороги – 63800 файлов, для мощеной дороги – 24000 файлов.

Сбор данных осуществлялся на легковом автомобиле Volkswagen polo. Система сбора данных располагалась на полу в задней части автомобиля. Движение осуществлялось по маршруту длиной 5 км (рис.1). Данный маршрут был выбран исходя из наличия трех типов покрытия: асфальтовое покрытие (отмечено зеленым), грунтовая дорога (отмечено красным) и мощеная дорога (отмечено синим).

Научный руководитель: руководитель дизайн-центра д.т.н. Ковалев А.В.

Аудиофайлы были преобразованы в изображения звуковой волны в формате .png с качеством 75 точек на дюйм (dpi). Объем каждого изображения находился в пределах 15 КБ. Разметка данных производилась по координатам, записанным в файлах. Подбирался диапазон координат, принадлежащий к определенному дорожному покрытию по карте и все файлы, попадающие в этот диапазон, переносились в соответствующий каталог.

Обучение нейронной сети. Для обучения нейронной сети использовалась библиотека keras для Python.

За основу нейронной сети была взята предобученная сеть VGG16 без полносвязных слоев классификации. После этого происходило переобучение сети. Выбор количества полносвязных слоев классификации и количества нейронов в них был сделан перебором с помощью модуля keras tuner, который в автоматическом режиме обучает различные варианты нейросети в заданном диапазоне по заданному алгоритму. Количество слоев классификации варьировалось от 1 до 2, а количество нейронов в них задавалось в диапазоне от 256 до 4096. Выходной слой классификации включал в себя 3 нейрона, значение на выходе которых отражает вероятность принадлежности к одному из классов. Поиск параметров нейросети выполнялся по алгоритму гипердиапазона [3]. Лучшие результаты показала сеть с 2 слоями классификации с 2560 и 3840 нейронами. С такой конфигурацией нейросеть была обучена на обучающей выборке. Лучший результат на обучающих данных, которому соответствовало значение функции потерь 0,0029 и вероятность правильного определения классов 0,9995, был достигнут на 32-ой эпохе. Вероятность определения классов на тестовых данных составила 0,9989.

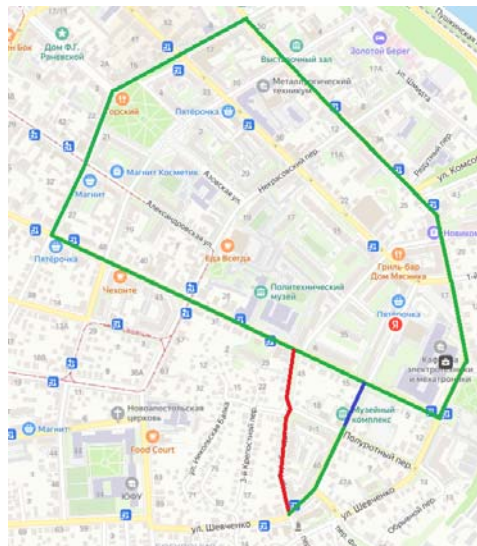


Рис. 1. Схема движения на автомобиле

Заключение. Были собраны данные для трех типов дорожного покрытия: асфальт, грунтовая и мощеная дорога. Была проведена предварительная обработка и разметка данных, а также подобраны параметры полносвязных слоев для обучения нейросети. Выбранными параметрами стали 2560 и 3840 нейронов в полносвязных слоях. С этими параметрами была обучена нейросеть, вероятность правильной классификации на тестовых данных составила 99%.

В дальнейшем планируется использование данной методики для применения в области диагностики дефектов на железнодорожных путях.

Работа проводилась в рамках проекта: «Разработка и исследование методов и средств мониторинга, диагностики и прогнозирования состояния инженерных объектов на основе искусственного интеллекта» № FENW-2020-0022.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Elshamy, M. & Tiraturyan, A. & Uglova, E.** (2022). Evaluation of the elastic modulus of pavement layers using different types of neural networks models. *Advanced Engineering Research*. 21. 364-375. 10.23947/2687-1653-2021-21-4-364-375.
2. **Justo-Silva, R., Ferreira, A., & Flintsch, G.W.** (2021). Review on Machine Learning Techniques for Developing Pavement Performance Prediction Models. *Sustainability*, 13, 5248.
3. **Li, L. & Jamieson, K. & DeSalvo, Giulia & Rostamizadeh, A. & Talwalkar, A.** (2018). Hyperband: A novel bandit-based approach to hyperparameter optimization. *Journal of Machine Learning Research*. 18. 1-52.

I.N.Kots, A.S.Isaeva, M.A.Denisenko (Design Center for Microelectronic Component Base for Artificial Intelligence Systems of the Southern Federal University, Taganrog). **Using a convolutional neural network to determine the type of roadway using a microphone**

Abstract. This paper considers the task of classification a road surface from three options: paved road, gravel road, and cobbled road. Using a microphone and an Nvidia Jetson Nano development kit, audio data samples were collected while driving on all three pavement types. A convolutional neural network was trained on the collected data. The recognition accuracy of the test sample was 99.89%.

УДК 004.932.72

А. А. КИЛЬДИБЕКОВА

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург)

МЕТОД СОСТАВЛЕНИЯ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Исследуется способ построения автоматической системы разделения твердых бытовых отходов (ТБО), с целью улучшения экологической обстановки. Предлагается составить алгоритм и программную реализацию системы автоматического формирования обучающей выборки для классификации ТБО по фото- видеонаблюдению за работой сортировщика ТБО на конвейере.

Введение. Россия демонстрирует низкие экологические показатели на международном (по результатам [1]) и национальном (согласно [2]) уровнях. Выявлено (по данным 2022г.), что в категориях, отвечающих за обращение с ТБО (твердыми бытовыми отходами), страна демонстрирует низкие показатели экологической эффективности. Также из-за недостаточной скорости утилизации происходит накопление неутилизированных ТБО (около 30 млрд. тонн с 2012 по 2021 гг.). Для улучшения ситуации предлагается развить область переработки и утилизации отходов. Основная сложность возникает на стадии сортировки. В соответствии с [3] эффективно использование автоматических методов по камере и нейронной сети. Однако они развиваются медленно из-за отсутствия хороших баз данных размеченных изображений. Готовые выборки ограничены в размерах и конкретной специфике, что приводит к необходимости самостоятельного составления выборок, т.е. разметки изображений. Этот этап – один из самых сложных и трудоемких, в этой связи, его оптимизация является актуальной задачей.

Предлагаемый доклад посвящен анализу применяемых решений для автоматической сортировки и разметки изображений; синтезу алгоритма формирования обучающей выборки для автоматической сортировки ТБО и проверки его эффективности.

Повышение эффективности и доступности сортировки отходов.

Проблема разметки изображений. В зависимости от степени участия пользователя в процессе разметки изображений, выделяют ручную, полуавтоматическую, автоматическую разметки. С ростом степени автоматизации процесса снижаются его трудоемкость и стоимость и повышается скорость. Максимальную точность показывает полуавтоматическая разметка, минимальную – автоматическая. Приоритетный для развития способ – автоматический: при его развитии проблема низкой точности может быть решена. В то же время повысить трудоемкость и скорость при использовании полуавтоматической разметки не представляется возможным, так как эти показатели зависят в основном от работы пользователя.

В докладе рассмотрено несколько программ, осуществляющих разметку изображений, и проведено их сравнение (табл. 1). Для составления таблицы использованы данные из [4 – 8].

Т а б л и ц а 1

Продукт	Коммерческие			С открытым ПО	
	Nasty.ai	V7 Darwin	Dataloop	Label Studio	CVAT
Ручная разметка	+	+	+	+	+
Полуавтоматическая разметка	+	+	+	+	+
Автоматическая разметка	+	-	-	-	-
Используемые инструменты	Нейросеть, инструменты выделения контура	Нейросети для определения контура и для разметки	Нейросеть	Только графический интерфейс	Средства библиотеки OpenCV
Возможность подключения пользовательской нейросети	Поддерживается				

Научный руководитель: к.ф.-м.н., доцент ВШАиР СПбПУ Ананьевский М.С.

Следует выделить продукты Nasty.ai и V7 Darwin: первый – поддерживает автоматическую разметку, второй – отличается эффективностью инструментов для полуавтоматической. Автоматический способ поддерживается лишь Nasty.ai, что говорит о слабом развитии этого метода. Более того, согласно [6], для использования этого метода Nasty требуется предобученная нейронная сеть, что говорит о его ограниченной эффективности. Таким образом, проведенный анализ свидетельствует о необходимости развития методов автоматической разметки.

Алгоритм системы формирования обучающей выборки. В докладе прилагается алгоритм автоматической разметки, основная идея заключается в том, что сортировщик убирает определённый тип объектов с ленты конвейера; по двум кадрам – до и после того, как он извлёк целевой объект – определяется, какой объект был извлечён, и он выделяется рамкой на исходном изображении. Приняты следующие допущения: целевым является только один тип объектов, заданный заранее; объекты не накладываются друг на друга; объекты не сливаются с лентой конвейера (лента контрастная); доступно изображение пустой конвейерной ленты.

Предлагаемый алгоритм состоит из трёх этапов:

- предобработка – бинаризация исходных изображений;
- сопоставление исходных изображений (до и после извлечения объекта) и определение координат целевого объекта;
- постобработка – выделение целевого объекта рамкой.

Проведено исследование методов бинаризации: рассмотрены методы с глобальным [9, 10] и локальным [11, 12] порогами. Однако при использовании классических алгоритмов не используется информация о цвете конвейерной ленты, что приводит к определению ложного порога бинаризации. Следовательно, рассмотрены методы, учитывающие этот параметр [13–15]. В качестве прототипа выбран [15], так как он решает схожую по реализации задачу: выделение кожи на изображении.

Предлагаемый алгоритм бинаризации, состоит из следующих этапов:

- Переход к цветовому пространству HSV (оттенок, насыщенность, яркость).
- Определение модели нормального распределения оттенка фона (μ – среднего и σ^2 – дисперсии) по изображению пустой конвейерной ленты.
- Определение вероятности соответствия каждого пикселя оттенку фона.
- Пороговая фильтрация полученного изображения.

Оставлена программная реализация системы формирования обучающей выборки. Результат работы программы представлен на рисунке 1.



Рис. 1. Результат работы программы

Тестирование алгоритма продемонстрировало работоспособность предложенного подхода и свидетельствует о перспективности его дальнейшего развития.

Заключение. Проведён обзор программных продуктов осуществляющих разметку изображений, при этом выявлено, что автоматический способ поддерживается только программой

Nasty.ai. Предложен алгоритм и программная реализация (средствами OpenCV) системы автоматического формирования обучающей выборки для классификации ТБО по фото- видеонаблюдению за работой сортировщика ТБО на конвейере. Проведено тестирование разработанного алгоритма, показавшее его эффективность. Дальнейшие исследования связаны с анализом и сравнением методов сопоставления изображений и постобработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. The Environmental Performance Index / Yale Center for Environmental Law & Policy; Center for International Earth Science Information Network Earth Institute, Columbia University, URL: <https://epi.yale.edu/>, последнее обращение 01.12.2022.
2. Официальный сайт федеральной службы государственной статистики, URL: <https://rosstat.gov.ru/>, последнее обращение 01.12.2022.
3. Костин С. В., Шамраев А. А., Якимайнен Д. С. Автоматическая классификация и сортировка бытовых отходов //Журнал издается с 2003 г. 12 выпусков в год. – 2003. – С. 204.
4. Официальный сайт компании CVAT, URL: <https://www.cvat.ai/>, последнее обращение 01.12.2022.
5. Официальный сайт компании Dataloop, URL: <https://dataloop.ai/>, последнее обращение 01.12.2022.
6. Официальный сайт компании Nasty, URL: <https://hasty.ai/>, последнее обращение 01.12.2022.
7. Label Studio, URL: <https://labelstud.io/>, последнее обращение 01.12.2022.
8. Официальный сайт компании V7, URL: <https://www.v7labs.com/>, последнее обращение 01.12.2022.
9. Орлов Д. В., Нестеренков С. Н., Марков А. Н. Сравнительный анализ методов бинаризации изображений. – 2022.
10. Рябова Л. В., Мазур Я. С., Вишневская Н. С. Сравнительный анализ методов бинаризации изображений радужной оболочки глаза //Безпека інформації. – 2017. – Т. 23. – №. 3. – С. 171–175.
11. Горитов А. Н. Предварительная обработка изображений в системах технического зрения //Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2018. – Т. 21. – №. 4–1. – С. 53–58.
12. Горитов А. Н. Сравнительный анализ методов бинаризации изображений //Электронные средства и системы управления. Материалы докладов Международной научно-практической конференции. – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2019. – №. 1–2. – С. 66–69.
13. Park S. E. et al. Color Image Segmentations of a Vitiligo Skin Image with Android Platform Smartphone //The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers. – 2014. – Т. 63. – №. 1. – С. 173–178.
14. Kalavathi P. A Thresholding Method for Color Image Binarization //SSRG International Journal of Computer Science and Engineering. – 2014. – Т. 1. – №. 7. – С. 31–40.
15. Резник К. Ю., Сулема Є. С. Метод локализации ушной раковины на изображении человека в профиль //Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2014. – №. 4. – С. 113–119.

A.A.Kildibekova (St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, St. Petersburg). **Method for composing a training sample for solving image classification problems**

Abstract. A method of constructing an automatic system for the separation of MSW (municipal solid waste) is being investigated in order to improve the environmental situation. It is proposed to draw up an algorithm and software implementation of a system for automatic formation of a training sample for MSW classification by photo-video monitoring of the operation of a MSW sorter on a conveyor.

УДК 519.7

Д. Д. ДЕВЯТКИН
(ИПУ РАН им. Трапезникова, Москва)

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ КЛАССИЧЕСКОГО И ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ

Реализован классификатор для решения задачи классификации предложений / текстов по 5 функциональным стилям речи: научный стиль, официально-деловой стиль, публицистический стиль, разговорный стиль, художественный стиль. Рассмотрено два метода: метод классического машинного обучения и метод, основанный на глубоком обучении. Проведена апробация обоих подходов.

Введение. В настоящей работе решается задача классификации текстов, относящихся к различным функциональным стилям речи русского языка: научный, официально-деловой, публицистический, разговорный и художественный. Реализовано два алгоритма, которые основаны на разных подходах: классическом машинном обучении и методе глубокого обучения. Подготовительная работа подразумевала под собой несколько логических этапов: сбор и разметка, очистка и предобработка набора данных, выбор лучшего алгоритма, решающего задачу классификации стиля текста. Для создания размеченного набора данных использовались популярные источники информации: новостные сайты, литературные произведения, архив научных публикации и статей и т.д.

Подход классического машинного обучения. При использовании классического машинного обучения для преобразования текста в числовое представление (векторизация) использовался алгоритм Term Frequency-Inverse Document Frequency (TF-IDF). Алгоритм TF-IDF позволяет рассчитать важность слова для какого-либо документа относительно количества его употреблений в конкретном документе и во всей коллекции документов. Основная идея TF-IDF заключается в следующем: если термин часто используется в определенном тексте, но редко в других, то он имеет большую значимость для данного текста:

$$TF = \frac{w}{N}, \quad (1)$$

где TF – частота употребления термина в тексте, w – количество определенных терминов в документе, N – общее количество всех терминов в документе.

$$IDF = \ln\left(\frac{n}{M}\right), \quad (2)$$

где IDF – обратная частота употребления термина в тексте, определяющая, насколько уникальным он является во всей коллекции документов, n – количество документов в коллекции, M – количество документов, содержащих определенный термин.

В качестве алгоритма классического машинного обучения для решения задачи классификации была использована логистическая регрессия [1].

Подход глубокого обучения. Другой подход строится на глубоком обучении с использованием нейронных сетей. Для поиска векторного представления слов использовалось программное обеспечение word2vec. Обучение производилось с применением библиотеки машинного обучения gensim с предобученными моделями представления слов. В качестве алгоритма использовалась рекуррентная нейронная сеть GRU [2], структура которой приведена на рис. 1.

Здесь x_t – входной вектор, h_t – вектор скрытого состояния, z_t – вектор вентиля обновления, \tilde{z}_t – вектор вентиля сброса, \otimes обозначает произведение Адамара.

В качестве последнего слоя, отвечающего за классификацию, использовался полносвязный слой размером 5. В качестве функции потерь использовалась кросс-энтропия.

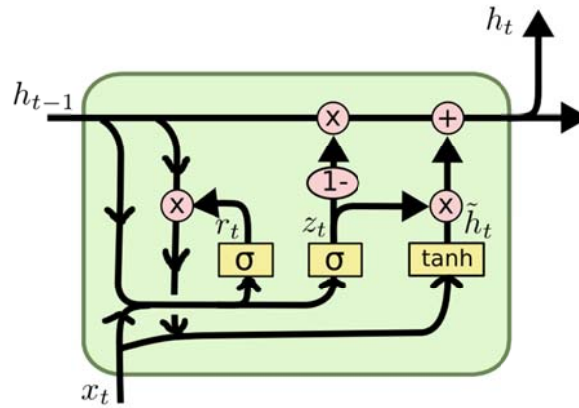


Рис. 1. Архитектура сети GRU.

Экспериментальная часть. При обучении алгоритма, основанного на классическом подходе, варьировалось несколько гиперпараметров: random seed в разбиении набора данных на тестовую и обучающую выборку, параметр регуляризации логистической регрессии, решатель задачи оптимизации и количество итераций. Лучший результат был показан со следующими параметрами: решатель – liblinear, параметр регуляризации логистической регрессии – 1000, количество итераций – 2000, random seed – 31.

Для похода с глубоким обучением параметров для варьирования было больше: количество эпох, вектор скрытого состояния в GRU, количество слоев в модели, вероятность исключения нейронов в результате dropout, оптимизатор, шаг обучения, размер батча.

Результаты. Моделирование было выполнено с помощью языка программирования Python и библиотеки машинного обучения torch. При использовании логистической регрессии и векторизации на основе TF-IDF традиционная в задаче классификации метрика F1 по 100 симуляциям составила 0.89. На рис. 2 продемонстрирована матрица ошибок для этого подхода.

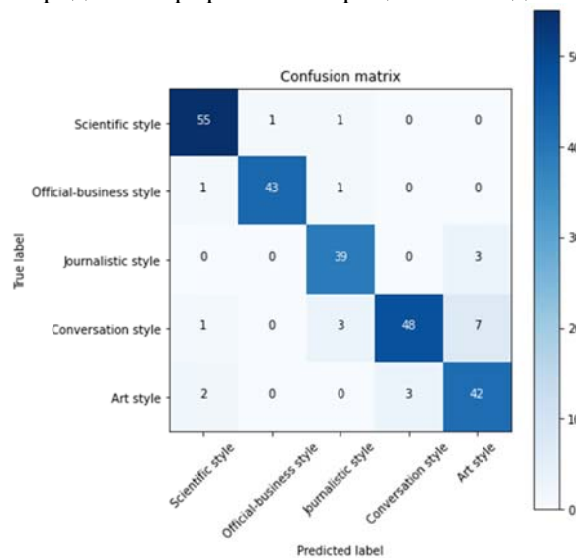


Рис. 2. Матрица ошибок для логистической регрессии

По строкам матрицы откладываются истинные значения классов, по столбцам – рассчитанные алгоритмом значения. На главной диагонали отображается количество совпадений ответов алгоритма с истинными значениями при определении конкретного класса. На побочных диагоналях показано количество ошибок алгоритма.

Для подхода на основе глубокого обучения метрика F1 составила 0.954, что неудивительно, так как подход на основе глубокого обучения имеет большую обобщающую способность. На рис. 3 представлена соответствующая матрица ошибок.

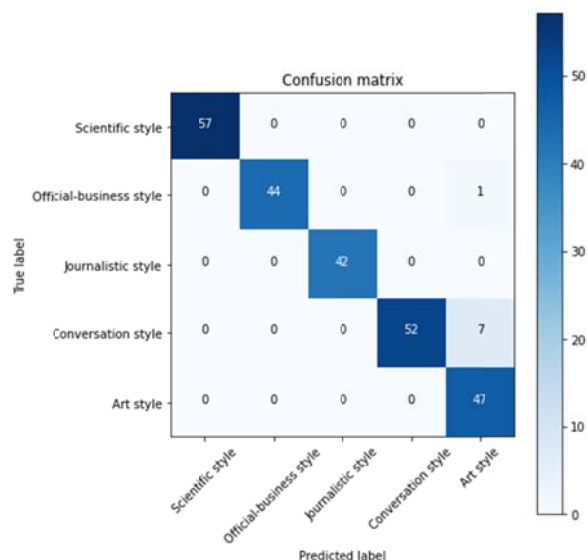


Рис. 3. Матрица ошибок для глубокого обучения

Заключение. В работе была выявлена возможность классификации стилей предложения с помощью методов машинного обучения, экспериментально показано преимущество метода глубокого обучения для решения задачи, в частности, за счет его большей обобщающей способности. Однако следует учитывать, что объем используемых для обучения данных был невелик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жерон, Орельен., Прикладное машинное обучение с помощью Scikit-Learn и TensorFlow: концепции, инструменты и техники для создания интеллектуальных систем. 2-е издание: Пер. с англ. – СПб: ООО «Диалектика», 2020. – 1040 с.
2. Рашка С., Python и машинное обучение / пер. с англ. А. В. Голунова. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 418 с.
3. Любанович Б., Простой Python. Современный стиль программирования. – СПб.: Питер, 2016. – 480 с.

D.D.Devyatkin (ICS RAS, Moscow). **Comparison of classical deep learning methods in solving the problems of classification**

Abstract. In this work, a classifier was implemented to solve the problem of classifying sentences / texts according to 5 functional styles of speech: scientific style, official business style, journalistic style, colloquial style, artistic style. To solve the problem, 2 methods were used: classical machine learning methods and a method based on deep learning. As a result of the work done, impressive classification quality results were obtained on a relatively small data set.

Секция 8.
ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

УДК 53.088

В. В. БОГОМОЛОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

**ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПО ДАЛЬНОСТЯМ
ДО ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯКОВ С УТОЧНЕНИЕМ РЕЗУЛЬТАТОВ
ПО ДАННЫМ, ПРЕДШЕСТВУЮЩИМ ПЕРВОМУ НАВИГАЦИОННОМУ РЕШЕНИЮ**

Разработан рекуррентный алгоритм определения координат автономного необитаемого подводного аппарата с использованием измерений дальностей до гидроакустических маяков, измерителя относительной скорости и курсоуказателя при отсутствии априорных координат аппарата. Алгоритм запускается, когда впервые появляются одномоментные измерения от, по меньшей мере, трех маяков. Для получения начальной точки линеаризации измерений применяется приближенный аналитический метод. В алгоритме используется два фильтра, первый - обрабатывает сохраненные до запуска алгоритма измерения, а второй – измерения, поступающие в реальном времени. Результаты двух фильтров объединяются. Представлены результаты моделирования и обработки натуральных данных, подтверждающие эффективность разработанного алгоритма.

Введение. Система счисления пути, в состав которой входят лаг и курсоуказатель, обычно составляют основу навигационной системы автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). Но для такой системы характерно значительное накопление ошибок. Для коррекции системы счисления используются методы навигации по измерениям дальностей до гидроакустических маяков [1-8], которые отличаются количеством приемников и маяков, геометрическими особенностями их расположения, используемыми математическими подходами. Измерения дальности формируются как произведение измеренного времени прохождения сигнала на приближенную оценку скорости звука в воде. В случае, когда априорные координаты АНПА отсутствуют либо их погрешности сопоставимы с дальностями до маяков, возникают трудности с применением алгоритмов калмановского типа на основе линеаризации измерений. Поэтому для получения приемлемой точки линеаризации в момент первого навигационного решения t_0 , когда впервые появляются одномоментные измерения от трех или более маяков, позволяющих однозначно определить координаты АНПА, в работе используется приближенный аналитический способ, предполагающий отсутствие погрешностей измерений. Все измерения, поступившие в предыдущие моменты, сохраняются. Для учета сохраненных до момента t_0 измерений можно использовать процедуру сглаживания в фиксированной точке [9]. Такое решение было исследовано в [10, 14]. Однако обработка большого числа сохраненных до момента t_0 измерений вызывает задержку в получении оценок текущих координат. Чтобы ее избежать, предлагается решение, в котором обработка измерений до и после момента t_0 выполняется параллельно с помощью двух фильтров: первый обрабатывает сохраненные измерения в обратном порядке, а второй – текущие измерения. При этом результаты второго фильтра корректируются по результатам первого.

Постановка задачи навигации АНПА. Для дискретных моментов времени $t_i, i = -N, \dots, 0, 1, 2, \dots$ имеются измерения дальности до маяков

$$Y_i^j = T_i^j \hat{c}_0 = \sqrt{(x_i^j - x_i)^2 + (y_i^j - y_i)^2 + (z_i^j - z_i)^2} + \Delta c \cdot T_i^j + \delta_i + v_i^j,$$

Научный руководитель: ведущий научный сотрудник д.т.н. Кошаев Д.А.

где $j = 1..n_i$ – номер маяка, $\hat{c}_0, \Delta c$ – априорная оценка скорости распространения звука в воде и ее ошибка, T_i^j – измеренное время прохождения сигнала, x_i, y_i – неизвестные горизонтальные координаты АНПА в локальной прямоугольной системе координат с географической ориентацией осей, x_i^j, y_i^j – известные горизонтальные координаты маяков, z_i^j, z_i – известные глубины маяков и АНПА, δ_i – общая для всех маяков и v_i^j некоррелированная для разных маяков бел шумные ошибки со среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_δ, σ_v . Предполагается, что для $i < 0$ имеются измерения от не более чем двух маяков, а в момент $i=0$ – от не менее чем трех маяков, т.е. $n_i \leq 2$ при $i < 0, n_0 \geq 3$. Количество используемых маяков при $i > 0$ не оговаривается. Априорная информация о местоположении АНПА отсутствует. На борту АНПА используется система счисления на основе двухосевого относительного лага с инструментальными бел шумными ошибками, имеющими СКО $\sigma_{\Delta V}$, и курсоуказателя с ошибкой ΔK в виде стационарного марковского процесса первого порядка, имеющего СКО $\sigma_{\Delta K}$ и интервал корреляции $\tau_{\Delta K}$. При счислении используются значения географических составляющих скорости течения с ошибками $\Delta U^x, \Delta U^y$ в виде стационарных марковских процессов первого порядка с СКО $\sigma_{\Delta U}$ и интервалом корреляции $\tau_{\Delta U}$. Все указанные ошибки считаются гауссовскими центрированными величинами. Далее под номерами i дискретных моментов времени будем понимать сами моменты t_i .

Требуется определить горизонтальные координаты АНПА x_i, y_i для моментов $i \geq 0$ по всем доступным измерениям. Задача сводится к байесовскому оцениванию вектора состояния $X_i = [x_i, y_i, \Delta c, \Delta K_i, \Delta U_i^x, \Delta U_i^y]^T$ по измерениям Y_{-N}, \dots, Y_i , где $Y_i = (Y_i^1, \dots, Y_i^{n_i})^T$.

Рекуррентный алгоритм навигации АНПА с использованием разномоментных измерений дальностей. На рис. 1 приведена схема, поясняющая принцип действия предлагаемого рекуррентного алгоритма. На схеме показана эволюция гауссовских аппроксимаций апостериорных плотностей $f(A|B)$ [4], т.е. плотностей вероятности оцениваемой случайной величины A , условной по отношению ко множеству измерений B . Следует иметь в виду, что сами $f(A|B)$ в алгоритме не формируются, вырабатываются лишь их параметры.



Рис. 1. Схема преобразования гауссовских аппроксимаций апостериорных плотностей при работе предложенного алгоритма. На схеме \tilde{x}_0, \tilde{y}_0 – начальная точка линеаризации, $X_{0/-i}, P_{0/-i}$ – оценка X_0 по Y_{-i}, \dots, Y_0 и ковариационная матрица ее ошибок

Запуск алгоритма выполняется в момент $i=0$, когда впервые появляются единовременные измерения от трех или большего количества маяков и формируется первое навигационное решение. Начальная точка линеаризации \tilde{x}_0, \tilde{y}_0 определяется аналитически путем решения системы из $(n_0 - 1)$ линейных уравнений, полученных из разностей дальномерных измерений Y_0^j в предположении, что помехи измерений δ_0, v_0^j и Δc нулевые. Формируется априорная оценка вектора состояния $\tilde{X}_0 = [\tilde{x}_0, \tilde{y}_0, 0, 0, 0, 0]^T$ и обратная ковариационная матрица ее ошибки \tilde{P}_0^{-1} в виде диагональной матрицы с диагональными элементами $0, 0, \sigma_{\Delta c}^{-2}, \sigma_{\Delta K}^{-2}, \sigma_{\Delta U}^{-2}, \sigma_{\Delta U}^{-2}$. Такая \tilde{P}_0^{-1} предполагает бесконечно большие ошибки оценок \tilde{x}_0, \tilde{y}_0 . Исходя из этих априорных данных по измерениям Y_0^j , теперь уже с учетом стохастических свойств δ_0, v_0^j и Δc , оценивается X_0 с применением итерационного алгоритма [11]. После чего один фильтр в прямом времени (см. на схеме горизонтальные стрелки вправо) оценивает расширенный вектор состояния $\bar{X}_i = [X_0^T \underbrace{x_i \ y_i \ \Delta K_i \ \Delta U_i^x \ \Delta U_i^y}_{X_i^T \text{ без } \Delta c}]^T$ по текущим измерениям, а другой – в обратном времени (см.

на схеме горизонтальные стрелки влево) оценивает расширенный вектор состояния $\bar{X}_{-i} = [X_0^T \underbrace{x_{-i} \ y_{-i} \ \Delta K_{-i} \ \Delta U_{-i}^x \ \Delta U_{-i}^y}_{X_{-i}^T \text{ без } \Delta c}]^T$ в ходе обработки сохраненных до $i=0$ измерений.

По результатам работы фильтра в обратном времени формируются [12]: вектор фиктивных измерений $\varphi_i = \hat{X}_{0/0} + (P_{0/0} + G_i)P_{0/0}^{-1}(\hat{X}_{0/-i} - \hat{X}_{0/0})$, ковариационная матрица помех фиктивных измерений $G_i = P_{0/0}(P_{0/0} - P_{0/-i})^{-1}P_{0/0} - P_{0/0}$, скорректированные значения оценки вектора состояния $\hat{X}_i = \hat{X}_{i/i} + P_{(i,0)/i}(\Theta_i)^{-1}\Delta\varphi_i$ и матрицы ковариации $P_i = P_{i/i} - P_{(i,0)/i}(\Theta_i)^{-1}P_{(i,0)/i}^T$. Здесь $\Delta\varphi_i = \varphi_i - \hat{X}_{0/i}$ - невязка фиктивного измерения, $\Theta_i = P_{0/i} + G_i$ - ее ковариационная матрица, $\hat{X}_{i/i}, \hat{X}_{0/i}, P_{i/i}, P_{(i,0)/i}, P_{0/i}$ - полученные фильтром в прямом времени оценки векторов X_i, X_0 и блоки ковариационной матрицы их ошибок, $\hat{X}_{0/-i}, P_{0/-i}$ - полученные фильтром в обратном времени оценка вектора X_0 и ковариационная матрица ее ошибки, $\hat{X}_{0/0}, P_{0/0}$ - оценка вектора X_0 по измерению Y_0 и ковариационная матрица ее ошибки.

Метод фиктивных измерений был предложен в [12] для корректировки результатов фильтра Калмана с таким расчетом, чтобы они соответствовали другим априорным данным о векторе состояния. При этом выполнять повторную обработку реальных измерений не требуется. В рассматриваемой задаче фиктивные измерения используются для быстрого преобразования результатов работы фильтра в прямом времени в результаты оценивания X_i по измерениям Y_{-i}, \dots, Y_i . Фиктивное измерение φ_i предоставляет новую информацию о векторе X_0 , которая опирается на измерения для $i < 0$. Поскольку вектор X_0 коррелирован с текущим вектором состояния X_i , при обработке φ_i уточняется оценка вектора X_i , полученная в прямом времени ($i \geq 0$).

Поскольку обработка сохраненных и текущих измерений выполняется двумя независимыми фильтрами, работу этих фильтров можно реализовать с помощью технологии параллельных вычислений, что сократит время выполнения алгоритма. Вместе с обработкой текущего измерения Y_i можно обрабатывать не одно, как показано на схеме, а несколько измерений для $i < 0$. В отличие от алгоритма со сглаживанием в фиксированной точке [10, 14], где текущие измерения Y_i для $i > 0$ обрабатываются после обработки всех Y_{-N}, \dots, Y_0 , здесь измерения для $i < 0$ учи-

тываются постепенно, что позволяет получать уточненные оценки X_i с темпом поступления Y_i , т.е. в реальном времени.

После исчерпания всех имеющихся до момента $i=0$ измерений оценивать X_0 совместно с X_i не имеет смысла, поэтому с этого момента в алгоритме оценивается только X_i по вновь поступившим измерениям.

Результаты моделирования.

Для проверки эффективности алгоритма моделировались случайные погрешности измерений дальности, скорости и курса с СКО $\sigma_\delta = 5$ м, $\sigma_v = 10$ м, $\sigma_{\Delta c} = 3$ м/с, $\sigma_{\Delta V} = 0.1$ м/с, $\sigma_{\Delta K} = 5^\circ$, $\sigma_{\Delta U} = 0.25$ м/с и интервалами корреляции $\tau_{\Delta U} = \tau_{\Delta K} = 3600$ с. Решение проводилось при прямолинейном движении АНПА со скоростью 5 м/с при фиксированном местоположении маяков (рис. 2). Дискретность поступления измерений 1 с. Предельная дальность, на которой от маяков поступают измерения, принята равной 1 км. До момента $i=0$ измерения сохранялись на таком же интервале в 150 секунд.

По 1000 реализациям погрешностей моделировались три алгоритма: 1) алгоритм без учета сохраненных измерений, 2) алгоритм со сглаживанием в фиксированной точке, рассмотренный в [10, 14], 3) предложенный алгоритм, в котором параллельно с обработкой каждого текущего измерения предусматривается обработка одного сохраненного измерения. Графики действительных (полученных по реализациям ошибок оценок) среднеквадратических погрешностей (СКП) [13] приведены на рис. 3 в сопровождении количества используемых маяков. Из графиков видно, что предложенный алгоритм не уступает по точности алгоритму со сглаживанием в фиксированной точке при том, что первый может быть реализован с темпом поступления Y_i . Алгоритмы со сглаживанием имеют преимущество на протяжении 150 секунд, перед алгоритмом, обрабатывающим только измерения для $i \geq 0$. Для предложенного алгоритма разность действительных и расчетных (полученные по реализациям ковариационных матриц, вырабатываемых алгоритмом) СКП составляет порядка 0.5 м.

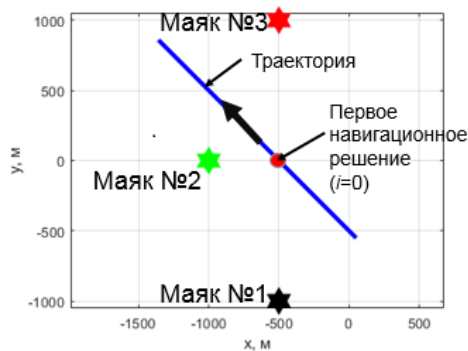


Рис. 2. Траектория движения АНПА и расположение маяков.

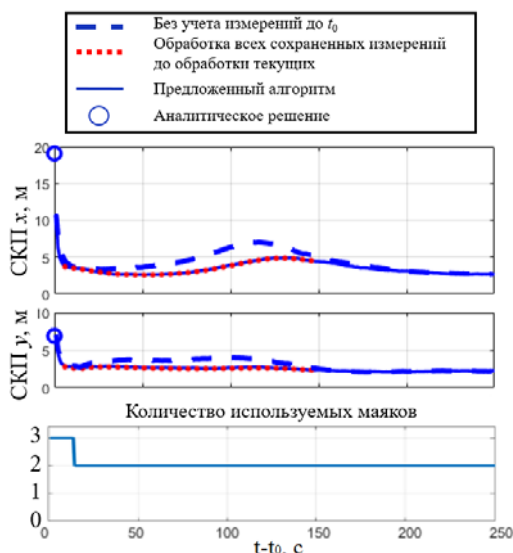


Рис. 3. Результаты моделирования алгоритмов

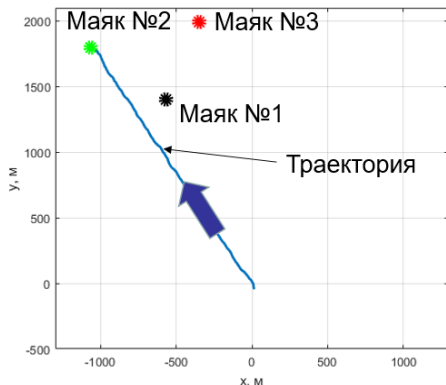


Рис. 4. Траектория движения АНПА и расположение маяков при проведении натуральных испытаний

Результаты обработки натуральных данных. При проведении натуральных испытаний был использован катер с приемником спутниковых навигационных систем (СНС) и буксируемый подводный аппарат с гидроакустической системой (рис. 4). На полигоне размещались три гидроакустических маяка. Эталонные координаты буксируемого аппарата рассчитаны на основе координат от СНС-приемника и известной длины кабель-троса. Для счисления использованы скорости от СНС-приемника и поэтому ошибки курса и течений отсутствуют и в задаче не оцениваются. Для ошибок измерений дальности и скорости заданы СКО $\sigma_\delta = 5$ м, $\sigma_v = 7$ м, $\sigma_{\Delta c} = 3$ м/с, $\sigma_{\Delta V} = 0.1$ м/с.

Из рисунка 5 видно, что предложенный рекуррентный алгоритм с фиктивными измерениями имеет такую же точность, что и алгоритм со сглаживанием в фиксированной точке. Расчетная СКП предложенного алгоритма, как и при моделировании, адекватно передает реальный уровень погрешности.

Заключение. Разработан пригодный для реализации в реальном времени рекуррентный алгоритм решения задачи определения координат движущегося АНПА с использованием измерений дальностей до гидроакустических маяков, относительного лага и курсоуказателя, который не требует априорных координат АНПА и определенного количества одновременно используемых маяков, за исключением момента запуска. Для запуска алгоритма требуются одномоментные измерения от трех или более маяков. Начальная точка линеаризации измерений определяется аналитическим способом без учета погрешностей измерений. Текущие и сохраненные до запуска алгоритма измерения обрабатываются параллельно с помощью двух фильтров, результаты которых объединяются на основе метода фиктивных измерений. Показано, что предложенный алгоритм практически не проигрывает в точности алгоритму, в котором перед обработкой текущих измерений обрабатываются все сохраненные измерения.

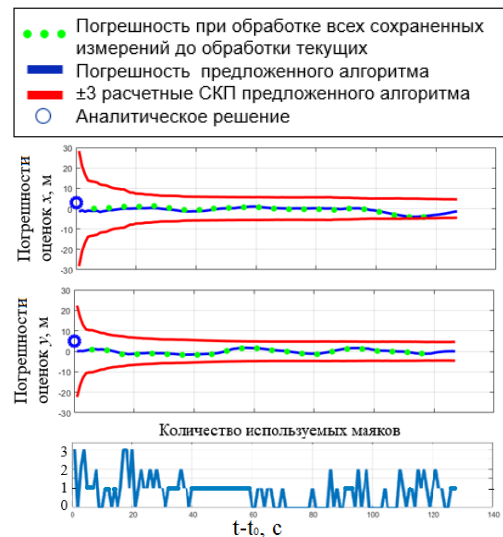


Рис. 5 Результаты апробации алгоритмов по натурным данным

ЛИТЕРАТУРА

1. Paull, L., Saeedi, S., Seto M., Li H., AUV Navigation and Localization: A Review, IEEE Journal of oceanic engineering, 2014, vol. 39, no. 1, pp. 131–149.
2. Кебкал К.Г., Машошин А.И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гироскопия и навигация. 2016. №3. С. 115–130.
3. Ю.В. Матвиенко, А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, А.Ф. Щербатюк. Перспективы повышения эффективности автономных подводных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2016. С. 123-141
4. Степанов О.А. Методы обработки навигационной измерительной информации. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 196 с.
5. Д. А. Кошаев. Многоальтернативный алгоритм одномаяковой навигации автономного необитаемого подводного аппарата без априорных данных о его местоположении. Часть 1. Математическое описание // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 109-130.
6. Д. А. Кошаев. Относительное позиционирование и определение ориентации автономного необитаемого подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков. // Гироскопия и навигация. 2022. №4. С. 122-141.
7. Машошин А. И., Пашкевич И. В. Алгоритмы позиционирования автономного необитаемого подводного аппарата в процессе приведения и причаливания к подводному причальному устройству // Гироскопия и навигация. Том 31. №1 (120), 2023. С. 103-119.
8. Грузликов А.М., Караулов В.Г., Мухин Д.А., Шалаев Н.А. Результаты апробации алгоритма позиционирования и определения ориентации подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Известия Южного федерального университета. Технические науки. Раздел 4. Связь, навигация и наведение, 2023. С. 265-274.
9. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия. 1977, с. 440.
10. Богомолов В.В. Оценка эффективности нелинейных навигационных решений по разномоментным измерениям дальности до гидроакустических маяков. // Материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием. Санкт-Петербург, 2022. С. 120-123.
11. Богомолов В.В. Анализ эффективности нелинейных решений задачи навигации подводных аппаратов. // Материалы XXIII конференции молодых ученых с международным участием. Санкт-Петербург, 2021. С. 223-227.
12. Д. А. Кошаев. Метод фиктивных измерений для многоальтернативного оценивания процессов в линейной стохастической системе // Автомат. и телемех., 2016. №6. С. 81-108.
13. Степанов О.А. Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. Санкт-Петербург, 2003.

14. **Богомолов В.В., Кошаев Д.А.** Алгоритм позиционирования подводного аппарата по измерениям дальности до маяков при их недостаточном для одномоментного навигационного решения количестве. // Материалы XXXIII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. Санкт-Петербург, 2022. С. 66-69.

V. V. Bogomolov (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg). **AUV positioning by the ranges to acoustic beacons and updating the results using the data precedent to the first navigation solution**

Abstract. A recursive algorithm has been developed for determining the coordinates of an autonomous underwater vehicle (AUV), using the measurements of ranges to acoustic beacons with log and heading indicator aiding in the absence of a priori coordinates of the AUV. The algorithm starts when the measurements are first received from at least three beacons simultaneously. The initial point of linearization is obtained using an approximate analytical method. The algorithm uses two filters: one for processing the measurements saved before the algorithm is run, and the other one for processing the real-time measurements. The outputs of two filters are fused. The results of simulation and field data processing are shown to confirm the efficiency of the developed algorithm.

УДК 681.51

А.М. ИСАЕВ¹, В.В. БОГОМОЛОВ²
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург)

РЕКУРРЕНТНЫЕ ИТЕРАЦИОННЫЕ АЛГОРИТМЫ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЕ РАЗЛОЖЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ В РЯД ТЕЙЛОРА

Рассмотрены рекуррентные итерационные алгоритмы, при построении которых используется представление нелинейных функций в виде разложения в ряд Тейлора. На примере решения задачи навигации по гидроакустическим маякам проведено их сопоставление с обобщённым фильтром Калмана, полиномиальным фильтром второго порядка и оптимальным алгоритмом.

Введение. При решении прикладных задач обработки измерительной информации широкое применение получили рекуррентные алгоритмы, опирающиеся на стохастический байесовский подход [1–10]. В линейном гауссовском случае для этих целей широко применяется фильтр Калмана [1, 7, 10]. Однако при решении нелинейных задач, значительная часть которых связана с навигационными приложениями [5, 6, 11–12], нахождение оптимальной оценки связано с вычислением многомерных интегралов, что в режиме реального времени при современном уровне вычислительной техники зачастую трудновыполнимо. В этом случае используют субоптимальные алгоритмы, вырабатывающие оценку нередко по точности, близкую к оптимальной, но не требующие при этом значительного объема вычислений. Наиболее распространённый из таких алгоритмов – обобщённый фильтр Калмана (Extended Kalman Filter - EKF) [5, 6, 7, 10] относится к так называемым алгоритмам калмановского типа (АКТ) [6, 10, 13–15], апостериорная плотность в которых на каждом шаге заменяется её гауссовской аппроксимацией, а структура схожа с фильтром Калмана. Основная идея EKF заключается в сведении исходной задачи к линейной путём разложения нелинейных функций в ряд Тейлора в точке, соответствующей прогнозу, с точностью до членов первого порядка. При этом могут появляться существенные погрешности, вызванные такой линеаризацией. Один из возможных путей их уменьшения – учёт в разложении Тейлора большего числа членов ряда при построении субоптимального алгоритма. С использованием такой идеи были синтезированы различные модификации фильтров второго порядка [7, 10, 14], а также фильтры третьего и более высоких порядков [8, 15]. Другой возможный путь заключается в применении при построении субоптимального алгоритма различных итерационных процедур [2, 4, 6, 7, 10, 13, 16], суть которых заключается в уточнении точек линеаризации, в окрестности которых нелинейные функции раскладываются в ряд. В докладе рассматривается наиболее простая и получившая наибольшее распространение схема, в которой на каждом шаге алгоритма текущее измерение обрабатывается итерационно для уточнения точки линеаризации уравнений измерений. Субоптимальный алгоритм, представляющий собой комбинацию такой процедуры и EKF, известен в литературе как обобщённый итерационный фильтр Калмана (Iterated Extended Kalman Filter – IEKF) или фильтр с локальными итерациями [2, 4, 6, 7, 10, 13].

Цель настоящей работы – рассмотреть рекуррентные итерационные алгоритмы, использующие разложение в ряд Тейлора. При этом помимо хорошо известного IEKF в комбинации с итерационной схемой рассматривается также полиномиальный фильтр второго порядка (Second Order Polynomial Filter - SOPF), подробно описанный в работе [14]. Разработанный таким образом алгоритм далее будем называть итерационным полиномиальным фильтром второго порядка (Iterated Second Order Polynomial Filter - ISOPF).

Постановка исследуемой задачи нелинейной фильтрации и её оптимальное решение. В работе рассматривается дискретная задача нелинейной фильтрации [14] для n -мерного вектора x_k , описываемого с помощью формирующего фильтра

Научные руководители: член-корр. РАН, д.т.н., проф. Степанов О.А., к.т.н., доцент Литвиненко Ю.А.
Научный руководитель: д.т.н. Кошаев Д.А.

$$x_k = f(x_{k-1}) + \Gamma_k w_k + u_k, \quad x_0 \in N(x_0; \bar{x}_0, P_0) \quad (1)$$

по m -мерным нелинейным измерениям

$$y_k = h(x_k) + v_k. \quad (2)$$

В соотношениях, приведённых выше, k - индекс дискретного времени, $f(x_{k-1}), h(x_k)$ - известные нелинейные вектор-функции, Γ_k - известная матрица размерности $n \times n$, u_k - известный n -мерный вектор входных сигналов, \bar{x}_0 и P_0 - априорные математическое ожидание и ковариационная матрица вектора x_0 , а w_k, v_k - независимые друг от друга и от x_0 центрированные дискретные n - и m -мерные гауссовские шумы с ковариационными матрицами Q_k и R_k соответственно.

Известно, что оптимальная в среднеквадратическом смысле оценка $\hat{x}_k^{opt}(Y_k)$ и условная матрица ковариаций $P_k^{opt}(Y_k)$ определяются в виде [5, 6, 7, 10]:

$$\hat{x}_k^{opt}(Y_k) = \int x_k p(x_k / Y_k) dx_k, \quad P_k^{opt}(Y_k) = \int (x_k - \hat{x}_k^{opt}(Y_k))(x_k - \hat{x}_k^{opt}(Y_k))^T p(x_k / Y_k) dx_k, \quad (3)$$

где $p(x_k / Y_k)$ – апостериорная (условная) к вектору измерений $Y_k = (y_1^T, \dots, y_k^T)^T$ функция плотности распределения вероятности (далее просто АП). Как уже было сказано во введении, реализовать оптимальный алгоритм, позволяющий в режиме реального времени вычислять оценки (3), в большинстве случаев не удаётся и при решении прикладных задач обработки измерительной информации применяются различные субоптимальные алгоритмы, о которых далее и пойдёт речь.

Обобщённый фильтр Калмана и полиномиальный фильтр второго порядка. Как отмечается в [14], обобщённый фильтр Калмана и полиномиальный фильтр второго порядка имеют структуру, схожую с фильтром Калмана и включающую два блока: блок прогноза и блок коррекции. Оба они используют предположение о гауссовском характере апостериорной плотности на каждом шаге, а текущее измерение обрабатывается исходя из идеологии построения линейного оптимального алгоритма [6, 14, 17, 18]. Суть этой процедуры подробно описана в [14]. При этом искомая оценка вычисляется с использованием линейного относительно текущего измерения выражения:

$$\hat{x}_k(Y_k) = \hat{x}_{k/k-1} + K_k (y_k - \hat{y}_k), \quad K_k = P_{x_k y_k} (P_{y_k})^{-1}, \quad (4)$$

а соответствующая ей расчётная характеристика точности определяется как

$$P_k = P_{k/k-1} - K_k (P_{x_k y_k})^T \quad (5)$$

Для нахождения оценки $\hat{x}_k(Y_k)$ необходимо вычислять моменты $\hat{x}_{k/k-1}, \hat{y}_k, P_{k/k-1}, P_{y_k}, P_{x_k y_k}$, выражения для которых приведены ниже.

$$\hat{x}_{k/k-1} = \int f_k(x_{k-1}) p(x_{k-1} / Y_{k-1}) dx_{k-1}, \quad (6)$$

$$P_{k/k-1} = \int (x_k - \hat{x}_{k/k-1})(x_k - \hat{x}_{k/k-1})^T p(x_k / Y_{k-1}) dx_k, \quad (7)$$

$$\hat{y}_k = \int h_k(x_k) p(x_k / Y_{k-1}) dx_k, \quad (8)$$

$$P_{y_k} = \int (h_k(x_k) - \hat{y}_k)(h_k(x_k) - \hat{y}_k)^T p(x_k / Y_{k-1}) dx_k + R_k \quad (9)$$

$$P_{x_k y_k} = \int (x_k - \hat{x}_{k/k-1})(h_k(x_k) - \hat{y}_k)^T p(x_k / Y_{k-1}) dx_k. \quad (10)$$

В EKF и SOPF исходные нелинейные функции заменяются их приближённым представлением, полученным путём разложения $f_k(x_{k-1})$ и $h_k(x_k)$ в ряд Тейлора в малой окрестности точек линеаризации x_{n1} , x_{n2} , в качестве которых на каждом текущем шаге используется оценка вектора состояния с предыдущего шага \hat{x}_{k-1}^μ и её прогнозное значение $\hat{x}_{k/k-1}^\mu$, $\mu = EKF, SOPF$.

$$f_k(x_{k-1}) \approx f_k(x_{n1}) + f'_k(x_{n1})(x_{k-1} - x_{n1}) + \frac{1}{2}(I_n \otimes (x_{k-1} - x_{n1})^T) f''_k(x_{n1})(x_{k-1} - x_{n1}), \quad (11)$$

$$h_k(x_k) \approx h_k(x_{n2}) + h'_k(x_{n2})(x_k - x_{n2}) + \frac{1}{2}(I_m \otimes (x_k - x_{n2})^T) h''_k(x_{n2})(x_k - x_{n2}), \quad (12)$$

где \otimes - символ произведения Кронекера, I_n , I_m - единичные матрицы размерности n и m , а $f''_k(x_{n1})$ и $h''_k(x_{n2})$ - матрицы Гессе размерностей $n^2 \times n$ и $mn \times n$, определяющиеся как [14]:

$$f''_k(x_{n1}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f_{1,k}(x_{k-1})}{\partial x_{1,k-1} \partial x_{1,k-1}} & \dots & \frac{\partial^2 f_{1,k}(x_{k-1})}{\partial x_{1,k-1} \partial x_{n,k-1}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 f_{n,k}(x_{k-1})}{\partial x_{n,k-1} \partial x_{1,k-1}} & \dots & \frac{\partial^2 f_{n,k}(x_{k-1})}{\partial x_{n,k-1} \partial x_{n,k-1}} \end{bmatrix}_{x_{k-1}=x_{n1}}, \quad h''_k(x_{n2}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 h_{1,k}(x_k)}{\partial x_{1,k} \partial x_{1,k}} & \dots & \frac{\partial^2 h_{1,k}(x_k)}{\partial x_{1,k} \partial x_{n,k}} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial^2 h_{m,k}(x_k)}{\partial x_{n,k} \partial x_{1,k}} & \dots & \frac{\partial^2 h_{m,k}(x_k)}{\partial x_{n,k} \partial x_{n,k}} \end{bmatrix}_{x_k=x_{n2}}$$

При этом EKF в выражениях (11), (12) учитывает слагаемые лишь первого порядка, а SOPF – как первого, так и второго.

Выражения для расчёта искомых моментов в EKF и SOPF получаются путём подстановки выражений (11-12) в (4-10) и использования формулы для чётных моментов гауссовых случайных величин [10] и того факта, что нечётные центральные моменты равны нулю. Найти их можно, например, в работе [14].

Итерационная схема обработки измерений. Рассматриваемая итерационная схема основана на простой идее [6]: если точность оценки \hat{x}_k , полученной после обработки текущего измерения, повышается по сравнению с прогнозом $\hat{x}_{k/k-1}$, то при выборе в (12) в качестве точки линеаризации $x_{n2} = \hat{x}_k$ следует ожидать, что точность приближения нелинейной функции $h(x_k)$ также повысится.

Итерационные алгоритмы. Так как рассматриваемая итерационная схема подразумевает уточнение лишь точки линеаризации уравнения (12), то выражения для расчёта моментов $\hat{x}_{k/k-1}$, $P_{k/k-1}$ в IEKF и ISOPF совпадут с аналогичными для EKF и SOPF. Подставляя (12), в котором $x_{n2} = \hat{x}_k^\gamma$, а γ - номер итерации, в (8-10) и действуя так же, как и при получении выражений для EKF и SOPF, можно получить следующие уравнения для расчёта \hat{y}_k , P_{y_k} , $P_{x_k y_k}$:

$$\hat{y}_k^{\mu(\gamma)} = \begin{cases} h_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}) + h'_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)})(\hat{x}_{k/k-1}^\mu - \hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}), & \mu = IEKF, \\ h_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}) + h'_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)})(\hat{x}_{k/k-1}^\mu - \hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}) + d_k^h + \\ + \frac{1}{2}(I_m \otimes (\hat{x}_{k/k-1}^\mu - \hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)})^T) h''_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)})(\hat{x}_{k/k-1}^\mu - \hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}), & \mu = ISOPF, \end{cases} \quad (13)$$

$$P_{y_k}^{\mu(\gamma)} = \begin{cases} h'_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}) P_{k/k-1}^\mu (h'_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}))^T + R_k, & \mu = IEKF, \\ H_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}) P_{k/k-1}^\mu (H_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}))^T + R_k + D_k^h, & \mu = ISOPF, \end{cases} \quad (14)$$

где $H_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}) = h'_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}) + \left(I_m \otimes (\hat{x}_{k/k-1}^\mu - \hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)})^T \right) h''_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)})$.

$$P_{x_k, y_k}^{\mu(\gamma)} = \begin{cases} P_{k/k-1}^\mu \left(h'_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}) \right)^T, & \mu = IEKF, \\ P_{k/k-1}^\mu \left(H_k(\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}) \right)^T, & \mu = ISOPF, \end{cases} \quad (15)$$

Выражения для расчёта d_k^h и D_k^h приведены в [14]. На первой итерации $\hat{x}_k^{\mu(0)} = \hat{x}_{k/k-1}^\mu$. Не сложно заметить, что в таком случае выражения (13-15) совпадут с выражениями для EKF и SOPF. После обработки текущего измерения с использованием (4) полученная на текущей итерации оценка используется в (13-15), после чего измерение обрабатывается вновь. Итерации проводят до тех пор, пока отличия $\hat{x}_k^{\mu(\gamma)}$ от $\hat{x}_k^{\mu(\gamma-1)}$ не будут незначительными. В качестве оценки на выходе алгоритма принимают значение, полученное на последней итерации, а соответствующая ей расчётная характеристика точности в виде матрицы ковариаций погрешностей оценивания вычисляется согласно (5). Следует отметить тот факт, что алгоритм вычисления оценки, вырабатываемой в итерационных алгоритмах, в отличие от EKF и SOPF, становится нелинейным относительно текущего измерения. Также, анализируя выражения (13-15), не сложно заметить, что выражения для ISOPF могут быть получены путём добавления в выражения для IEKF дополнительных слагаемых. Таким образом, при равном числе итераций объём вычислений в ISOPF будет выше, чем в IEKF.

Задача навигации по гидроакустическим маякам. Морской подвижный объект (МПО) движется в локальной прямоугольной декартовой системе координат Ox_1x_2 , расположенной в плоскости горизонта. Оси x_1 и x_2 направлены направо и вверх соответственно. Счисление пути МПО осуществляется по показаниям компаса (измерителя курса) и однокомпонентного относительного лага (измерителя продольной скорости относительно воды). При этом три гидроакустических маяка, координаты которых предполагаются известными, излучают сигналы с частотой 1 Гц. Считается, что часы маяков и МПО синхронизированы между собой. Используя информацию о скорости распространения сигналов, которая также предполагается известной, в дискретные моменты времени рассчитываются дальности $y_{1,k}, y_{2,k}, y_{3,k}$ до маяков.

Движение МПО можно описать как:

$$x_{1,k}^{МПО} = x_{1,k-1}^{МПО} + V_{k-1} \sin(K_{k-1}) \Delta t, \quad x_{2,k}^{МПО} = x_{2,k-1}^{МПО} + V_{k-1} \cos(K_{k-1}) \Delta t. \quad (16)$$

где $x_{1,k}^{МПО}, x_{2,k}^{МПО}$ – истинные координаты объекта, V_k – его скорость в продольном направлении (при этом для простоты считается, что скорость в поперечном направлении равна нулю), K_k – его курс, а Δt – интервал дискретизации. Величины V_k и K_k измеряются с ошибками и их можно представить как:

$$V_k = \tilde{V}_k - \Delta V_k, \quad K_k = \tilde{K}_k - \Delta K_k, \quad (17)$$

где \tilde{V}_k, \tilde{K}_k – измеренные значения, $\Delta V_k, \Delta K_k$ – погрешности измерения, которые для небольших интервалов времени могут быть описаны случайными гауссовскими центрированными константами с дисперсиями σ_V^2 и σ_K^2 соответственно. Отметим, что погрешности измерения скорости относительным лагом в основном обусловлены незнанием скорости течения, которая может быть описана марковским процессом первого порядка. В случае, когда интервал корреляции такого процесса много больше времени решения задачи оценивания, справедливо допущение о константном характере ошибок относительного лага. Анализируя погрешности компаса можно сделать аналогичные выводы о характере его ошибок на небольших интервалах времени. Считая ΔK малым углом, сделаем следующие допущения, что $\sin(\Delta K_k) \cong \Delta K_k$, а $\cos(\Delta K_k) \cong 1$. Подставляя (17) в (16) и вводя вектор состояния:

$$x_k = \left| x_{1,k}^{МПО} \ x_{2,k}^{МПО} \ \Delta V_k \ \Delta K_k \right|^T, \quad (18)$$

исходную модель несложно привести к виду

$$x_k = f_k(x_{k-1}) + u_k, \quad (19)$$

где матрица $f_k(x_{k-1})$ и вектор u_k будут иметь вид:

$$f_k(x_{k-1}) = \begin{pmatrix} x_{1,k-1}^{МПО} - \tilde{V}_{k-1} \Delta t \cos(\tilde{K}_{k-1}) \Delta K_{k-1} - \sin(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t \Delta V_{k-1} \\ x_{2,k-1}^{МПО} + \tilde{V}_{k-1} \Delta t \sin(\tilde{K}_{k-1}) \Delta K_{k-1} - \cos(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t \Delta V_{k-1} \\ \Delta V_{k-1} \\ \Delta K_{k-1} \end{pmatrix}, \quad (20)$$

$$u_k = \left| \tilde{V}_{1,k-1} \sin(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t \ \tilde{V}_{1,k-1} \cos(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t \ 0 \ 0 \right|^T.$$

Отметим, что при формировании матрицы (20) не учитывались слагаемые второго порядка малости $\cos(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t \Delta K_{k-1} \Delta V_{k-1}$ и $-\sin(\tilde{K}_{k-1}) \Delta t \Delta K_{k-1} \Delta V_{k-1}$.

Считая, что глубина гидроакустических маяков совпадает с глубиной МПО, измерения дальности до маяков можно представить в виде:

$$y_{i,k} = \sqrt{(x_{1,k-1}^{МПО} - x_1^{im})^2 + (x_{2,k-1}^{МПО} - x_2^{im})^2} + v_{i,k}, \quad i = \overline{1..3} \quad (21)$$

где x_1^{im}, x_2^{im} $i = \overline{1..3}$ – известные координаты маяков, $v_{i,k}$ – погрешности измерений, представляющие собой дискретные гауссовские центрированные белые шумы с дисперсиями $(\sigma_y)^2$.

Вводя вектор

$$Y_k = \left| y_{1k} \ y_{2k} \ y_{3k} \right|^T, \quad (22)$$

измерения можно записать в виде:

$$Y_k = h(X_k) + v_k, \quad (23)$$

Таким образом, рассматриваемая задача заключается в оценке вектора (18), описываемого при помощи формирующего фильтра (19), по нелинейным измерениям (23). При её решении используются описанные выше субоптимальные алгоритмы: EKF, IEKF, SOPF, ISOPF. Также, помимо перечисленных выше субоптимальных алгоритмов, был реализован нелинейный оптимальный алгоритм на основе метода Монте-Карло.

Результаты моделирования. При моделировании использовались следующие параметры: известные координаты маяков $x_1^{1m} = -960$ м., $x_2^{1m} = 250$ м., $x_1^{2m} = -1000$ м., $x_2^{2m} = 0$ м., $x_1^{3m} = -960$ м., $x_2^{3m} = -250$ м., начальные координаты МПО $x_{1,0}^{МПО} = x_{2,0}^{МПО} = 0$, угол курса $K = 5^\circ$, продольная скорость $V = 3$ м/с, время моделирования $t = 100$ с., шаг дискретизации $\Delta t = 1$ с. В алгоритмах оценивания использовались

$$x_0 = \begin{pmatrix} \tilde{x}_{1,0} \\ \tilde{x}_{2,0} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad P_0 = \begin{pmatrix} (\sigma_x)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_x)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_{\Delta V})^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (\sigma_{\Delta K})^2 \end{pmatrix}, \quad R = \begin{pmatrix} (\sigma_Y)^2 & 0 & 0 \\ 0 & (\sigma_Y)^2 & 0 \\ 0 & 0 & (\sigma_Y)^2 \end{pmatrix},$$

где $\tilde{x}_{1,0}, \tilde{x}_{2,0}$ – априорные координаты, полученные путём моделирования согласно $\tilde{x}_{i,0} \in N(\tilde{x}_{i,0}; x_{i,0}^{МПО}, (\sigma_x)^2), i=1,2, \sigma_x = 200 \text{ м.}, \sigma_{\Delta K} = 0,5^\circ, \sigma_{\Delta V} = 0,1 \text{ м/с.}, \sigma_Y = 15 \text{ м.}$ При построении итерационных алгоритмов количество итераций $N = 3$. Расчёт действительной и расчётной матриц ковариаций при помощи моделирования проводился по $L = 2000$ реализациям. Ниже представлены результаты моделирования. На всех графиках синий цвет соответствует ЕKF, чёрный – SOPF, фиолетовый – IEKF, оранжевый – ISOPF, а красный – оптимальному алгоритму – OPT. Для графиков СКП сплошные линии соответствуют действительным характеристикам точности $\sqrt{G_k^\mu}$, полученным при помощи метода статистических испытаний, а пунктирные – расчётным $\sqrt{\tilde{G}_k^\mu}$, где $\mu = EKF, IEKF, SOPF, ISOPF$. Результаты моделирования для погрешности оценивания $x_{1,k}^{МПО}$ аналогичны представленным для $x_{2,k}^{МПО}$ и не приводятся. По той же причине не приводятся результаты оценивания ΔK .

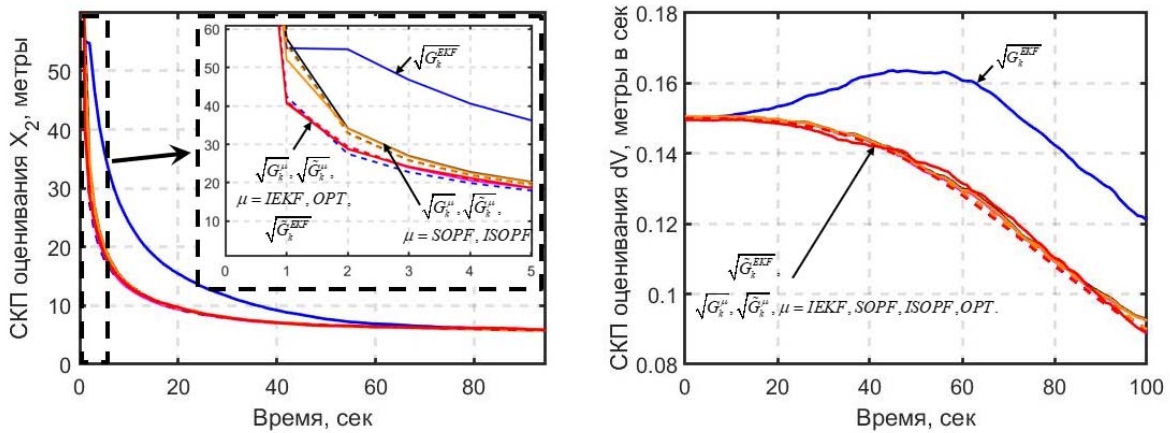


Рис. 1. Действительные и расчётные СКП оценивания $x_{2,k}^{МПО}$ (слева) и ΔV_k (справа).

Результаты проведенного моделирования показали, что точности IEKF, SOPF и ISOPF на момент окончания обсервации близки к точности оптимального алгоритма. При этом все рассматриваемые фильтры за исключением ЕKF являются состоятельными, т.е. вырабатываемая в них расчётная характеристика точности совпадает с действительной.

Заключение.

1. Исходя из идеологии построения линейного оптимального алгоритма получены выражения для итерационного полиномиального фильтра второго порядка (ISOPF).
2. При решении задачи навигации по гидроакустическим маякам точности IEKF и ISOPF сопоставимы и близки к точности оптимального алгоритма на момент окончания обсервации. Оба итерационных алгоритма являются состоятельными и при этом при одинаковом числе итераций IEKF требует меньшего объема вычислений. Точность обычного полиномиального фильтра второго порядка также незначительно отличается от точности оптимального алгоритма.

3. Применение итерационной схемы позволило существенно повысить точность обобщенного фильтра Калмана. Аналогичный эффект от ее применения в полиномиальном фильтре второго порядка хотя и присутствует, однако выражен в меньшей степени.
4. Наименее эффективным среди рассматриваемых субоптимальных алгоритмов оказался обобщенный фильтр Калмана. При этом вырабатываемая в нем расчетная характеристика точности заметно отличается от действительной.
5. IEKF на первых шагах решения рассматриваемой задачи навигации по гидроакустическим маякам оказался точнее чем SOPF и ISOPF. Выявление причин этих отличий и их закономерность требуют дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kalman R.E.** A new approach to linear filtering and prediction problems // Trans. ASME. Series D, J. Basic Engineering. 1960. V. 82. N. 1. P. 35-45.
2. **A. H. Jazwinski** Stochastic process and filtering theory. New York: Academic Press, 1970.
3. **Gelb, A.**, Applied Optimal Estimation. M.I.T. Press, Cambridge, 1974.
4. **Дмитриев С.П., Шимелевич Л.И.** Нелинейные задачи обработки навигационной информации. Л.: ЦНИИ «Румб», 1977. 87 с.
5. **Bar-Shalom Y., Li X.R., and Kirubarajan T.** Estimation with Applications to Tracking and Navigation: Theory Algorithms and Software // New York, NY: John Wiley & Sons, Inc. – 2001
6. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. Издание 3-е. – СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2003. – 370 с.
7. **Simon, D.** Optimal State Estimation. Kalman, H_∞ , and Nonlinear approaches/ D. Simon. – A John Wiley & Song Inc. – 2006. – 550 p
8. **Basin M.** New Trends in Optimal Filtering and Control for Polynomial and Time-Delay Systems. // Springer. 2008. 232 p.
9. **Särkkä S.** Bayesian Filtering and Smoothing. Cambridge University Press, 2013.
10. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации / изд. 3-е, исправленное и дополненное. Ч. 1. Введение в теорию оценивания, СПб.:ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 509 с.
11. **Дмитриев С.П.** Высоточная морская навигация, СПб.:Судостроение , 1991.: 223 с.
12. **Dunik J., Biswas S.K., Dempster A.G., Pany T., Closas, P.** State Estimation Methods in Navigation: Overview and Application // IEEE A&E Systems Magazine. 2020. V. 12. N. 35. P. 16–31.
13. **Тупышев В.А., Литвиненко Ю.А., Исаев А.М.** Применение фильтров калмановского типа для обработки навигационной информации при нелинейности в уравнениях динамики и измерений// XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов. с. 360-363. 2020.
14. **Степанов О.А., Литвиненко Ю.А., Васильев В.А., Торопов А.Б., Басин М.В.** Алгоритм полиномиальной фильтрации в задачах обработки навигационной информации при квадратичных нелинейностях в уравнениях динамики и измерений. Часть I. Описание и сопоставление с алгоритмами калмановского типа // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. №3 (114). С. 3-33. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.0068>
15. **Степанов О.А., Литвиненко Ю.А., Исаев А.М.** Полиномиальный фильтр третьего порядка в задаче оценивания скалярного марковского процесса по нелинейным измерениям // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2022. №4.
16. **В. В. Богомолов** Оценка эффективности нелинейных навигационных решений по разномоментным измерениям дальности до гидроакустических маяков. Сборник работ XXIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» СПб.: ЦНИИ “Электроприбор”, 2022.
17. **Zhankue Zhao, Rong, X., Li, V., Jilkov, P.** Best Linear Unbiased Filtering with Nonlinear Measurements for Target Tracking, IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 2004, vol. 40, no. 4, pp. 1324–1336.
18. **Степанов О.А.** Линейный оптимальный алгоритм в нелинейных задачах обработки навигационной информации // Гироскопия и навигация. 2006. № 4 (55). С. 11–20.

A.M.Isaev, V.V.Bogomolov (Concern CSRI Elektroprigor, JSC, Saint Petersburg, Russia). **Recurrent iterative algorithms using nonlinear functions decomposition into a Taylor-series expansion.**

Abstract. The construction features of recurrent iterative algorithms using first- and second-order terms into a Taylor-series expansion are considered. By the example of solving the navigation problem using the distances to beacons, their effectiveness is compared with the extended Kalman filter, a second-order polynomial filter and an optimal algorithm.

УДК 681.51

М.Н. МИХАЙЛОВ, В.П. ЗОЛОТАРЕВИЧ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА КАЛМАНОВСКОГО ТИПА С ПРИМЕНЕНИЕМ РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ЗАДАЧ ФИЛЬТРАЦИИ

Разработан алгоритм калмановского типа, использующий рекуррентную нейронную сеть для предсказания коэффициента усиления. Предложенный алгоритм был применен для решения задачи коррекции навигационной системы судна по нелинейным измерениям дальности до маяков-ответчиков. Эффективность алгоритма сравнивается с результатами, полученными с помощью традиционных алгоритмов.

Введение. Оценка состояния динамических систем является фундаментальной задачей в обработке сигналов. Для систем с уравнениями динамики и наблюдения, линейно зависящими от вектора состояния, фильтр Калмана (ФК) [1] является оптимальным алгоритмом в среднеквадратическом смысле в случае гауссовского характера ошибок измерений и уравнений динамики системы. В случае нелинейной динамики и (или) измерений используется теория нелинейной фильтрации, в рамках которой разрабатываются субоптимальные алгоритмы, такие как обобщенный ФК, полиномиальный ФК [2] и ансцентный (unscented) ФК [3]. Предлагаемый доклад посвящен разработке модификаций субоптимального алгоритма фильтрации калмановского типа, в котором используется рекуррентная нейронная сеть для определения матрицы коэффициента усиления алгоритма ФК.

Постановка задачи. Рассмотрим движение морского подвижного объекта в локальной прямоугольной декартовой системе координат, расположенной в плоскости горизонта. Счисление пути осуществляется по показаниям датчика курса $\tilde{\theta}_k$ и двухкомпонентного лага, измеряющего продольную ($\tilde{V}_{1,k}$) и поперечную составляющие скорости ($\tilde{V}_{2,k}$).

По этим измерениям, в случае постоянного курса объекта ($\tilde{\theta}_{k+1} = \tilde{\theta}_k$), строится следующая система счисления:

$$\tilde{x}_{1,k} = \tilde{x}_{1,k-1} + \tilde{V}_{1,k-1} \sin(\tilde{\theta}_{k-1})\Delta t + \tilde{V}_{2,k-1} \cos(\tilde{\theta}_{k-1})\Delta t, \quad (1)$$

$$\tilde{x}_{2,k} = \tilde{x}_{2,k-1} + \tilde{V}_{1,k-1} \cos(\tilde{\theta}_{k-1})\Delta t - \tilde{V}_{2,k-1} \sin(\tilde{\theta}_{k-1})\Delta t, \quad (2)$$

где $\tilde{x}_{1,k}, \tilde{x}_{2,k}$ – показания системы счисления, Δt – шаг по времени. Аналогичные уравнения верны для истинных значений скорости V_1, V_2 , курса θ_k и координат $x_{1,k}, x_{2,k}$.

Система счисления корректируется измерениями дальностей $\tilde{y}_{1,k}, \tilde{y}_{2,k}, \tilde{y}_{3,k}$ до трёх маяков-ответчиков, координаты которых предполагаются известными и обозначаются как $\chi_{i,j}$, где $i = 1, 2$ – номер координаты, $j = 1, 2, 3$ – номер маяка-ответчика:

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_{1,k} \\ \tilde{y}_{2,k} \\ \tilde{y}_{3,k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_{1,k} - \chi_{1,1})^2 + (x_{2,k} - \chi_{2,1})^2} \\ \sqrt{(x_{1,k} - \chi_{1,2})^2 + (x_{2,k} - \chi_{2,2})^2} \\ \sqrt{(x_{1,k} - \chi_{1,3})^2 + (x_{2,k} - \chi_{2,3})^2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Будем считать, что ошибки измерителей скорости, курса и дальности до маяков-ответчиков являются нормальными центрированными случайными величинами. В этом случае для ошибок системы счисления $\delta x_{1,k}, \delta x_{2,k}$ и курса $\delta \theta_k$, с учетом их малости, получаем следующую систему линеаризованных уравнений:

$$\delta x_{1,k} = \delta x_{1,k-1} + (-\tilde{V}_{1,k-1} \cos \tilde{\theta}_{k-1} - \tilde{V}_{2,k-1} \sin \tilde{\theta}_{k-1}) \delta \theta_{k-1} \Delta t + w_{1,k} \quad (4)$$

$$\delta x_{2,k} = \delta x_{2,k-1} + (-\tilde{V}_{1,k-1} \sin \tilde{\theta}_{k-1} + \tilde{V}_{2,k-1} \cos \tilde{\theta}_{k-1}) \delta \theta_{k-1} \Delta t + w_{2,k} \quad (5)$$

$$\delta \theta_k = \delta \theta_{k-1}, \quad (6)$$

где $w_{1,k}, w_{2,k}$ — независимые между собой центрированные дискретные случайные последовательности с нормальным распределением $\mathcal{N}(w_{i,k}; 0, \sigma_V^2)$, σ_V^2 — дисперсия измерителя скорости, которая предполагается одинаковой для продольной и поперечной составляющих. Следует отметить, что при получении уравнений (6), предполагалось, что шумы $w_{1,k}, w_{2,k}$ — описывают ошибки измерений скоростей $\tilde{V}_{1,k}$ и $\tilde{V}_{2,k}$.

Введем вектор состояния $X_k = |\delta x_{1,k}, \delta x_{2,k}, \delta \theta_k|^T$, состоящий из ошибок системы счисления, и вектор шумов $W_k = |w_{1,k}, w_{2,k}, 0|^T$, тогда уравнения (4) – (6) можно записать в матричном виде:

$$X_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & (-\tilde{V}_{1,k-1} \cos \tilde{\theta}_{k-1} - \tilde{V}_{2,k-1} \sin \tilde{\theta}_{k-1}) \Delta t \\ 0 & 1 & (-\tilde{V}_{1,k-1} \sin \tilde{\theta}_{k-1} + \tilde{V}_{2,k-1} \cos \tilde{\theta}_{k-1}) \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} X_{k-1} + W_k = F_k X_{k-1} + W_k. \quad (7)$$

Традиционные алгоритмы. Сформулированную задачу предлагается решать с помощью двух вариантов обобщенного фильтра Калмана, которые отличаются выбором точки линеаризации. Матрицу измерений, используя (3), в точке линеаризации $[\delta x_1^l, \delta x_2^l]^T$ можно записать в виде:

$$H_k(\delta x_1^l, \delta x_2^l) = \begin{pmatrix} \frac{\tilde{x}_{1,k-1} - \delta x_1^l - \chi_{1,1}}{\rho_1} & \frac{\tilde{x}_{2,k-1} - \delta x_2^l - \chi_{2,1}}{\rho_1} & 0 \\ \frac{\tilde{x}_{1,k-1} - \delta x_1^l - \chi_{1,2}}{\rho_2} & \frac{\tilde{x}_{2,k-1} - \delta x_2^l - \chi_{2,2}}{\rho_2} & 0 \\ \frac{\tilde{x}_{1,k-1} - \delta x_1^l - \chi_{1,3}}{\rho_3} & \frac{\tilde{x}_{2,k-1} - \delta x_2^l - \chi_{2,3}}{\rho_3} & 0 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $\rho_i = \sqrt{(\tilde{x}_{1,k-1} - \delta x_1^l - \chi_{1,i})^2 + (\tilde{x}_{2,k-1} - \delta x_2^l - \chi_{2,i})^2}$ – расстояние до i -го маяка.

В случае первого варианта фильтра, точка линеаризации совпадала с оценкой на предыдущем шаге, а во втором варианте — в точке прогнозного значения оценки.

Алгоритм обобщенного фильтра Калмана можно представить в виде следующей последовательности вычислений [3]:

$$X_k^* = F_k X_{k-1}, \quad (9)$$

$$P_k^* = F_k P_{k-1} F_k^T + Q_k, \quad (10)$$

$$S_k = H_k P_k^* H_k^T + R_k, \quad (11)$$

$$K_k = P_k^* H_k^T S_k^{-1}, \quad (12)$$

$$X_k = X_k^* + K_k (y_k - H_k X_k^*) \quad (13)$$

$$P_k = (I - K_k H_k) P_k^*, \quad (14)$$

где Q_k – матрица ковариации вектора шумов системы W_k , R_k – матрица ковариации ошибок измерений дальности до маяков-ответчиков, K_k – коэффициент усиления фильтра, X_k^* – вектор прогноза, P_k^* – матрица ковариации вектора прогноза.

Алгоритм с применением рекуррентных нейронных сетей использует уравнения (9)–(11) и (13)–(14), а для вычисления матрицы коэффициента усиления K_k в выражении (13) нейронную сеть. Архитектура сети показана на рис. 1. На вход нейронной сети подаются текущие показания всех измерителей: дальности до маяков ответчиков, показания лага и курса. Выходом сети является коэффициент усиления алгоритма расширенного фильтра Калмана K_k . В качестве основного слоя нейронной сети используется LSTM (Long short-term memory) [4], что позволяет сохранять необходимую информацию с предыдущего шага времени. Кроме того, схожая архитектура была успешно использована в задачах фильтрации [5]. Нейронная сеть была обучена в режиме обучения с учителем, используя взвешенную сумму среднеквадратичной ошибки для координат и косинусного расстояния для курса в качестве критерия.

Результаты применения разработанных алгоритмов приведены на рис. 2, где показана ошибка в определении горизонтально координаты объекта. Из рисунка видно, что разработанный алгоритм с использованием нейронных сетей, продемонстрировал более высокую точность в сравнении с двумя вариантами традиционного алгоритма обобщенного фильтра Калмана. По-

лученный результат объясняется тем обстоятельством, что рассматриваемая задача является нелинейной, а используемые традиционные алгоритмы субоптимальными.

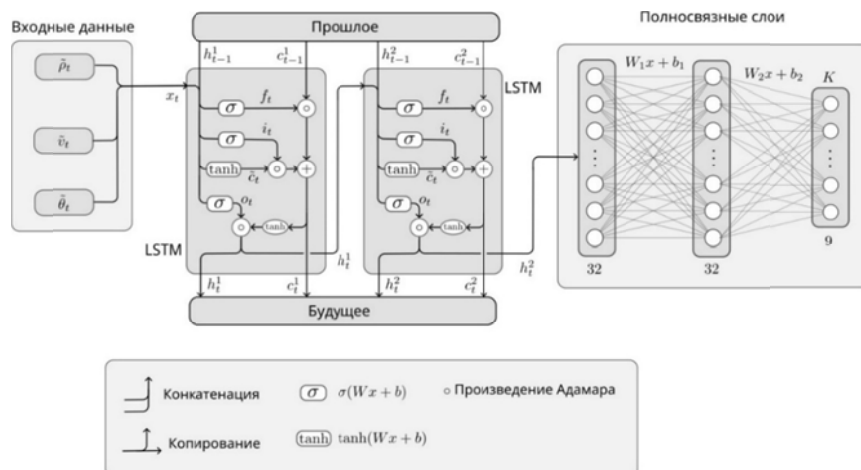


Рис 1. Архитектура нейронной сети

Заключение. В ходе проведенных исследований был разработан алгоритм калмановского типа, использующий рекуррентную нейронную сеть для предсказания коэффициента усиления. Проведено сравнение предложенного алгоритма с традиционным алгоритмом обобщенного фильтра Калмана на примере задачи коррекции навигационной системы судна по нелинейным измерениям дальности до маяков-ответчиков. В рамках дальнейших исследований планируется сопоставление предложенного подхода с оптимальным алгоритмом фильтрации для оценки состоятельности разработанного алгоритма.

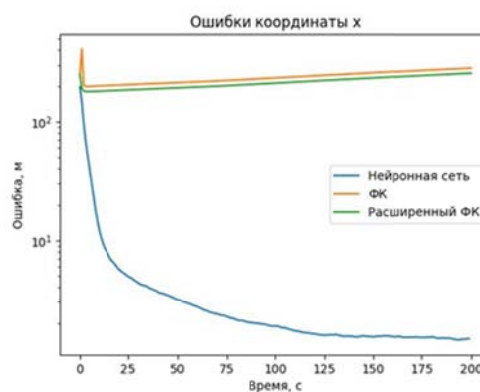


Рис 2. Ошибка рассматриваемых алгоритмов

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kalman, R.E.**, A new approach to linear filtering and prediction problems, Trans. ASME. Series D,J. Basic Engineering, 82, 1960, pp. 35-45.
2. **О. А. Степанов, Ю. А. Литвиненко, В. А. Васильев, А. Б. Торопов, М. В. Басин.** Алгоритм полиномиальной фильтрации в задачах обработки навигационной информации при квадратичных нелинейностях в уравнениях динамики и измерений. Часть I. Описание и сопоставление с алгоритмами калмановского типа // Гироскопия и навигация. Том 29. №3 (114), 2021. С. 3-33. DOI 10.17285/0869-7035.0068
3. **Simo Särkkä.** Bayesian Filtering and Smoothing. Cambridge University Press, 2013
4. **S. Hochreiter, J. Schmidhuber,** Long Short-Term Memory, Neural Computation, vol. 9, no. 8, pp. 1735-1780
5. **Guy Revach, Nir Shlezinger, Xiaoyong Ni, Adria Lopez Escoriza, Ruud J. G. van Sloun, Yonina C. Eldar.** KalmanNet: Neural Network Aided Kalman Filtering for Partially Known Dynamics. // IEEE Transactions on Signal Processing, pp. 1532-1547

M.N.Mikhaylov, V.P.Zolotarevich (ITMO University, Saint Petersburg). **Development of a Kalman-type algorithm using recurrent neural networks for non-linear filtering problems**

Abstract. A Kalman-type algorithm that uses a neural network for estimating optimal Kalman gain is developed. This algorithm is used to solve a task of correction of a ships navigation system using non-linear measurement of distances to beacons. Effectiveness of the developed algorithm is compared to results achieved using traditional algorithms.

В АВТОРСКОЙ РЕДАКЦИИ

Ч. И. НГУЕН, К. Х. НГУЕН
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт Петербург)

МЕТОД ПОДАВЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ШУМОВ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ AR МОДЕЛИ И ФИЛЬТРА КАЛМАНА ТИПА SRUKF С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ SAGE-ОКНА ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ БИНС В РЕЖИМЕ ГИРОКОМПАСИРОВАНИЯ

Рассматривается алгоритм подавления случайных шумов в сигналах инерциальных датчиков с целью сокращения времени начальной выставки БИНС на основе применения фильтра Калмана типа SRUKF с использования Sage-окна в комбинировании с математической моделью авторегрессии случайных шумов в измеряемых данных датчиков. Эффективность предложенного метода подтверждается результатами обработки реальных данных.

Введение. Как известно, в режиме гироскопирования бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), ее начальный угол курса определяется на основе данных, получаемых от акселерометров и гироскопов, измеряющих проекции вектора гравитационного ускорения и вектора угловой скорости вращения Земли на оси связанной системы координат в начальном неподвижном режиме работы БИНС. Из-за неизбежного наличия нестабильности смещения нуля и случайных шумов в сигналах акселерометров и гироскопов требуется длительное время для получения достаточного объема данных датчиков, чтобы достичь требуемой точности определения полезных измеряемых значений методом усреднения. Исходя из этого, чтобы сократить время режима гироскопирования, необходимо использовать методы обработки данных для снижения нестабильности смещения нуля и случайных шумов в полученных от инерциальных датчиков БИНС сигналах [1,2]. Однако, в существующих публикациях были сделаны предположения, что шум измеряемого сигнала является белым и зачастую не оценивают точность определения среднего значения полезного сигнала (проекция угловой скорости вращения Земли на оси гироскопов, проекция гравитационного ускорения на оси акселерометров), которая прямо влияет на точность гироскопирования.

Цель работы. Разработка нового метода подавления случайных шумов инерциальных датчиков для снижения нестабильности смещения нуля и интенсивности белого шума, что позволило бы сократить время режима гироскопирования, при сохранении заданной точности начальной выставки.

Предлагаемый метод. В данной работе предлагается новый метод подавления случайных шумов инерциальных датчиков на основе комбинирования модели авторегрессии (AR) и квадратно-корневого сигма-точечного фильтра Калмана (SRUKF) с использованием скользящего Sage-окна (англ. *Sage window Square-Root Unscented Kalman Filter – SW-SRUKF*), который дает возможность снижения нестабильности сдвига нуля, интенсивности белого шума, обеспечивая требуемую точность осреднения. Преимущество SRUKF по сравнению с UKF заключается в отсутствии необходимости представления матрицы ковариаций P_k на каждом временном шаге в виде разложения Холецкого, что повышает стабильность работы фильтра [4]. Новизна данной работе заключается в учете в уравнении измерений фильтра Калмана ненулевого низкочастотного составляющего случайных шумов датчика. Предлагаемое решение выполняется в двух шагах:

1. На первом шаге были построены математические модели случайных шумов гироскопа и акселерометра путем анализа автокорреляционной (ACF) и частичной автокорреляционной функции (PACF) измеряемых сигналов датчиков [3]. В результате анализа графиков ACF и PACF сигналов гироскопа и акселерометра в исследуемом объекте (БИНС-2М производства компания «Электрооптика») была определена модель скользящего среднего первого порядка $MA(1)$:

Научный руководитель: д.т.н, проф. Боронахин А.М.

$$y_k = \mu_k + \omega_k + \theta_1 \omega_{k-1}, \tag{1}$$

где y_k – измеряемое значение на выходе датчика в момент k ; μ_k – константа, которая пропорциональна среднему значению полезного сигнала; ω_k и ω_{k-1} – белые шумы в моментах k и $k-1$, соответственно; θ_1 – коэффициент $MA(1)$ модели.

На рис. 1 показан график корреляционной функции сигнала гироскопа, в которой входит колебательный контур, а также, в уравнение (1) входит сумма двух составляющих белого шума (в моментах k и $k-1$), что может трактоваться как нелинейность системы. Для линеаризации и последующей возможности использования фильтра Калмана было выполнено преобразование модели $MA(1)$ в линейную модель AR бесконечного порядка $AR(\infty)$ [3]. В результате математического преобразования получено уравнение модели $AR(\infty)$ в виде:

$$y_k = \varphi_1 y_{k-1} + \varphi_2 y_{k-2} + \dots + \varphi_n y_{k-n} + c + \omega_k, \tag{2}$$

где $\varphi_i = (-1)^{i+1} \theta_1^i$; $c = \mu(1 - \varphi_1 - \varphi_2 - \dots - \varphi_n)$.

Коэффициент θ_1 определяется на основе формулы [3] $r_1 = \frac{\theta_1}{1+\theta_1^2}$, где r_1 – значение автокорреляционной функции при шаге запаздывания, равном 1. Зная θ_1 можно определить коэффициенты φ_i . Здесь необходимо отметить, что $|\theta_1| < 1$. Поэтому при $AR(\infty)$, коэффициент φ_n приближается к нулю по экспоненциальному закону. На практике часто ограничиваются для $AR(\infty)$ диапазоном до 5-го порядка.

2. На втором этапе, на основе полученной математической модели (2) 5-го порядка было составлены уравнение состояния и уравнение измерения для SW-SRUKF. Формулировка SRUKF описывается в [4].

$$\mathbf{x}_k = [x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6]^T = [y_k, y_{k-1}, y_{k-2}, y_{k-3}, y_{k-4}, c]^T$$

Уравнение состояния:

$$\mathbf{x}_k = F \mathbf{x}_{k-1} + G \boldsymbol{\omega}_k \tag{3}$$

$$\mathbf{x}_{k-1} = [y_{k-1}, y_{k-2}, y_{k-3}, y_{k-4}, y_{k-5}, c]^T$$

$$F = \begin{bmatrix} \varphi_1 & \varphi_2 & \varphi_3 & \varphi_4 & \varphi_5 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$G = \text{diag}[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$; $\boldsymbol{\omega}_k$ – белый шум процесса

Уравнение измерения

$$\mathbf{z}_k = H \mathbf{x}_k + v_k, \tag{4}$$

где

$$\mathbf{z}_k = y_k; H = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; v_k = r_k + \varepsilon_k, \tag{5}$$

r_k – случайное смещение нуля в момент k ; ε_k – белый шум измерения



Рис. 1. Корреляционная функция сигнала гироскопа

В данном случае используется выходной сигнал датчика в момент k в качестве измерения на входе фильтра Калмана. Из уравнений (4) и (5) можно получить:

$$\mathbf{r}_k = M[v_k] = M[\mathbf{z}_k - H \mathbf{x}_k], \tag{6}$$

т.к $M[\varepsilon_k] = 0$, где: $M[.]$ – математическое ожидание;

Однако данное уравнение (6) не может быть использовано в процеду-

ре фильтрации, поскольку реальное состояние x_k неизвестно. Рассмотрим скользящее окно из N шагов измерения. Предположим, что статистика шума в окне постоянна или ее вариации очень незначительны. Тогда, заменяя значение x_k на его оценку \hat{x}_k и используя оконное приближение методом осреднения, можно оценить оптимальное значение \hat{r}_k в реальном времени. Получим следующую субоптимальную оценку [5]:

$$\hat{r}_k = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (z_{k-j} - H\hat{x}_{k-j}).$$

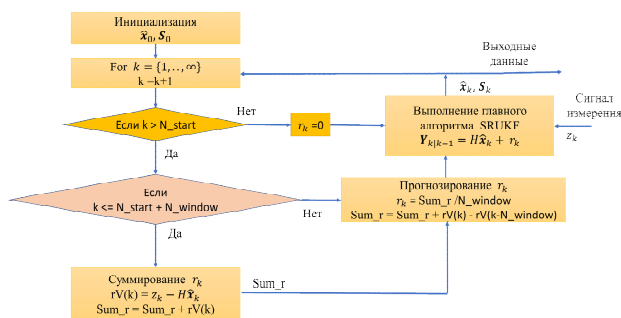


Рис. 2. Схема алгоритма SW-SRUKF

Здесь следует отметить, что время начала расчета \hat{r}_k наступает, когда фильтр достигает установленного режима через определенное количество шагов с начала инициализации фильтра. Общая схема алгоритма SW-SRUKF представлена на рис.2. В схеме значение N_window означает размер скользящего Sage-окна; N_start равно значению шага обновления; $\hat{x}_0 = M[x_0]$; $S_0 = chol\{M[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T]\}$, chol() – факторизация Холецкого [4]; $S_k = chol(P_k)$, P_k – оцененная ковариационная матрица состояния.

Эксперименты и результаты обработки данных. Объектом исследования в этой работе является БИНС-2М производства компании «НПК Электрооптика». БИНС-2М построена на базе трех лазерных гироскопов типа ГЛ-2Д, собранных в общем корпусе, и трех кварцевых маятниковых акселерометров ВА-3. Эффективность предложенного метода оценивается на основе сравнения 2-х параметров случайных шумов до и после фильтра: нестабильность смещения нуля, по которой можно сказать о необходимом количестве данных для достижения требуемой точности осреднения; интенсивность белого шума. Эта оценка будет сделана на основе анализа вариации Аллана и таблиц числовых расчетов. Для сравнения было выполнено подавление случайных шумов гироскопа традиционными методами (оптимальный фильтр Калмана - OKF, Sage-Husa фильтр Калмана – SHKF [2], SRUKF [4]) и предложенным методом SW-SRUKF. Для примера, на рис.3 показан сигнал гироскопа до и после использования различных фильтров и соответствующие вариации Аллана. На основе графиков вариации Аллана были определены характеристики случайных шумов в сигнале гироскопа до и после применения различных методов, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

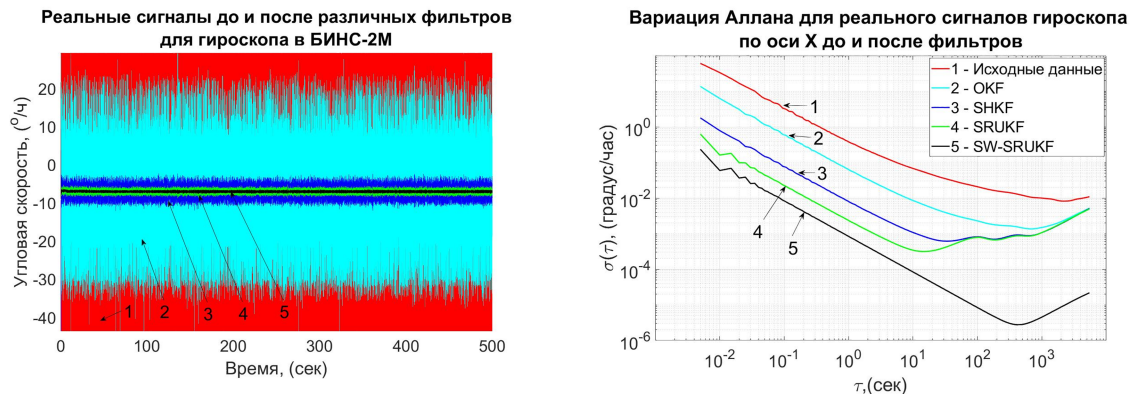
Сравнение характеристик вариации Аллана сигнала гироскопа по оси X до и после использования различных методов

Метод	Случайный угловой уход (градус/√ч)	Нестабильность сдвига нуля (градус/ч)	Случайный уход угловой скорости ((градус/ч)/√ч)
Сырые данные	0.198	0.0121	0.0003
OKF	0.021	0.0022	0.00008
SHKF	0.003	0.00089	0.00006
SRUKF	0.0011	0.00045	0.00006
SW-SRUKF	0.000006	0.000003	0.000000002

Анализируя полученные данные, можно получить следующие численные оценки: при использовании OKF, SHKF, SRUKF и SW-SRUKF, соответственно, случайный угловой уход сигнала уменьшается на 89.4%, 98.5%, 99.4% и 99.9%; нестабильность сдвига нуля уменьшается на 81.5%, 92.6%, 96.3% и 99.9%; случайный уход угловой скорости уменьшается на 73.3%, 79%, 81% и 99.9%. Результаты показывают большую эффективность предложенного метода по сравнению с традиционными методами. Благодаря чему, было сокращено время режима гироскопа

пасирования БИНС-2М с 9 минут (по паспорту) до 3 минуты при обеспечении заданной производителем точности определения угла курса.

Заключение. В данной работе был предложен метод шумоподавления для снижения нестабильности смещения нуля и случайных шумов акселерометров и гироскопов БИНС путем комплексирования AR модели и SW-SRUKF. Была продемонстрирована адекватность математических AR моделей случайных шумов лазерного гироскопа и акселерометра. Корректность и эффективность предложенного метода SW-SRUKF была подтверждена результатами обработки реальных данных с инерциальных датчиков. Результаты работы значимы не только для сокращения времени, но и для повышения точности определения угла курса при начальной выставке БИНС в режиме гирокомпасирования.



а) Реальные сигналы гироскопа до и после различных фильтров: 1-исходные данные, 2-OKF, 3-SHKF, 4-SRUKF, 5-SW-SRUKF

б) Сравнение вариаций Аллана реальных сигналов гироскопа до и после различных фильтров

Рис.3. Изображения характеристик сигнала гироскопа до и после использования различных фильтров

ЛИТЕРАТУРА

1. Shipeng Han, Zhen Meng, Olatunji Omisore, Toluwanimi Akinyemi, Yuepeng Yan. Random Error Reduction Algorithms for MEMS Inertial Sensor Accuracy Improvement // A Review. *Micromachines* 2020, 11(11), 1021; <https://doi.org/10.3390/mi11111021>.
2. J. Sun, X. Xu, Y. Liu, T. Zhang, and Y. Li, "FOG random drift signal denoising based on the improved AR model and modified Sage-Husa adaptive Kalman filter," *Sensors*, vol. 16, no. 7, pp.1–19, 2016.
3. Артамонов Н. В., Ивин Е. А., Курбацкий А. Н., Фантаццини Д. Введение в анализ временных рядов. учебное пособие для вузов: Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Московская школа экономики, Кафедра эконометрики и математических методов экономики. – Вологда : ВолНЦ РАН, 2021. – 134 с.
4. R. Van der Merwe and E. A. Wan, "The square-root unscented Kalman filter for state and parameter-estimation," 2001 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (Cat. No.01CH37221), 2001, pp. 3461-3464 vol.6, doi: 10.1109/ICASSP.2001.940586.
5. Shesheng Gao, Gao Hu, Yongmin Zhong. Windowing and random weighting-based adaptive unscented Kalman filter. *International journal of adaptive control and signal processing Int. J. Adapt. Control Signal Process.* 2015; 29:201–223 pp.

T.Y. Nguyen, Q. K. Nguyen (ETU "LETI", Saint Petersburg). **Method for suppressing random noise of inertial sensors based on complexing AR model and Kalman filter of SRUKF-type using sage-window to reduce the initial SINS alignment time in gyrocompassing mode.**

Abstract. An algorithm for suppression of random noise in the signals of inertial sensors to reduce the initial BINS alignment time based on the application of a Kalman filter of SRUKF type using Sage-window in combination with a mathematical model of autoregressive random noise of the measured sensor data is considered. The efficiency of the proposed method is confirmed by the results of processing the real data.

УДК 520.8, 528.061

Д.А.ГОНТАРЬ, Е.В.ДРАНИЦЫНА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ СТОХАСТИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МОДЕЛИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

На примере решения задачи идентификации неизвестных параметров стохастических составляющих модели сигнала, представляющего собой сумму белого шума и винеровской последовательности, производится сравнение методов, основанных на вариациях Алана, спектральном анализе и вейвлет-вариациях. Показано, что в рассматриваемом примере наименьшей относительной ошибкой оценивания обладает метод, основанный на вейвлет-вариациях.

Введение. Структура и характер шумовых составляющих в канале измерения оказывают существенное влияние на достоверность оценки самой измеряемой величины. Классические методы исследования случайных процессов (выборочная дисперсия, спектральная плотность) не всегда позволяют идентифицировать источник погрешностей и их количественный вклад в общую статистику шума [1, 2]. В настоящее время для исследования шумовых составляющих широко используются методы основанные на вариациях Аллана [1, 3–6], построении корреляционной функции [8] и спектральной плотности мощности [6, 7], а также методы нелинейной фильтрации, которые способны более точно описать флуктуационную составляющую модели погрешностей вне установившегося режима [9, 10]. Кроме того, появляются публикации, в которых обсуждается применение методов, основанных на вейвлет-вариации, которые, как утверждается, способны уменьшить ошибку оценивания стохастических составляющих сигнала [11, 12].

Целью работы является сопоставление относительной ошибки оценивания неизвестных параметров случайных составляющих модели сигнала некоторыми традиционными методами и методом основанным на вейвлет-вариациях.

Постановка задачи. Математическая модель рассматриваемого сигнала, представляющая собой сумму белого шума и винеровской последовательности, записана в виде:

$$\begin{aligned} s_i &= \xi_i + W_i, & p(\xi_i) &= N(\xi_i; 0, \sigma_{БШ}^2), \\ W_i &= W_{i-1} + v_i, & p(v_i) &= N(v_i; 0, \sigma_B^2), \end{aligned} \quad (1)$$

где s – сигнал, W – винеровская последовательность, $\sigma_{БШ}^2$, σ_B^2 – дисперсии белого шума измерений и порождающего белого шума винеровской последовательности, i – номер отсчета.

С использованием имеющейся реализации сигнала, модель которого приведена выше, требуется оценить $\sigma_{БШ}^2$, σ_B^2 . При решении задачи используются следующие методы идентификации:

1. Идентификация с использованием периодограммной оценки условной спектральной плотности мощности (УСМП) [6, 7].
2. Идентификация с использованием вариаций Аллана (ВА) [5, 6].
3. Идентификация с использованием вейвлет-вариаций (ВВ) [5, 10, 11].

Следует отметить, что т.к. сигнал (1) не является стационарным, решить поставленную задачу с использованием спектральной плотности не удастся, в связи с чем в рамках настоящей работы строилась периодограммная оценка УСМП [13]. Вследствие того, что традиционные методы решения задач идентификации широко известны, в рамках работы их описание на рассматривается. Далее же поясняется основная суть метода вейвлет-вариации.

Вейвлет-вариация. Для идентификации параметров стохастических составляющих реализации сигнала (1) была построена ВВ. В качестве анализирующего вейвлета был использован

вейвлет Хаара, представленный в приведенных ниже формулах.

$$h_{k,i} = \begin{cases} -1, i < m_k / 2 & , \\ 1, m_k / 2 < i \leq m_k & , \end{cases} \quad (2)$$

где $h_{k,i}$ – i -я точка в k -м вейвлете Хаара, m_k – количество точек в k -м вейвлете, k – индекс вейвлета, $i = 1..m$ – номер точки в k -м вейвлете;

$$m_k = 2^k, k = 1..log_2(n), \quad (3)$$

где n – длина реализации в отсчетах.

Для нахождения ВВ необходимо сначала произвести дискретное вейвлет-преобразование реализации анализируемого сигнала по формуле

$$ht_k = \sum_{i=1}^n s_i \cdot h_{k,n-i} = conv(s_i, h_{k,n-i}), \quad (4)$$

где ht_k – дискретное вейвлет-преобразование полученное с использованием k -го вейвлета; $h_{k,n-i}$ – $(n - i)$ -я точка k -ого анализирующего вейвлета; s_i – i -я точка реализации сигнала; $conv(.)$ – операция дискретной свертки.

Используя полученное дискретное вейвлет-преобразование реализации сигнала, нетрудно найти его ВВ по формуле

$$V_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ht_{k,i}^2, \quad (5)$$

где V_k – ВВ, полученная с помощью k -го вейвлета; $ht_{k,i}$ – i -я точка вейвлет-преобразования, полученного с помощью k -го вейвлета.

Определение характерных наклонов. Параметры стохастической модели сигнала на графиках УСПМ, ВА, ВВ характеризуются различными наклонами. Безусловно, возможна визуальная оценка параметров модели по этим наклонам, но более точной будет оценка характерных наклонов методом наименьших квадратов. Для построения таких оценок необходимо задаться математическими моделями (6)-(8)

$$S_j = \sigma_{БШ}^2 + \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_j)^2} \cdot \sigma_B^2, \quad (6)$$

где S_j – УСПМ полученная с использованием j -й частоты, f_j – j -я частота;

$$\hat{\sigma}_{A,g}^2 = \frac{1}{\tau_g} \sigma_{БШ}^2 + \frac{\tau_g}{3} \cdot \sigma_B^2, \quad (7)$$

где $\hat{\sigma}_{A,g}^2$ – ВА полученная с использованием g -го времени осреднения, τ_g – g -ое время осреднения;

$$V_k = \frac{1}{m_k} \sigma_{БШ}^2 + \frac{m_k}{3} \cdot \sigma_B^2. \quad (8)$$

Результаты моделирования. Для определения эффективности идентификации каждый из методов был протестирован на 3000 реализациях случайного сигнала (1), состоящих из 10000 отсчетов с разными соотношениями дисперсий белого шума $\sigma_{БШ}^2$ и порождающего шума винеровского процесса σ_B^2 , записанного на частоте 1 ГЦ. На рисунках 1, 2 приведены диаграммы относительной ошибки оценивания для различных алгоритмов (9).

$$F = 100\% \cdot \frac{1}{L} \cdot \sum_{l=1}^L \frac{|x_l - \hat{x}_l|}{x_l}, \quad (9)$$

где F – относительная ошибка оценивания, x_l – оцениваемая величина, \hat{x}_l – оценка, l – номер реализации, L – количество реализаций.

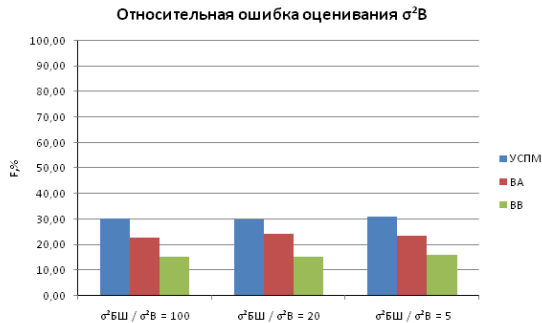


Рис. 1. Относительная ошибка оценивания дисперсии порождающего шума винеровского процесса

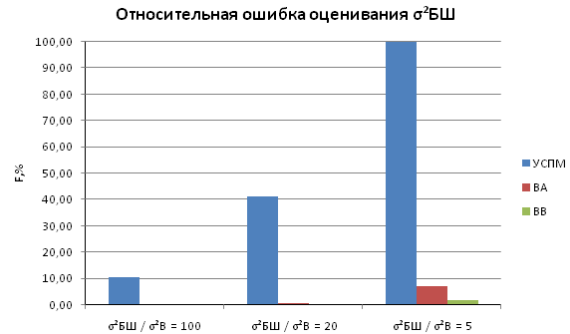


Рис. 2. Относительная ошибка оценивания дисперсии белого шума

Как видно из графиков наименьшей относительной ошибкой оценивания при разных соотношениях шумов обладает вейвлет-вариация. Так же можно отметить, что относительная ошибка оценивания дисперсии белого шума для всех методов не зависит от соотношения дисперсий шумов, входящих в сигнал.

Заключение. При решении задачи идентификации неизвестных параметров модели случайного сигнала относительная ошибка оценивания метода основанного на вейвлет-вариациях оказалась ниже, чем ошибка методов основанных на периодограммной оценке условной спектральной плотности мощности и вариациях Аллана.

В качестве направления дальнейшей работы представляется целесообразным сопоставить метод основанный на вейвлет-вариации и различные методы нелинейной фильтрации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кробка Н.И.** О топологии графиков вариации Аллана и типовых заблуждений в интерпретации структуры шумов гироскопов. XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 2015, 28с.
2. **Драницына Е.В., Алиева Н.Г., Павлов А.А.** Модель погрешностей волоконно-оптического гироскопа. Материалы конференции молодых ученых “Навигация и управление движением.” 2015, 7 с.
3. **Степанов О.А., Челпанов И.Б., Моторин А.В.** Точность оценивания постоянной составляющей погрешности датчиков и ее связь с вариацией Аллана // Гироскопия и навигация - 2016 -№3 - С. 63-74.
4. **Allan D.W.** Historicity, strengths, and weaknesses of Allan variances and their general applications. Gyroscopy Navig. 2016. Vol. 7, № 1. P. 1–17.
5. **Howe D.A., Percival D.B.** Wavelet Variance, Allan Variance, and Leakage. IEEE Trans. Instrum. Meas. 1995. Vol. 44, № 2. P. 94–97.
6. **Драницына Е.В., Моторин А.В.** Методические указания по выполнению лабораторных работ “Исследование выходных сигналов волоконно-оптических гироскопов.” Санкт-Петербург: Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО, 2021. 53 р.
7. **Челпанов, И.Б.** Оптимальная обработка сигналов в навигационных системах / И.Б. Челпанов ; Москва: Наука, 1967. 392 с.
8. **Гостева Н.Д., Литвиненко Ю.А.** Исследование математической модели ухода двухстепенного поплавкового гироскопа
9. **Степанов О.А., Моторин А.В.** Проблемно-ориентированный подход к решению задачи идентификации моделей погрешностей навигационных датчиков и оцениваемых сигналов. Материалы пленарных заседаний 9-й Российской мультиконференции по проблемам управления (Санкт-Петербург 4-6 октября 2016г.), 2016, С. 49-60
10. **Моторин А.В.** Идентификация моделей погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции методами нелинейной фильтрации. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 05.13.01, Университет ИТМО, 2017, 134 С.
11. **Gurrier S., Molinari R., Victoria-Feser M.** Estimation of Time Series Models via Robust Wavelet Variance. Australian Journal of Statistics, 2014, Vol. 43/3-4, P.267-277

12. **Mondal D., Percival B.D.** Wavelet Analysis of Variance for Time Series with Missing Values. Technical report no. 535. Department of Statistics, University of Washington, 2008, 40 p.
13. **Алюнов Д.Ю.** О методах оценивания параметров сигнала. Современные проблемы науки и образования, 2014 - №6

D.A.Gontar, E.V.Dranitsyna, (Elektropribor JSC, Saint-Petersburg). **Comparative analysis of stochastic components parameters identifying methods of the inertial sensors error model.**

Abstract. The paper considers and compares several methods for identifying the structure and nature of signal noise components: Allan variations; spectral analysis; wavelet variations.

УДК 629.05

Р. У. ТИТОВ, А. В. МОТОРИН
(Университет ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ НАВИГАЦИИ ПО КАРТЕ ПРИ РАЗЛИЧНОМ ХАРАКТЕРЕ ПОЛЯ, ПОГРЕШНОСТЕЙ ЕГО ИЗМЕРИТЕЛЯ И СИСТЕМЫ СЧИСЛЕНИЯ

Рассматривается задача коррекции системы счисления по карте и измерениям поля аномалии силы тяжести при навигации объекта вблизи поверхности Луны. Приводятся расчётная и действительная характеристики точности навигации в зависимости от погрешностей системы счисления. Результаты сравниваются с решением аналогичной задачи на поверхности Земли.

Введение. В настоящее время одним из распространённых методов решения задачи навигации являлся метод навигации по геофизическим полям. Метод основан на сопоставлении измеренных с помощью установленных на борту подвижного объекта датчиков и вычисленных по данным карты значений поля. Актуальность метода связана с вопросом навигации в условиях отсутствия связи со спутниковыми и другими радиотехническими средствами навигации в том числе и различного рода автономных робототехнических систем [1-4]. В свете этого одной из возможных областей применения такого метода видится решение задачи навигации подвижных объектов вблизи поверхности Луны, так как связь со спутниковыми средствами навигации в этом случае затруднена. Принципы метода навигации по физическим полям Луны остаются неизменными, однако, очевидно, сами поля отличаются от Земных.

В докладе рассматриваются задача коррекции системы счисления по измерениям и карте поля аномалии силы тяжести при навигации автономного подвижного объекта вблизи поверхности Луны. Приводятся действительные характеристики точности решения задачи в зависимости от погрешностей системы счисления, а также сравнение с решением этой задачи вблизи поверхности Земли.

Постановка и решение задачи. Рассматриваемая задача предполагает наличие навигационной системы (НС), карты поля и измерителя этого поля. В настоящей работе в качестве НС рассматривается система счисления пути, вырабатывающая координаты на плоскости $X_i^{HC} = [x_i^{HC} \quad y_i^{HC}]^T$, где i – отсчёт времени, представляемые в виде:

$$X_i^{HC} = X_i + \Delta X_i^{HC}, \quad (1)$$

где $X_i = [x_i \quad y_i]^T$ – истинные координаты подвижного объекта; $\Delta X_i^{HC} = [\Delta x_i^{HC} \quad \Delta y_i^{HC}]^T$ погрешности координат выработки места НС. Модель погрешностей может быть получена исходя из алгоритма идеальной работы НС. В случае системы счисления, линеаризованная модель погрешностей представляется в виде [5]:

$$\begin{cases} \Delta x_i^{NS} = \Delta x_{i-1}^{NS} + (\tilde{V}_i - \Delta V_i) \cdot \Delta t \cdot \cos(\tilde{K}_i - \Delta K_i) \cdot \Delta K_i + \Delta t \cdot \sin(\tilde{K}_i - \Delta K_i) \cdot \Delta V_i \\ \Delta y_i^{NS} = \Delta y_{i-1}^{NS} - (\tilde{V}_i - \Delta V_i) \cdot \Delta t \cdot \sin(\tilde{K}_i - \Delta K_i) \cdot \Delta K_i + \Delta t \cdot \cos(\tilde{K}_i - \Delta K_i) \cdot \Delta V_i \end{cases} \quad (2)$$

где \tilde{V}_i и \tilde{K}_i – измерения датчиков скорости и курса, ΔV_i и ΔK_i – их погрешности. Погрешности датчиков могут быть описаны различными способами, в настоящей работе, чтобы не усложнять модель, и считая квазидетерминированные составляющие погрешностей компенсированными, эти погрешности представляются как дискретные белые шумы с известными среднеквадратическими отклонениями $\sigma_{\Delta V}$ и $\sigma_{\Delta K}$. Величины $\sigma_{\Delta V}$ и $\sigma_{\Delta K}$ подбирались таким образом, чтобы задать накопление определённой радиальной среднеквадратической погрешности (СКП) в координатах за час. В работе проводилось моделирование для трёх вариантов НС со накоплением радиальной СКП в 100 м, 500 м и 1000 м за час (рис. 1), что имитирует различные

классы точности НС. Движение объекта задавалось равномерным и прямолинейным со скоростью $V = 5$ м/с и курсом 40° .

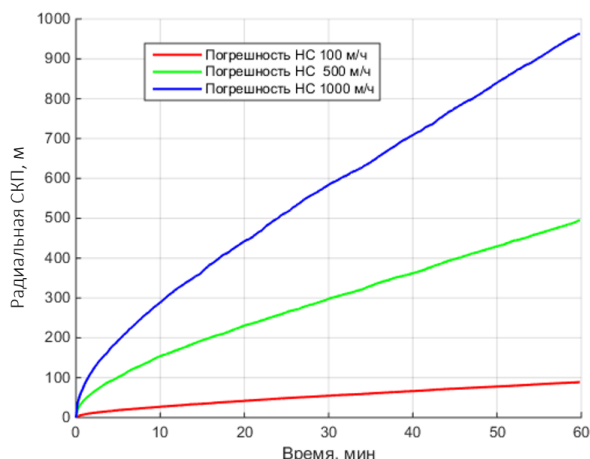


Рис. 1. Радиальная СКП координат НС

В качестве физических полей были выбраны поля аномалий силы тяжести (АСТ) Земли и Луны. Участки полей для сравнения были выбраны из случайных мест, и получены с использованием моделей EGM2008 и LGM420b для Земли и Луны соответственно [6] и средними градиентами порядка 1 мГал/км для поля Земли и 1,5 мГал/км для поля Луны. Используемые карты представлены на рис. 2, 3. Согласно этим картам, промоделированы измерения z_i в виде:

$$z_i = \phi(X_i) + \Delta z_i = \phi(X_i^{NS} - \Delta X_i^{NS}) + \Delta z_i, \quad (3)$$

где $\phi(X_i)$ – функция измерений карты поля в точке истинных координат объекта; Δz_i – белозумная погрешность измерений с СКП 1 мГал.

Задача коррекции заключается в том, чтобы, располагая набором измерений (3), получить оценки погрешностей НС $\Delta \hat{X}_i^{HC}$, которые в дальнейшем компенсируются на выходе НС. Поставленная задача решалась с использованием рекуррентных алгоритмов оптимального байесовского оценивания, построенных на основе последовательных методов Монте-Карло [1,4].

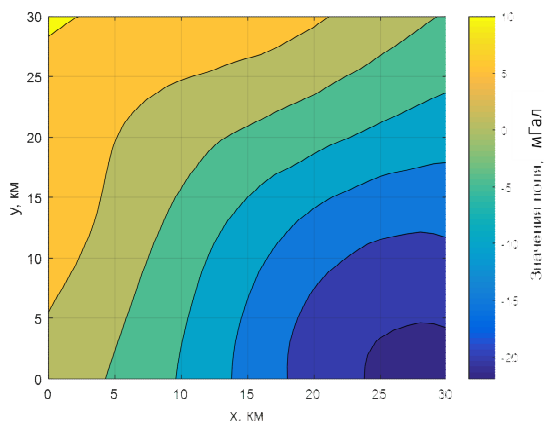


Рис. 2. АСТ Земли по модели EGM2008

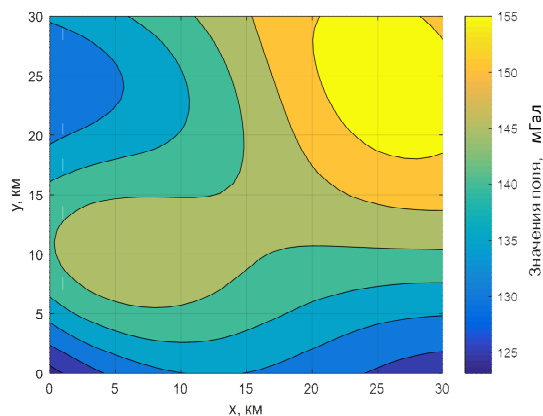


Рис. 3. АСТ Луны по модели LGM420b

Для получения действительных СКП оценивания было промоделировано 500 различных траекторий движения. Полученные в результате действительные радиальные СКП оценивания координат приведены на рис. 4, 5.

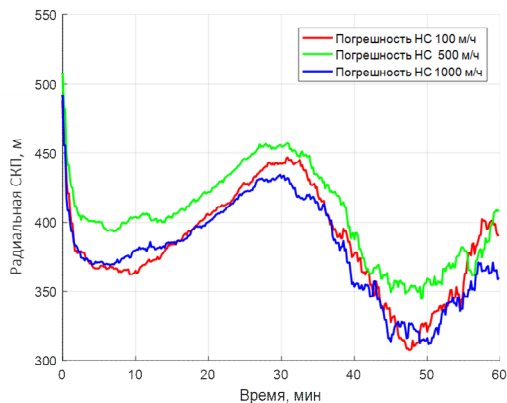


Рис. 4. Действительная СКП оценивания координат объекта по АСТ Земли

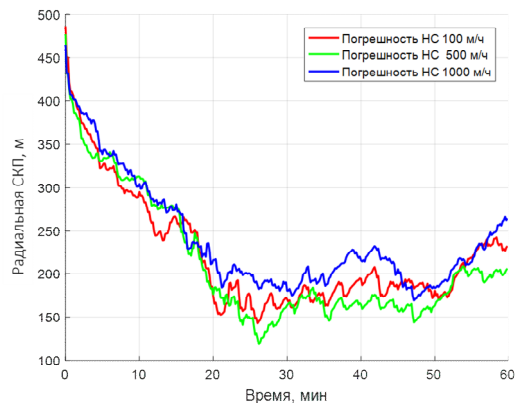


Рис. 5. Действительная СКП оценивания координат объекта по АСТ Луны

Анализируя полученные графики, можно отметить, что в рассматриваемых условиях точность решения задачи слабо зависит от погрешности НС. При этом точность в условиях Луны, при навигации по выбранным участкам, в 1,5 раза выше точности, полученной в условиях Земли, что может объясняться большей изменчивостью АСТ Луны. Однако полученные результаты нельзя считать окончательными, так как рассматривались конкретные участки поля АСТ Земли и Луны, и требуют уточнения с использованием различных участков.

Закключение. Проведено сравнение точности решения задач коррекции системы счисления и по измерениям поля АСТ в условиях Земли и Луны. Приведены действительные характеристики точности навигации в зависимости от величины погрешностей системы счисления. Показано, что точность слабо зависит от уровня погрешностей НС. Также точность навигации в условиях Луны, при использовании выбранных участков, в 1,5 раза выше точности, полученной в условиях Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Степанов О. А., Торопов А.Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1. Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация. 2015. № 3. (23). С. 102 - 125.
2. **Джанджгава Г.И., Герасимов Г.И., Августов Л.И.** Навигация и наведение по пространственным геофизическим полям// Известия ЮФУ. Технические науки. - № 3 (140) / 2013. - С. 74-83
3. **Белоглазов И.Н. Джанджгава Г.И. Чигин Г.П.** Основы навигации по геофизическим полям. М.: «Наука». - 1985. - 328 с.
4. **Торопов А.Б.** Алгоритмы фильтрации в задачах коррекции показаний морской навигационной системы с использованием нелинейных измерений: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2013. 147 с.
5. **Носов А.С., Моторин А.В.** Реализация алгоритмов ориентации и навигации на четырехколесной мобильной платформе, // Материалы XVII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015, pp. 212–220.
6. <http://icgem.gfz-potsdam.de/home> (дата последнего обращения 04.08.2023).

R.U.Titov (ITMO University, St-Petersburg), A.V.Motorin (ITMO University, CSRI «Elektropribor» St-Petersburg). **Accuracy analysis for map-aided navigation using different fields, measurement errors and dead-reckoning system**

Abstract. The task of an autonomous mobile object navigation using an on-board dead-reckoning system is considered. The correction of the dead-reckoning system using field measurements basing on its map is included. The calculated and actual characteristics of the navigation accuracy are applied, depending on the nature of the errors of the number system and the chart meter.

УДК 656.052.16

А.В. ШОЛОХОВ, М.А. КОРШУНОВ

(Филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, г. Серпухов)

ОЦЕНКА ПРОТЯЖЁННОСТИ МАРШРУТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ АВТОНОМНОГО НАЗЕМНОГО ОБЪЕКТА В ДВИЖЕНИИ ПО ЦИФРОВОЙ КАРТЕ ДОРОГ

Рассматривается задача оценки протяжённости маршрута, требуемого для определения начальных навигационных параметров автономного наземного объекта в движении. Для нахождения начальных навигационных параметров используется цифровая карта дорог и алгоритм динамической трансформации временной шкалы. В качестве результата представлена зависимость вероятности определения начальных навигационных параметров от пройденного пути наземного объекта.

Введение. Обеспечение автономности является важной задачей для многих систем наземной навигации (СНН). Таким системы используют только информацию, доступную на борту объекта и, как правило, строятся по принципу счисления пути [1]. Для работы системы счисления необходима начальная настройка СНН, включающая определение начальных параметров следующей точки поворота (координат и угла поворота) наземного объекта с заданной точностью. Аналогичные операции выполняются в процессе нормального функционирования СНН для обеспечения требуемой точности, а также в случае сбоя. В настоящее время операции по начальной настройке автономных СНН проводят на заблаговременно подготовленных контрольных точках (КТ), которые выбираются на предполагаемых маршрутах движения наземного объекта – автомобильных дорогах.

Такой подход к начальной настройке СНН существенно ухудшает мобильность объекта вследствие ограничений на его удалённость от КТ и требует заблаговременной и трудоёмкой подготовки возможных маршрутов наземного объекта. Также определение начальной ориентации СНН сопряжено с дополнительными затратами времени на получение объёма измерительных данных, обеспечивающего высокую точность угловых параметров. Кроме этого, финальная точность параметров СНН во время последующего движения объекта обеспечивается и высокой квалификацией оператора, поскольку его ошибка не может быть обнаружена в СНН до установки объекта на следующей КТ. Всё это приводит к необходимости поиска путей решения задачи начальной настройки автономных СНН.

В предыдущих исследованиях задача определения начальных параметров для счисления координат автономного наземного объекта решена путём применения цифровой карты дорог (ЦКД) [2, 3] и алгоритма динамической трансформации временной шкалы [4, 5, 6]. Основными этапами решения являются: подготовка данных приборной траектории и ЦКД; формирование признаков приборной траектории и ЦКД; определение меры близости сопоставляемых параметров; формирование матрицы, характеризующей меру близости параметров приборной траектории и ЦКД; формирование матрицы трансформации; нахождение оптимального пути сопоставления данных и подсчёт меры близости сопоставляемых параметров приборной траектории и ЦКД; определение текущих координат и ориентации объекта. На текущий момент к представленному решению более детально раскрыты этапы подготовки данных приборной траектории и ЦКД, а также более подробно рассмотрен процесс сопоставления параметров. Основное внимание уделено построению зависимости вероятности нахождения значений начальных навигационных параметров от протяжённости маршрута автономного наземного объекта. Формирование зависимости осуществляется методом статистических испытаний. Число испытаний, ввиду отсутствия знания о законе распределения начальных параметров, доверительной вероятности и конфигурации дорожной сети, определяется эмпирически.

Постановка задачи. Пусть ЦКД задана в векторном формате [7] на координатной плоскости множеством N прямолинейных отрезков, соответствующих реальному положению осевых линий автомобильных дорог. Каждый i -й отрезок, $i=1 \dots N$, задаётся уникальным номером K_i , координата-

ми начальной (X_i^H, Y_i^H) и конечной (X_i^K, Y_i^K) точек в плоской прямоугольной системе координат. Взаимно независимые погрешности координат всех точек характеризуются дисперсией D_k .

Наземный объект движется по маршруту, представленному в ЦКД прямолинейными отрезками. На непродолжительном (до m -го такта) начальном этапе движения СНН вырабатывает координаты (X_j^P, Y_j^P) и дирекционный угол (ДУ) $\alpha_j^P, j=1\dots m$, составляющие приборную траекторию. Они получены при $X_1^P=0, Y_1^P=0$ и $\alpha_1^P=0$. Дисперсии погрешностей координат D_p и дирекционного угла D_a характеризуют область неопределённости начальных координат объекта и его ориентации. Модель погрешностей СНН считается известной и соответствует счислению пути курсо-одометрического типа. Алгоритм определения начальных параметров для автономного счисления координат рассмотрен в работе [2].

Задача состоит в том, чтобы определить зависимость вероятности определения начальных значений координат и азимутальной ориентации (точки поворота) от пройденного пути $P(S)$ на начальном этапе движения наземного объекта. При этом стоит отметить, что навигационными параметрами определяются для последней точки пройденного пути S , являющейся начальной для последующего движения наземного объекта. Таким образом, можно осуществить оценку требуемой протяжённости движения при определении начальных навигационных параметров по цифровой карте дорог для автономного счисления координат.

Алгоритм оценки эффекта. Исходными данными для исследований являются ЦКД, тактико-технические характеристики СНН, параметры движения. При этом погрешности ЦКД и СНН формируются случайным образом. Формируется максимальная протяжённость приборной траектории, маршруты между КТ и число испытаний N , а также выбирается один из сформированных маршрутов, по которому моделируется процесс функционирования СНН наземного объекта. Моделируются показания НСС (приборной траектории) с соответствующими погрешностями. Далее с помощью алгоритма начальной настройки СНН [2] проводятся операции сопоставления данных приборной траектории и ЦКД. Результатом работы алгоритма являются координаты на последнем отрезке. Полученные координаты сравниваются с координатами последнего отрезка выбранного маршрута и принимается решение о правильности работы алгоритма. Вышеизложенные операции выполняются для разной длины приборной траектории N -е число раз. Вероятность определения начальных параметров для различной протяжённости вычисляется согласно формуле (1):

$$P_S = \frac{k}{N}, \quad (1)$$

где k – число правильных результатов работы.

На основании всех испытаний строится график зависимости $P(S)$.

Моделирование. На основании вышеизложенного алгоритма была разработана программа оценки эффекта при определении начальных координат и ориентации наземного объекта по ЦКД. На рисунке 1 представлен результат работы программы, где показан фрагмент приборной траектории, обозначенный как «начальное приближение» (для наглядности представлен в центре рисунка) и выбранные похожие маршруты на ЦКД. При этом каждому найденному маршруту соответствует мера близости C , характеризующая отличие найденной траектории от истинной, т.е. чем меньше величина C , тем вероятнее что эта траектория истинная. В верхней левой части рисунка 1 представлен наиболее похожий участок выбранной траектории, который соответствует истинной траектории движения наземного объекта. Координаты конечной точки последнего отрезка выбранного маршрута ЦКД являются текущими координатами местоположения объекта.

На рисунке 2 (а) представлен график зависимости вероятности нахождения траектории движения наземного объекта на ЦКД с разным среднеквадратическим отклонением координат от длины приборной траектории. На рисунке 2(б) представлен график зависимости числа операций от длины приборной траектории наземного объекта. Исходя из этих двух графиков можно сделать вывод, что оптимальная длина приборной траектории для решения задачи определения

начальных параметров автономного наземного объекта с минимальными трудозатратами должна быть 4 км.

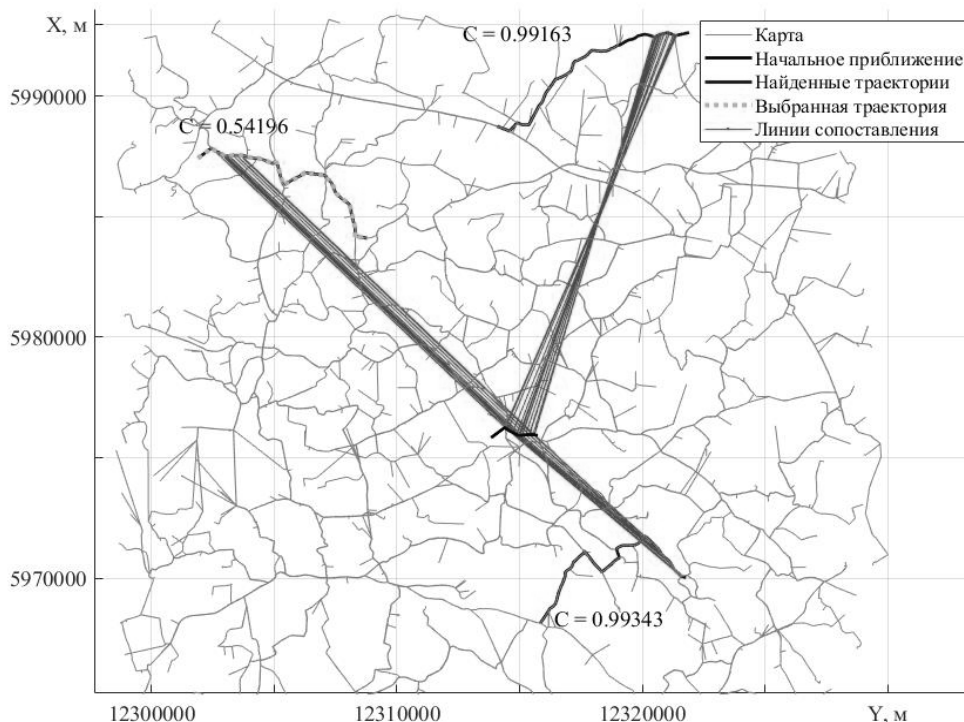


Рис. 1. Результаты моделирования начальной настройки СНН

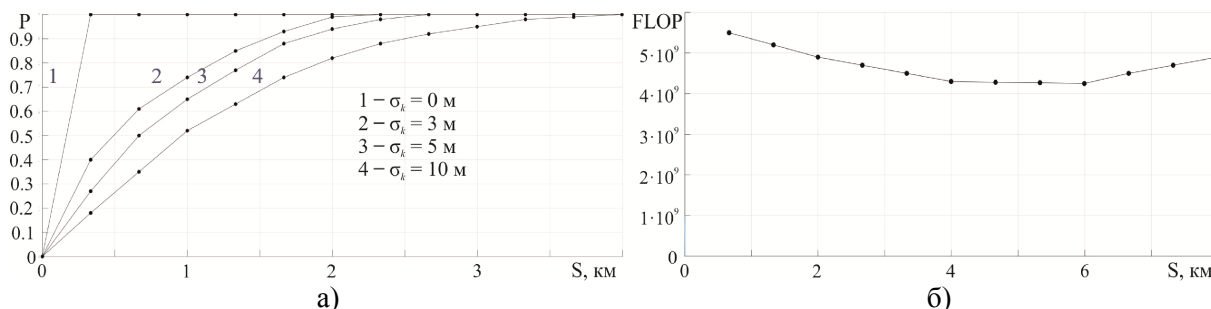


Рис. 2. График зависимости вероятности нахождения траектории движения наземного объекта на ЦКД от длины приборной траектории (а) и график зависимости числа операций от длины приборной траектории наземного объекта (б)

Заключение. Решена задача по оценке протяжённости маршрута, необходимого для определения начальных навигационных параметров автономного наземного объекта по ЦКД. В качестве результата представлена зависимость вероятности определения начальных параметров от пройденного пути $P(S)$ на начальном этапе движения наземного объекта. Из результатов исследований вытекает, что ЦКД может быть эффективно использована при определении начальных навигационных параметров (начальных координат и ориентации), которые далее могут быть использованы для начальной настройки системы навигации, построенной на принципе счисления пути.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузовков Н.Т., Салычев О.С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. - М.: Машиностроение, 1982. - 216 с.
2. Беркович С.Б. Коррекция автономных наземных навигационных систем в движении по отдельным точкам ЦКД / С.Б. Беркович [и др.] // 13-я С.-Петербургская межд. конф. по интегрированным навиг. системам. Спб: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор» 2006. С. 154-156.
3. Садеков Р.Н. Применение цифровых карт дорог для автономной коррекции систем наземной навигации // Тр. ФГУП «НПЦ АП» М., 2008. № 2. С. 87-95.

4. **Коршунов М.А.** Начальная настройка системы наземной навигации по цифровой карте дорог с применением алгоритма динамической трансформации временной шкалы // Материалы XXIV конференции молодых учёных «Навигация и управление движением» - Спб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. - с. 210-213.
5. **Vintsyuk T.K.** Speech discrimination by dynamic programming. *Kibernetika*, 4(2), 81-88, January-February, 1968.
6. **Rabiner L., Juang B.H.** *Fundamentals of Speech Recognition*. Prentice Hall PTR, 1993.
7. ГИС «Панорама»: [Электронный ресурс] // КБ «Панорама». URL: https://gisinfo.ru/products/products_panorama.htm. (Дата обращения: 30.01.2022).

Sholohov A.V., Korshunov M.A. (The Military Academy of Strategic Rocket Forces after Peter the Great, branch Serpukhov). **Evaluation of a potentially achievable effect in determining the initial parameters using a digital road map for autonomous calculation of the coordinates of a ground object**

Abstract. In order to determine the initial parameters of an autonomous ground vehicle, the problem of estimating the necessary route length is investigated. Using a digital map and a dynamic time scale transformation algorithm, the initial parameters are then determined. As a result, the dependence of the probability of determining the initial parameters on the traveled path of the ground object is presented.

УДК 681.51

К. А. БЕЗРУКОВА
(АО «ЦНИИАГ», Москва)**АЛГОРИТМЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ RGB ИЗОБРАЖЕНИЙ ЦВЕТНЫХ ОПТИЧЕСКИХ
КОРРЕЛЯЦИОННО-ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Предложен алгоритм кластеризации изображений цветных оптических корреляционно-экстремальных систем навигации летательных аппаратов. Представлены результаты апробации предложенного алгоритма на двух тестовых изображениях. Показано, что кластеры в принятой форме усеченного конуса являются устойчивыми элементами в пространстве RGB, а сам алгоритм позволяет распределить большинство пикселей изображения по соответствующим кластерам.

Введение. Современные высокоточные системы навигации летательных аппаратов (ЛА) базируются на комплексировании инерциальных навигационных систем с системами коррекции (СК) [1], в частности, корреляционно-экстремальными системами навигации (КЭНС) [2 - 5], осуществляющими периодическое определение местоположения ЛА в местной системе координат путем сравнения эталонного изображения (ЭИ), которое сформировано заранее по исходной видеоинформации (например, аэро- или космический фотоснимок), с текущим изображением (ТИ), формируемым в полете ЛА. Предлагаемый доклад посвящен исследованию алгоритмов кластеризации изображений в такой СК, базирующейся на использовании спектральных отражательных характеристик местности для формирования ЭИ и ТИ.

Параметры цветного изображения и алгоритм кластеризации. Для создания ЭИ и ТИ используется аддитивная цветовая модель RGB (традиционная и широко распространенная форма цветной фотографии). В этом случае [6, 7] цветные (RGB) ТИ формируются на борту ЛА с помощью бортовой цветной видеокамеры, а в качестве изображений, предназначенных для формирования ЭИ, используются цветные (RGB) фотоснимки, полученные с помощью космической или аэро- фотоаппаратуры. Тогда соответствие ТИ для k -й зоны коррекции определенному участку ЭИ той же зоны коррекции устанавливаются по экстремуму функционала, связывающего информативные параметры изображений.

Информативный параметр (ИП) цветной оптической КЭНС, синтезированный в соответствии с методологией [6] и являющийся инвариантным к суточным изменениям местности — уровню освещенности, спектральному составу падающей радиации и состоянию подстилающей поверхности — представляет собой трехкомпонентный вектор, описываемый красной, зеленой и синей координатами модели RGB.

Теоретические исследования и результаты математического моделирования показывают, что использование КЭНС данного типа для навигации ЛА позволяет уменьшить (по сравнению с черно-белой оптической КЭНС) размеры ТИ при сохранении заданных точностных характеристик определения местоположения ЛА, идентифицировать на ТИ площадные помехи (облачность, туман и др.) и исключить их из корреляционного сравнения ЭИ и ТИ, а также синтезировать ЭИ одного сезона по фотоснимкам местности другого сезона [8 - 12].

Однако для реализации данных преимуществ цветной оптической КЭНС необходимо учитывать влияние оптического канала приемника и атмосферы на формирования изображений различных каналах (RGB), т.е. фактически определить передаточную функцию.

В работах [13 – 14] представлены результаты исследований цветных оптических КЭНС с использованием нелинейной математической модели передаточных характеристик фоточувствительных элементов цветного цифрового фотоаппарата и с помощью специального оптического стенда, использующего узкополосные тестовые сигналы, формируемые путём простран-

Научный руководитель: начальник научно-технического отделения д.т.н. Щербинин В.В.

ственного спектрального разложения эталонного широкополосного оптического сигнала дифракционной решеткой, с одновременной регистрацией информации обо всем изучаемом спектральном диапазоне.

Предлагаемый подход к обработке изображений в КЭНС состоит в реализации следующих этапов:

- выделение в пространстве RGB кластеров, в которые группируются вектора ЭИ, физически соответствующие фациям (элементарным однородным образованиям, составляющим изображение конкретного аэроландшафта);
- выделение в пространстве RGB кластеров, в которые группируются вектора ТИ, физически соответствующие фациям (элементарным однородным образованиям, составляющим изображение конкретного аэроландшафта);
- определение угла поворота (α) системы кластеров текущего изображения к системе кластеров, обеспечивающего минимальную сумму разницы углов между соответствующими срединными векторами кластеров эталонного и текущего изображений.

Для реализации данного подхода был разработан алгоритм кластеризации векторов RGB изображений местности. Анализ данных, полученный при апробировании приведенного алгоритма на первом тестовом изображении, показал, что средний кластер представляет собой усеченный конус с углом раскрытия $3 - 4^\circ$, высотой $9 - 10$ цветовых единиц и объемом 106 цветовых единиц в кубе. Процент выделяемой части изображения при выделении одного кластера - $3,42\%$ (при идеальных условиях - $3,7\%$). Процент распределения всех пикселей изображения по всем кластерам - 92% . При обработке второго тестового изображения и анализа данных было получено, что средний кластер имеет угол раскрытия $4 - 5^\circ$, высоту $9 - 10$ цветовых единиц и объем 113 цветовых единиц в кубе. Процент выделяемой части изображения при выделении одного кластера - $0,84$ (при идеальных условиях - 1%). Процент распределения всех пикселей изображения по всем кластерам - 83% .

Заключение. Проведенные исследования показали, что кластеры представляют собой достаточно малогабаритные в пространстве RGB элементы, а разработанный алгоритм позволяет выделять большинство элементов ($\sim 80...90\%$) по соответствующим кластерам (число которых составляет от 18 до 51).

Дальнейшие исследования связаны с апробацией разработанного алгоритма кластеризации на изображениях с нерегулярной формой, в качестве которых будут использованы картины. Последним шагом в отработке представленного алгоритма кластеризации является исследование реальных цветных изображений местности, полученных во время съемки с летательного аппарата.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаповалов А.Б., Солунин В.Л., Костюков В.В. Системы управления, наведения и приводы. – М.: Изд. МГТУ ми. Н.Э. Баумана, 2017. - 416 с.
2. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. – М., Наука, 1985. – 328 с.
3. Щербинин В.В. Построение инвариантных корреляционно-экстремальных систем навигации и наведения летательных аппаратов. М.: Изд. МГТУ ми. Н.Э. Баумана, 2011. - 232 с.
4. Степанов О.А., Кошаев Д.А., Моторин А.В. Идентификация параметров модели аномалии в задаче авиационной гравиметрии методами нелинейной фильтрации. // Гироскопия и навигация. – 2015. № 3 (90). С. 95–101.
5. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. // Гироскопия и навигация. 2015. Ч.2 № 3 (90). С. 102–125 и Ч.2 № 4 (91). С. 147–159.
6. Щербинин В.В., Шевцова Е.В., Васильева Ю.С., Чижевская О.М. Методы и алгоритмы функционирования цветной оптической корреляционно-экстремальных систем навигации летательных аппаратов // Гироскопия и навигация. – 2012. - № 4 (79). С. 34 – 49.
7. Щербинин В.В., Шевцова Е.В., Кветкин Г.А., Дегтярев И.О. Сравнительная оценка точностных характеристик цветных и монохромных оптических КЭСНН ЛА // Известия ТулГУ. Технические науки. № 11: в 2 ч. Ч.2. Тула, 2015 г. С. 3 – 18.
8. Щербинин В.В., Шевцова Е.В., Васильева Ю.С. Предварительные результаты оценки сезонной стабильности информативного параметра цветной оптической КЭСНН ЛА // Известия ТулГУ. Технические науки. № 11: в 2 ч. Ч.2. Тула, 2015 г. С. 19 – 27.

9. Щербинин В.В., Шевцова Е.В., Кветкин Г.А., Дегтярев И.О. Исследование характеристик цветной корреляционно-экстремальной системы навигации и наведения летательного аппарата // Известия ТулГУ. Технические науки. № 6. Тула, 2016 г. С. 103 – 112.
10. Щербинин В.В., Шевцова Е.В., Васильева Ю.С. Предварительные результаты оценки влияния геометрических искажений на точностные характеристики цветной оптической КЭСНН ЛА // Известия ТулГУ. Технические науки. № 6. Тула, 2016 г. С. 142 – 146.
11. Щербинин В.В., Шевцова Е.В., Кветкин Г.А., Калинина А.А. Исследование точностных характеристик оптических КЭСНН ЛА для нормированных цветных изображений // Известия ТулГУ. Технические науки. № 11, Ч. 3. Тула, 2016 г. С. 145 – 153.
12. Щербинин В.В., Кветкин Г.А., Пушин А.В., Скибин В.А. Разработка программно-аппаратного комплекса полунатурного моделирования функционирования цветной оптической корреляционно-экстремальной системы навигации и наведения // Известия ТулГУ. Технические науки. № 11, Ч. 3. Тула, 2016 г. С. 75 – 85.
13. Щербинин В.В., Кветкин Г.А., Пушин А.В., Шевцова Е.В. Линеаризация функции преобразования цифрового цветного фотоаппарата для обработки изображений цветной оптической КЭСН // Известия ТулГУ. Технические науки. № 3. Тула, 2018 г. С. 3 – 11.
14. Щербинин В.В., Кветкин Г.А., Пушин А.В., Шевцова Е.В. Модернизация программно-аппаратного комплекса полунатурного моделирования функционирования цветной оптической корреляционно-экстремальной системы навигации и наведения // Известия ТулГУ. Технические науки. № 5. Тула, 2018 г. С. 3 – 11.

К.А. Bezrukova (АО «СРІАН»). **Image clustering algorithms for color optical correlation and extreme aircraft navigation system**

Abstract. An algorithm for clustering images of color optical coordinate-extremal navigation systems of aircraft is proposed. The results of testing the proposed algorithm on two test images are presented. It is shown that clusters in the traditional truncated cone shape are stable elements in RGB space, and the algorithm itself makes it possible to distribute most images into appropriate clusters.

УДК 681.51

В.Б. КОСТОУСОВ

(Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург)

К.В. ДУНАЕВСКАЯ

(Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения РАН,
УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

НОВЫЙ МЕТОД ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОЧНОСТИ В ЗАДАЧЕ НАВИГАЦИИ ПО ПОЛЮ ВЫСОТ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ

Исследуется новый метод вычисления текущей характеристики точности поискового корреляционно-экстремального алгоритма решения задачи навигации по полю рельефа. Метод основан на применении softmax-функции к функционалу сопоставления вектора замеров и карты поля. Приводятся результаты сравнения ранее предложенного способа, нового способа и способа, построенного на основе байесовской теории оценивания.

Введение. Тема доклада относится к задаче навигации по геофизическим полям [1], возникающей по причине необходимости коррекции ошибок инерциальной навигационной системы, которая является основной в системе управления летательным аппаратом.

Ранее в работах [2, 3] были приведены результаты исследования метода вычисления текущей характеристики точности поискового корреляционно-экстремального алгоритма решения задачи навигации [4–5], основанного на определении диаметра множества заданного уровня функционала сопоставления применительно к картам геофизических полей. Однако, его точность сильно отличалась от потенциальной точности, соответствующей байесовскому алгоритму оценивания.

В предлагаемом докладе рассматривается новый способ вычисления оценки и текущей характеристики точности, который основан на применении softmax-функции к функционалу сопоставления вектора замеров и карты поля [2].

Целью доклада является исследование нового способа с ранее предложенным [2] и способом, построенным на основе байесовской теории оценивания.

Новый метод вычисления текущей характеристики точности. Пусть решается задача коррекции погрешностей навигационной системы по карте поля высот рельефа. Обозначим символом $s(\vec{x})$ функцию, заданную в некоторой прямоугольной области Ω плоскости R^2 и описывающую зависимость значений поля рельефа от координат. Пусть двумерный вектор \vec{x} погрешностей навигационной системы принадлежит априорной области неопределенности Q : $\vec{x} \in Q \subset \Omega \subset R^2$. Модель измерения поля на борту движущегося объекта представима в виде $\varphi_k = s_k(\vec{x}) + \xi_k$ ($k = 1, \dots, m$), где φ_k – измеренное значение поля, ξ_k – погрешность k -го измеренного значения поля. Набор значений $\vec{\varphi} = (\varphi_1, \dots, \varphi_m)^T$ будем называть измеренной реализацией.

В задаче коррекции требуется по указанным исходным данным получить в некотором смысле «хорошую» оценку $\hat{\vec{x}}(\vec{\varphi})$ неизвестного вектора \vec{x} и вычислить её текущую характеристику точности.

Предлагается новый метод вычисления текущей характеристики точности, основанный на использовании softmax-функции. Данная функция применяется при решении задач многоклассовой классификации с помощью нейронных сетей. В рамках задачи корреляционно-экстремальной навигации такую функцию можно интерпретировать как плотность распределения вероятностей погрешностей определения координат, что схоже с апостериорной плотностью, используемой в байесовском методе.

Рассмотрим квадратичный функционал сопоставления $\Phi_{\vec{\varphi}}(\vec{x})$, основанный на приращении по некоторому априорному параметру ω :

$$\Phi_{\vec{\varphi}}(\vec{x}) = \sum_{k=1}^m [(s_k(\vec{x}) - s_{k+\omega}(\vec{x})) - (\varphi_k - \varphi_{k+\omega})]^2,$$

далее к которому применим softmax-функцию:

$$f^*(\vec{x}/\vec{\varphi}) = \text{softmax} \left(-\frac{1}{2\hat{\sigma}^2} \Phi_{\vec{\varphi}}(\vec{x}) \right) = \frac{e^{-\frac{1}{2\hat{\sigma}^2} \Phi_{\vec{\varphi}}(\vec{x})}}{\sum_{\vec{x} \in \Omega} e^{-\frac{1}{2\hat{\sigma}^2} \Phi_{\vec{\varphi}}(\vec{x})}}$$

Здесь $\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum_{k=1}^m (s_k(x_{min}) - \varphi_k)^2}{m}$, x_{min} – точка глобального минимума функционала сопоставления $\Phi_{\vec{\varphi}}(\vec{x})$.

Таким образом, предлагается заменить апостериорную функцию плотности вероятностей, используемую в байесовском подходе, на функцию $f^*(\vec{x}/\vec{\varphi})$ для вычисления оценки $\hat{\vec{x}}(\vec{\varphi})$ и апостериорной матрицы ковариации ошибок оценивания [6, 66 с]:

$$\hat{\vec{x}}(\vec{\varphi}) = \int \vec{x} f^*(\vec{x}/\vec{\varphi}) d\vec{x},$$

$$P(\vec{\varphi}) = \int (\vec{x} - \hat{\vec{x}}(\vec{\varphi})) (\vec{x} - \hat{\vec{x}}(\vec{\varphi}))^T f^*(\vec{x}/\vec{\varphi}) d\vec{x}.$$

Преимуществом такой замены является низкая вычислительная сложность по сравнению с вычислением апостериорной плотности. К примеру, для вычисления функции $f^*(\vec{x}/\vec{\varphi})$ потребовалось $N_{v3} = 1024$ узлов, в то время как для вычисления апостериорной плотности методом Монте-Карло потребовалось $N_{MK} \approx 100000$ точек.

Результаты исследования. В табл. 1 приведены результаты эксперимента по сравнению трёх способов вычисления оценки и текущей характеристики точности: нового, ранее предложенного и байесовского. В данном эксперименте вектор погрешностей измерений формировался с помощью модели ошибок, состоящей из ошибок измерения абсолютной высоты, ошибок высотомера и ошибок картографирования. При этом ошибка измерения абсолютной высоты включала в себя случайный постоянный сдвиг и линейный уход, генерируемые по нормальному закону с известными характеристиками.

Таблица 1

Результаты эксперимента по сравнению нового, ранее предложенного и байесовского способов вычисления оценки и текущей характеристики точности

	Новый способ		Ранее предложенный способ		Байесовский способ	
	$\bar{\delta}$	$\bar{\rho}$	$\bar{\delta}$	$\bar{\rho}$	$\bar{\delta}$	$\bar{\rho}$
Информативный рельеф ($\sigma = 29.85$ м)	62	42	72	71	37	36
Слабоинформативный рельеф ($\sigma = 1.72$ м)	1269	1189	1699	1539	974	993

В таблице (1): $\bar{\delta}$ – усредненная действительная радиальная ошибка коррекции (в метрах), $\bar{\rho}$ – усредненная радиальная текущая характеристика точности, вычисленная как квадратный корень из суммы элементов матрицы ковариации ошибок оценивания (в метрах).

Заключение. Ранее предложенный способ, как было уже отмечено выше, основан на определении диаметра множества уровня функционала сопоставления, который задается априорным параметром r_p [2]. В рамках байесовского подхода необходимо располагать информацией об априорной плотности распределения искомого вектора и плотности распределения вектора погрешностей. Новый предполагаемый нами метод не предъявляет строгих требований к знанию апостериорной плотности. По результатам эксперимента видно, что по точности он существенно ближе к потенциальной точности, обеспечиваемой при применении оптимального байесовского алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г. И., Чигин Г. П. Основы навигации по геофизическим полям. М.: «Наука», 1985. 328 с.

2. Дунаевская К.В., Киселев Л.В., Костоусов В.Б. Исследование метода вычисления текущей характеристики точности в задаче навигации по картам геофизических полей // Гироскопия и навигация. 2021, № 1(112), с. 52-69.
3. Дунаевская К. В. Исследование метода вычисления текущей характеристики точности в задаче навигации по полю микрорельефа / Материалы XXIV конференции молодых ученых с международным участием. – СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. С.137-139.
4. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч.1. Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация, 2015, № 3 (90), с. 102-125.
5. Степанов О.А., Торопов А.Б. Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч.2. Современные тенденции // Гироскопия и навигация, 2016, № 1 (91), с. 147-159.
6. Методы обработки навигационной измерительной информации (<http://books.ifmo.ru/file/pdf/2217.pdf>) / О.А. Степанов. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 196 с.

V.B. Kostousov, K.V.Dunaevskaya (N.N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, UrFU named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, Ekaterinburg). **A new method for calculating the current accuracy characteristic in the navigation problem through the elevation field of relief terrain**

Abstract. The report is devoted to the research of a new method for calculating the current characteristic of the accuracy of the search correlation-extreme algorithm for solving the problem of navigation through the relief field.

The proposed method is based on the application of the softmax-function to the matching functional of the measurement vector and the field map.

The results of the comparison of the previously proposed method, the new method and the method based on the Bayesian estimation theory are presented.

УДК 681.51

Э. Д. ЧУРЯЕВ, А.В. БОЛЬШАКОВА, Р.В. ШАЛЫМОВ
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова
(Ленина), Санкт Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕКРЕСТНЫХ СВЯЗЕЙ В КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ВАГОН-РЕЛЬСОВЫЙ ПУТЬ НА ИНЕРЦИАЛЬНЫЙ МЕТОД ДИАГНОСТИКИ РЕЛЬСОВЫХ ДЕФЕКТОВ

В работе оценивается перераспределение энергии между элементами колебательной системы «вагон-рельсовый путь» и анализируется возможность учета перераспределенной энергии с помощью сигналов акселерометров.

Введение. Железнодорожный транспорт является одним из важнейших видов грузовых и пассажирских перевозок, и для обеспечения максимальной безопасности необходимо своевременно выявлять и устранять дефекты пути, в том числе и дефекты поверхности катания рельсов. Одним из методов выявления таких дефектов является инерциальный метод [1], реализуемый системой измерения коротких и импульсных неровностей (КИН) [2]. Основой системы КИН является инерциальные измерительные модули (ИИМ), установленные на буксовых узлах тележки вагона. При прохождении дефекта колесом акселерометр, входящих в состав установленного на этом колесе ИИМ, регистрирует значительное увеличение вертикальной составляющей ускорения. Критерием наличия предполагаемого дефекта является корреляция сигналов с акселерометров установленных на впереди и следом идущем по одному рельсу колесам. Затем оцениваются параметры неровности: длина и глубина. Если рассмотреть полученные сигналы, то можно сделать вывод, что при проезде одним из колес неровности, часть энергии этого воздействия переходит на другие части системы, где регистрируется акселерометрами, установленными на соседних колесах. При оценке параметров дефекта рельса по показаниям акселерометров, перераспределенная энергия в системе может вносить погрешность, поэтому для более точных результатов необходимо при обработке сигналов акселерометров производить учет её влияния. Таким образом можно сформулировать задачи анализа влияния перекрестных связей в системе вагон-рельсовый путь на показания акселерометров КИН и разработки метода учета этого влияния в показаниях датчиков.

Анализ сигналов акселерометров. Сигналы акселерометров, установленных на буксовых узлах тележки вагона, предварительно нормируются по скорости движения состава, чтобы исключить влияние скорости на амплитуду полученных сигналов.

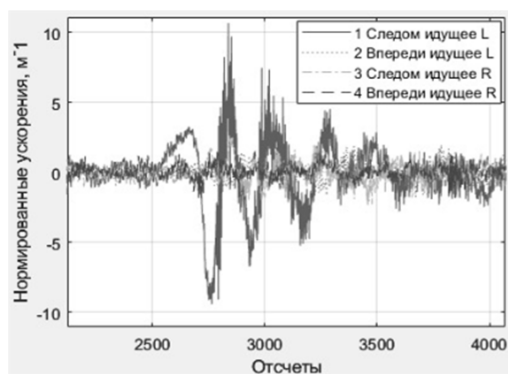


Рис. 1. Ускорения акселерометров при проезде участка рельсов с дефектом

Далее для оценки перераспределения энергии выбираются такие участки пути, где дефект есть только на одном рельсе, чтобы исключить взаимное влияние двух дефектов, расположенных на разных рельсах.

На рисунке 1 приведены нормированные ускорения акселерометров при проезде дефекта одним из колес (обозначение “L” и “R” относят сигналы к одному из рельсов, левому и правому соответственно).

Как видно из рисунка 1 при прохождении одним колесом неровности (колесо 1), часть энергии передается остальным трем колесам, причем большая — колесу той же колесной пары (колесо 3).

Расчет коэффициентов перекрёстного влияния.

Для численного анализа перераспределения энергии можно рассчитать амплитудно-частотный спектр сигнала с помощью преобразования Фурье и найти отношение максимальной амплитуды одного сигнала ко всем остальным, таким образом получая амплитудный коэффициент пе-

редачи сигнала в системе от одной части к другой. На рисунке 2 приведен амплитудно-частотный спектр для сигналов, представленных на рисунке 1.

В рамках исследования было проанализировано несколько десятков различных участков, по полученным спектрам были рассчитаны коэффициенты перераспределения энергии.

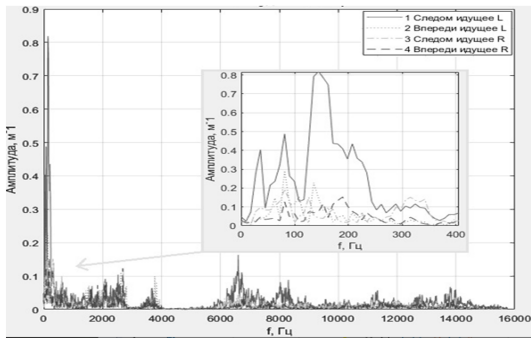


Рис. 2. Амплитудно-частотный спектр сигнала

Учет амплитудные коэффициенты передачи. Учитывая амплитудные коэффициенты передачи в системе, показания акселерометров можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} a_1^{\text{ИЗМ}} &= a_1 + a_3K_1 + a_2K_2 + a_4K_3, \\ a_2^{\text{ИЗМ}} &= a_2 + a_4K_1 + a_1K_2 + a_3K_3, \\ a_3^{\text{ИЗМ}} &= a_3 + a_1K_1 + a_4K_2 + a_2K_3, \\ a_4^{\text{ИЗМ}} &= a_4 + a_2K_1 + a_3K_2 + a_1K_3, \end{aligned}$$

где: $a_i^{\text{ИЗМ}}$ – показания i -ого акселерометра, a_i – искомые ускорения колёс (без составляющих сигналов от ударов на соседних колесах), K_1 – коэффициенты передачи (K_1 – часть энергии, переданная колесу той же колесной пары, K_2 – колесу, находящему на том же рельсе, K_3 – колесу по диагонали) [3].

Для проверки сходства двух сигналов (на впереди идущем колесе и на следом идущем) после учета коэффициентов можно воспользоваться корреляцией, рассчитать её до учета и после, если корреляция станет больше, то перераспределение энергии учтено верно. На рисунке 3 приведен пример изменения корреляции сигналов для одного из участков до и после учета коэффициентов.

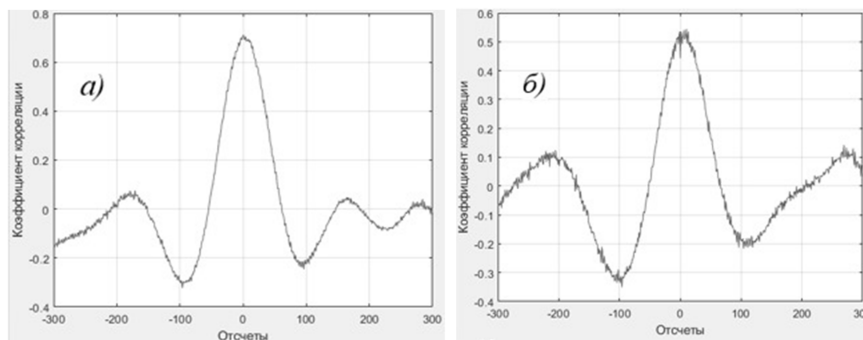


Рис. 3. Корреляция сигналов до (слева) и после (справа) учета коэффициентов перераспределения энергии

Как видно из рисунка 3, корреляция сигналов уменьшилась. На других участках после применения коэффициентов в основном корреляция уменьшалась (на $\sim 0.1-0.2$), кроме нескольких случаев, где она увеличивалась (на $\sim 0.01-0.02$).

Заключение. В работе описан подход к оценке перераспределения энергии в колебательной системе вагон рельс с использованием масштабных коэффициентов перераспределения. Наибольшая часть энергии входного воздействия (удара вследствие прохождения колесом дефекта) перераспределяется на колесо той же колесной пары (28%). На следом идущую колес-

ную пару – 16%. Оценка и учет влияния перекрестных связей в алгоритме определения дефектов поверхности катания системы КИН повысит точность не только выявления дефектов, но и определения их параметров.

Для оценки возможности учета влияния перекрестных связей в тележке вагона с применением представленной в работе линейной модели применялся корреляционный анализ. После применения коэффициентов перераспределения, степень схожести сигналов уменьшается, что говорит о некорректности предложенной модели для решения задачи диагностики рельсового пути. Для устранения данного недостатка, предполагается производить учет перекрестной связи не одним коэффициентом, а передаточной функцией некоторого вида.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Подгорная Л. Н.** “Разработка и исследование интегрированной инерциальной системы диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах”, Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург – 2010. С. 54-65
2. Распоряжение ОАО "РЖД" № 2499р от 23.10.2014 Об утверждении и введении в действие инструкции "Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и острodefектных рельсов".
3. **Большакова А.В.** “Анализ вибраций в системе “вагон – рельсовый путь””, Материалы XXI конференции молодых ученых с международным участием. Под общей редакцией В. Г. Пешехонова. 2019, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), С. 198-200.

E.D. Churyaev, A.V. Bolshakova, R.V. Shalymov (ETU “LETI”, Saint Petersburg). **“Investigation of the influence of cross-couplings in the oscillatory system car-rail track on the inertial method of diagnostics of rail defects”**

Abstract. The paper assesses the redistribution of energy between the elements of the oscillatory system "car-rail track", and also analyzes the possibility of accounting for the redistributed energy using accelerometer signals.

УДК 65.012.122

В.Г. КАРАУЛОВ, А.М. ГРУЗЛИКОВ
(АО Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург)

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ АЛГОРИТМА ПРИВЕДЕНИЯ АНПА ПО ДАННЫМ ОТ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯКОВ

Приведены результаты апробации алгоритма навигации автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) с использованием высокочастотной гидроакустической системы приведения ближнего радиуса действия на натурных данных при различных начальных параметрах движения АНПА. Результаты получены при проведении обработки в испытательном бассейне.

Введение. В докладе предлагается решение задачи навигации с использованием высокочастотной гидроакустической системы приведения ближнего радиуса действия в интересах решения задачи стыковки к базовой станции. Указанная задача не является новой, однако в литературе обычно рассматривается приведение АНПА при помощи маяков-ответчиков [1-4]. Отличием настоящей работы является использование только излучателей на базовой станции для выполнения стыковки.

Гидроакустическая система приведения имеет в своем составе приёмные антенны, которые размещаются под килем АНПА в кормовой и носовой частях, а также излучатели, устанавливаемые по краям базы и осуществляющие ненаправленное излучение сигнала (рисунок 1) [5-7]. Следует отметить, что в качестве излучаемых сигналов используются тональные сигналы одной частоты с разнесением по времени излучения таким образом, чтобы по периоду обнаружения сигнала можно было однозначно идентифицировать источник излучения.

Приведение АНПА предполагает маневрирование аппарата и последовательное его приближение к базе, что приводит к необходимости решения задач определения координат и углов ориентации относительно базы при различной акустической видимости излучателей приёмными элементами антенн.

Целью данной работы является описание результатов эксперимента, поставленного в испытательном бассейне АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», посадки макета АНПА к макету базовой станции при разных скоростях и расположении относительно геометрического центра аппарата.

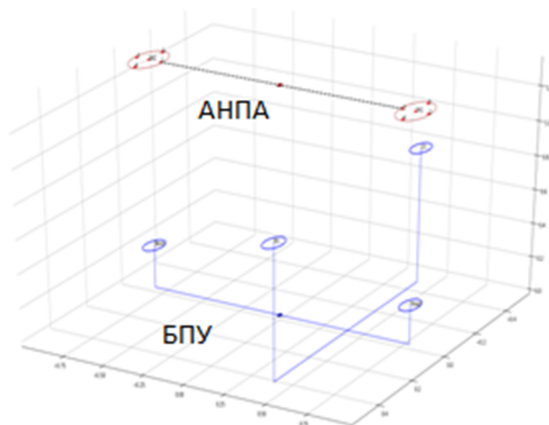


Рис. 1. Схема размещения гидроакустической системы АНПА и базовой станции.

Постановка задачи навигации и описание алгоритма её решения. Для решения задачи приведения требуется определить относительные координаты центра x, y, z и углы ориентации α, β, γ АНПА по измерениям времени получения фронта сигнала приёмным элементом АНПА от гидроакустических излучателей базовой станции.

Определим расстояние от точки излучения до точки приёма для первой зоны (видимость всех излучателей) по времени распространения сигнала:

$$r_i^j = (\hat{t}_i^j - (t + T^{1,j}))c, \quad (1)$$

где r_i^j – расстояние, найденное по разнице времени излучения и приёма сигнала, $i = 1 \dots 10$ – индекс приёмных элементов АНПА, $j = 1 \dots 4$ – индекс излучателей, \hat{t}_i^j – измеренное время приёма сигнала, t – время начала излучения 1-м маяком, $T^{1,j}$ – смещение времени излучения между 1 и j маяком (соответствует временной диаграмме последовательности излучения), c – скорость звука в среде.

Определим расстояние от точки излучения до точки приёма для первой зоны, исходя из положения аппарата:

$$d_i^j = \sqrt{(x + \Delta x_i - x^j)^2 + (y + \Delta y_i - y^j)^2 + (z + \Delta z_i - z^j)^2}, \quad (2)$$

где d_i^j – расстояние между излучателем и приёмным элементом, (x, y, z) – координаты центра АНПА; (x^j, y^j, z^j) – координаты j -го маяка; $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ – смещение i -го приёмного элемента относительно центра АНПА с учётом углов ориентации аппарата можно записать:

$$(\Delta x_i \ \Delta y_i \ \Delta z_i)^T = M_x(\alpha)M_y(\beta)M_z(\gamma)(x_i \ y_i \ z_i)^T, \quad (3)$$

где матрицы поворота имеют вид:

$$M_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}; \quad (4)$$

$$M_y(\beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{pmatrix}; \quad (5)$$

$$M_z(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где (x_i, y_i, z_i) – известное смещение i -го приёмного элемента относительно центра АНПА без учета ориентации; (α, β, γ) – углы ориентации АНПА; $M_x(\alpha), M_y(\beta), M_z(\gamma)$ – матрицы поворота осей системы координат связанной с АНПА.

Решение задачи состоит в нахождении оценок $\hat{\theta} = (\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}, \hat{\alpha}, \hat{\beta}, \hat{\gamma}, \hat{t}, \hat{c})$ относительных координат и углов ориентации АНПА, а также времени излучения сигнала первым маяком и скорости звука в воде по полученным измерениям путем минимизации следующей функции:

$$\hat{\theta}_1 = \min_{\theta} \sum_{i=1}^{10} \sum_{j=1}^4 (r_i^j - d_i^j)^2. \quad (7)$$

При маневрировании АНПА можно выделить три зоны видимости приёмниками различных излучателей:

- зона 1 – в зоне видимости каждой антенны находятся все четыре излучателя;
- зона 2 – в зоне видимости каждой антенны находятся три излучателя;
- зона 3 – в зоне видимости каждой антенны находятся по одному излучателю.

При нахождении АНПА в зоне 1, последовательно решаются следующие задачи:

1. Обнаружение сигналов от маяков базового устройства;
2. Идентификация маяков согласно временной диаграммой последовательности излучений;
3. Решение системы алгебраических уравнений для определения координат и углов ориентации АНПА с использованием псевдодалномерного метода [8-9].

При нахождении АНПА в зоне 2, решение задачи совпадает с решением задачи при нахождении АНПА в зоне 1, за исключением уменьшения числа уравнений (исключение носового / кормового излучателя соответственно).

Решение задачи определения координат АНПА в зоне 3 возможно только при помощи прогнозирования времени излучения сигнала от известного маяка причального устройства, т.е. использование оценок времени излучения полученных в результате прохождения АНПА зоны 1 и 2.

Система алгебраических уравнений решалась с помощью метода наименьших квадратов (МНК), применялся итерационный алгоритм Левенберга-Марквардта [10], где в качестве исходных значений устанавливались координаты и углы ориентации АНПА, полученные с использованием метода машинного обучения с учителем [11]. Обучающая выборка была сформирована исходя из решения геометрической задачи на заданной координатной сетке и таблицы углов ориентации. В качестве функции расстояния была выбрана манхэттенская метрика.

Результаты. По результатам апробации алгоритма навигации в испытательном бассейне при последовательном перемещении макета АНПА из зоны 1 в зону 3 были построены зависимости среднеквадратического отклонения (СКО) оценки координат центра подводного аппарата от высоты. Все измерения проводились при движении аппарата при максимальном удалении (при нахождении на поверхности) до базовой станции. На рисунке 2 представлены зависимости СКО оценки координат от высоты при расположении макета АНПА по центру причального устройства с разными скоростями погружения.

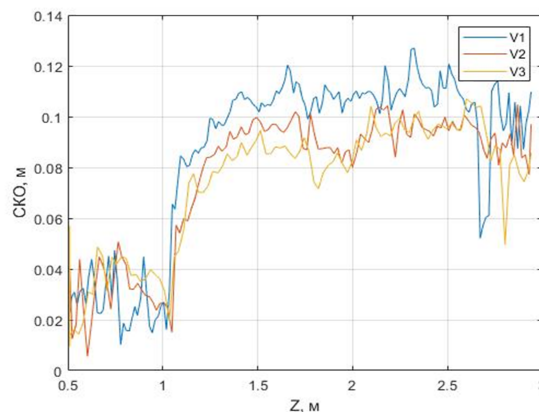


Рис. 2. Зависимость СКО оценки координат от высоты при вертикальном спуске по центру базовой станции при разных скоростях погружения ($V_3 > V_1 > V_2$).

Заключение. Проведена апробация алгоритма навигации макета АНПА в испытательном бассейне с использованием подъемно-поворотного устройства при перемещении АНПА относительно макета базовой станции. Результаты работы алгоритма показали, что СКО координат АНПА не превышает 13 см при различных скоростях движения АНПА и уменьшается при сокращении дистанции до причального устройства.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФ № 22-29-00339.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Матвиенко Ю. В.** Гидроакустический комплекс навигации подводного робота: Дис. ... канд. Тех. Наук: 01.04.06/ Матвиенко Юрий Викторович. Владивосток, 2004 – с. 271.
2. **Инзарцев А. В., Матвиенко Ю. В., Рылов Н. И. и др.** Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике, Подводные исследования и робототехника. – 2007. №2. С. 5-14.
3. **Romeo J., Lester G.** Navigation is Key to UAV Misiions, Sea Technology. 2001. – V0.42. - №12. – P. 24-29
4. **Neira, Javier & Sequeiros, Cristhel & Huamani, Richard & Machaca, Elfer & Fonseca, Paola & Nina, Wilder.** Review on Unmanned Underwater Robotics, Structure Designs, Materials, Sensors, Actuators, and Navigation Control. Journal of Robotics. 2021. 1-26.
5. **А.М. Gruzlikov,** ‘Short and Ultra-Short Baseline Navigation of the AUV for Bringing It to the Bottom Docking Device’, in 2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), 2022, pp. 1–3.
6. **Грузликов А.М., Караулов В.Г., Мухин Д.А., Шалаев Н.А.** Результаты апробации алгоритма позиционирования и определения ориентации подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 1. – С. 265-275.

7. **Кошаев Д.А.** Относительное позиционирование и определение ориентации автономного необитаемого подводного аппарата по данным от гидроакустических маяков // Гирскопия и навигация. – Том 30. №4 (119). – 2022. – С. 122–141
8. **Барabanов О. О., Барabanова Л. П.** Математические задачи дальномерной навигации, Физматлит, М., 2007
9. **Прохорцов А. В., Минина О. В.** Аналитическое решение навигационной задачи на основе псевдодальномерного метода, Известия ТулГУ. Технические науки. 2020. Вып. 11 с. 395 - 398
10. **Измаилов А. Ф., Куренной А. С., Стецюк П. И.** Метод Левенберга-Марквардта для задачи безусловной оптимизации, Вестник Тамбовского университета. Серия: естественные и технические науки. Тамбов, 2019. Т. 24. № 125. С. 60-74.
11. **Вьюгин В.В.** «Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования» М.: 2013. - 387 с.

V.G. Karaulov, A.M. Gruzlikov (Concern CSRI Elektropribor, Saint Petersburg, Russia). **The results of testing the AUV docking algorithm based on data from hydroacoustic beacons**

Abstract. The results of approbation of the AUV navigation algorithm using a high-frequency hydroacoustic short-range reduction system, based on full-scale data at various initial parameters of the AUV movement, are presented. The results were obtained during testing in the test pool.

УДК 681.51

Е.А.БОРИСОГЛЕБСКАЯ
(Санкт-Петербургский государственный университет)

УСКОРЕННЫЙ АЛГОРИТМ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ЦЕЛЕЙ

В работе рассмотрено ускорение алгоритма по отслеживанию движущихся целей при наличии влияния произвольных, но ограниченных по амплитуде помех. Ускоряемый алгоритм представляет собой комбинацию алгоритма стохастической аппроксимации и протокола локального голосования. Ускорение достигается при помощи метода Нестерова. Также в работе представлены результаты моделирования, подтверждающие работоспособность разработанного алгоритма.

Введение. В современном мире средства беспроводной коммуникации активно развиваются, чем вызывают повышенный интерес к возможностям их использования для сенсорных сетей. Чаще всего рассматривается интеллектуальное отслеживание летательных аппаратов (самолетов, квадрокоптеров), животных и др. Для быстрой обработки информации и принятия решения сеть сенсоров организуется в виде мультиагентной системы (МАС), в которой каждый сенсор выступает в качестве агента.

В работе для отслеживания целей предлагается использование совмещенного рандомизированного алгоритма стохастической аппроксимации и ускоренного протокола локального голосования. Такой алгоритм основан на SPSA (simultaneous perturbation stochastic approximation) [1], что является частным случаем стохастического алгоритма градиентного спуска. Важная особенность SPSA — это способность решать оптимизационные проблемы при наличии произвольных неизвестных (но ограниченных) помех и изменяющихся во времени параметров системы [2]. Эти неопределенности не должны быть случайными, и даже если они случайны, их статистические характеристики знать не обязательно. В работе [3] приведен алгоритм, совмещающий в себе SPSA и протокол локального голосования. В настоящей работе рассматривается ускоренная версия алгоритма — протокол локального голосования ускоряется по методу Нестерова для задач трекинга [4].

Постановка задачи. Пусть существует распределенная сеть, состоящая из m отслеживаемых целей и датчиков слежения. Введем обозначения: $N = \{1, 2, \dots, n\}$ — набор всех сенсоров, d — размерность пространства, $s^i = [s^{i,1}, \dots, s^{i,d}]^T$ — множество координат сенсора i , $M = \{1, 2, \dots, m\}$ — набор всех целей, $r_t^l = [r_t^{l,1}, \dots, r_t^{l,d}]^T$ — множество координат цели l в момент времени t , $\theta_t = \text{col}(r_t^1, \dots, r_t^m)$ — общий вектор состояния всех целей в момент времени t . Предположим, что сенсоры как узлы сети могут обмениваться друг с другом информацией о расстоянии до целей согласно некоторой динамически меняющейся топологии сети. Для простоты дальнейших вычислений будем считать, что количество соседей каждого сенсора совпадает с размерностью пространства. Обозначим через $N_t^i \subset N$ набор соседей, с которыми сенсор i может обмениваться сообщениями в момент времени t . Пусть в каждый момент времени t сенсор i измеряет квадрат расстояния до цели l и получает квадрат расстояния от d соседних сенсоров $j_1, \dots, j_d \in N_t^i$ до этой же цели. Необходимо найти вектор оценок местоположения целей $\hat{\theta}_t = \text{col}(\hat{r}_t^1, \dots, \hat{r}_t^m)$.

Алгоритм решения. Точное местоположение цели l в момент времени t : $r_t^l = [C_t^{i,l}]^{-1} D_t^{i,l}$,

$$C_t^{i,l} = 2 \begin{bmatrix} (s^{j_1} - s^i)^T \\ \dots \\ (s^{j_d} - s^i)^T \end{bmatrix}, D_t^{i,l} = \begin{bmatrix} \bar{\rho}_t^{i,j_1}(l) + \|s^{j_1}\|^2 - \|s^i\|^2 \\ \dots \\ \bar{\rho}_t^{i,j_d}(l) + \|s^{j_d}\|^2 - \|s^i\|^2 \end{bmatrix}, \bar{\rho}_t^{i,j}(l) = \|r_t^l - s^i\|^2 - \|r_t^l - s^j\|^2,$$

Научный руководитель: д.ф.-м.н., профессор Граничин О.Н.

где $i \in N$ – сенсор, на котором производятся вычисления, $j_1, \dots, j_d \in N_t^i$.

Сенсор i в момент времени t измеряет квадрат расстояния до цели l с помехами $w_t^{i,l}$:

$$u_t^{i,l} = \|r_t^l - s_t^l\|^2 + w_t^{i,l}.$$

Пусть задано вероятностное пространство (Ω, F, P) , соответствующее произвольному множеству Ω с σ -алгеброй всех событий F и вероятностной мерой P . Обозначим σ -алгебру всех вероятностных событий, которые произошли до времени t , как F_t . Пусть E_{F_t} – условное математическое ожидание относительно σ -алгебры F_t . Чтобы определить точно местоположение цели, необходимо найти минимум функции потерь F_t :

$$f_t(\hat{r}_t^l) = \|C_t^{i,l} \hat{r}_t^l - D_t^{i,l}\|^2, \\ F_t(\hat{\theta}_t) = \sum_{l \in M} E_{F_{t-1}} f_t(\hat{r}_t^l) \rightarrow \min(\hat{\theta}_t). \quad (1)$$

Оценки координат целей $\hat{\theta}_t$ формируются по зашумленным измерениям оптимизируемой функции $y_t^{i,l}(x_t^l) = \|x_t^l - r_t^l\|^2 + \psi^l = f_t(x_t^l) + \psi^l$, где x_t^l – точка наблюдения, v_t^i – ограниченный шум, зависящий от взаимного расположения сенсоров и помех $w_t^{i,l}$.

Распределенный мультиагентный алгоритм, представленный ниже, совмещает в себе два подхода, а именно SPSA и ускоренный по методу Нестерова протокол локального голосования:

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{2k}^i = \hat{\theta}_{2k-2}^i + \beta \Delta_k^i, x_{2k-1}^i = \hat{\theta}_{2k-2}^i - \beta \Delta_k^i, \\ \gamma_{2k+2} = (1 - \alpha_{2k}) * \gamma_{2k} + \alpha_k * (\mu - \eta), \\ z_{2k} = \frac{1}{\gamma_{2k} + \alpha_{2k}(\mu - \eta)} (\alpha_{2k} \gamma_{2k} v_{2k} + \alpha_{k+2} \hat{\theta}_{2k-2}^i), \\ \tilde{g}_{2k} = \sum_{j \in N_{2k-2}^i} (\hat{\theta}_{2k-2}^{i,j} - z_{2k}), \\ \hat{\theta}_{2k}^i = \hat{\theta}_{2k-2}^i - \left(\frac{\alpha(y_{2k}^i - y_{2k-1}^i)}{2\beta} \Delta_k^i + h \tilde{g}_k \right), \\ v_{2k+2} = \frac{1}{\gamma_{2k}} [(1 - \alpha_{2k}) \gamma_{2k} v_{2k} + \alpha_k (\mu - \eta) z_{2k} - \alpha_{2k} \tilde{g}_{2k}], \end{array} \right. \quad (2)$$

где $\alpha, \beta, \gamma, \eta$ – параметры алгоритма; k – шаг алгоритма такой, что $t = 2k$; $\hat{\theta}_{2k}^i$ – общий вектор оценок местоположения всех целей, полученных сенсором i в момент времени t ; $\hat{\theta}_{2k}^{i,j}$ – общий вектор оценок местоположения всех целей, полученных сенсором i от сенсора j в момент времени t ; Δ_k^i – принимает значения $\pm 0,5$ согласно распределению Бернулли с вероятностью $0,5$; x_k^i – обновленные оценки местоположения объекта, для которых вычисляется значения функции потерь y_k^i и затем значение шага SPSA; μ – коэффициент строгой выпуклости; v_k – вспомогательная переменная для ускорения по Нестерову; z_k – обновленная оценка местоположения целей для вычисления протокола локального голосования на основе предыдущих шагов; k – шаг алгоритма.

Моделирование. Рассмотрим двумерный случай, при котором три сенсора следят за целью,

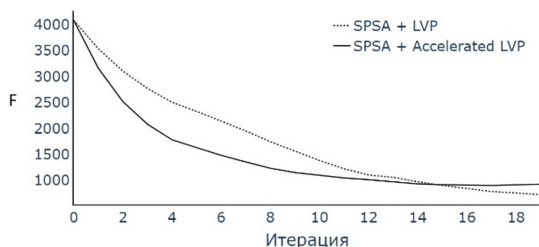


Рис. 1. Сравнение алгоритма стохастической оптимизации объединенного с протоколом локального голосования (-) с ускоренным алгоритмом (--).

в каждый момент времени сенсоры могут общаться между собой. Пусть помехи представляют собой поочередные периодические колебания в окрестности $+1$, в окрестности -1 с амплитудой $1/2$ и частотой $1/(2\pi)$ [5]. Параметры в выражении (3) заданы следующими величинами: $L = 7, \mu = 0.8, h = 0.1, \eta = 0.7, \gamma_0 = 0.09, \alpha_0 = 0.05, \alpha = 0.1, \beta = 0.5$.

Результат моделирования представлен на рис. 1. Как видно на рисунке алгоритм, использующий ускоренный протокол локального голосования, сходится быстрее.

Заключение. В настоящей работе рассмотрен ускоренный алгоритм для определения местоположения летательных аппаратов в условиях влияния произвольных, но ограниченных по амплитуде помех. Также в работе приведено моделирование исходного и ускоренного алгоритмов.

Работа проводилась при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых российских ученых (МК-372.2022.4)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Spall, J.C.** Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1992. 37(3), pp.332–341.
2. **Bar-Shalom Y., Daum F., and Huang J.**, “The probabilistic data association filter,” *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 29, no. 6, pp. 82–100, 2009.
3. **Granichin O., Erofeeva V., Ivanskiy Y., and Jiang Y.**, “Simultaneous perturbation stochastic approximation-based consensus for tracking under unknown-but-bounded disturbances,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 66, no. 8, pp. 3710–3717, 2020.
4. **Kosaty D., Vakhitov A., Granichin O., and Yuchi M.**, “Stochastic fast gradient for tracking,” in *2019 American Control Conference (ACC)*. IEEE, pp. 1476–1481, 2019.
5. **Граничин О.Н., Поляк Б.Т.**, Рандомизированные Алгоритмы Оценки и Оптимизации при почти произвольных помехах. – М., Наука, 2003. – с.133.

E.A.Borisoglebskaia (St.Petersburg State University, St.Petersburg). **Accelerated Algorithm For Tracking**

Abstract. The acceleration of the algorithm for tracking moving targets under conditions of uncertainty is considered. Algorithm that is being accelerated is a combination of the stochastic approximation algorithm and the local voting protocol. Acceleration is carried out by means of the Nesterov method. Simulation results are presented to confirm the performance of the algorithm.

УДК 681.51

Д. А. СЕВАСТЮК

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ЗАДАЧА ТРАЕКТОРНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ

В работе приводится постановка задачи траекторного сопровождения движущихся объектов по данным измерений пеленга. Рассматривается метод решения задачи с использованием алгоритма многогипотезного сопровождения траекторий, включая его различные модификации.

Введение. Отслеживание движущихся объектов – задача, решение которой востребовано в широком спектре областей: от сопровождения самолётов и кораблей в системах освещения обстановки, до наблюдения в микроскоп живых клеток. Несмотря на то, что имеются известные и описанные в литературе решения [1], в последние годы активно ведутся исследования по их усовершенствованию, а также разрабатываются новые алгоритмы [2]. Стоит отметить, что разнообразие известных методов решения задачи траекторного сопровождения зависит от системы наблюдения, для которой она разрабатывается. Например, в случае использования активных средств локации при наблюдении за объектом, на входе задачи сопровождения используется информация не только по пеленгу получения отражённого сигнала, но также используются оценки по дистанции до объекта, оценки скорости объекта (полученные по смещению частоты - эффекту Доплера) и т.д. При применении пассивной системы наблюдения, набор исходной информации существенно сокращается и, как следствие, использование широкого класса известных методов траекторного сопровождения становится непригодным и/или такие методы обладают низкой эффективностью для практического применения.

Предлагаемый доклад посвящён описанию задачи траекторного сопровождения движущихся объектов при использовании пассивной системы наблюдения и рассмотрению одного из наиболее актуальных алгоритмов её решения – алгоритма многогипотезного сопровождения (Multiple Hypothesis Tracking, МНТ), приводятся подходы по его усовершенствованию [2, 3, 4].

Постановка задачи. Задачу можно описать как построение траекторий объектов на основе измеренных сигналов, излучаемых объектами при отсутствии априорной информации о принадлежности сигналов конкретным объектам.

Предполагается, что имеется система, получающая в дискретные упорядоченные моменты времени данные измерений сигналов, характеризующие положение наблюдаемых объектов в пространстве (отметки) [5]. В каждый момент времени может быть получено произвольное количество отметок, и каждая отметка представляет собой данные об обнаружении (наличия) не идентифицированного объекта в пространстве в соответствующий момент времени. Однако отсутствие отметки может быть пропуском обнаружения, а наличие - ложным обнаружением.

Под траекторией понимается упорядоченный набор отметок, строго возрастающих по времени получения, содержащий все полученные отметки какого-либо одного предполагаемого объекта. В общем виде, задача состоит в выборе такого набора траекторий, что каждая полученная отметка содержится не более чем в одной траектории, и каждая траектория соответствует реальной траектории какого-либо из рассматриваемых объектов.

Поскольку при работе с натурными данными вопрос соответствия предполагаемых траекторий реальным объектам не всегда имеет известный верный ответ (может не быть возможности получения таких данных), для оценки качества решения задачу можно рассматривать как оптимизационную, по какому-либо критерию, характеризующему это качество. Таким критерием может быть, например, СКО ошибки при наличии данных о предполагаемом характере модели движения объектов, которое следует минимизировать.

Научный руководитель: к.т.н. Грузликов А.М.

Алгоритм многогипотезного сопровождения. Алгоритм МНТ основан на пошаговом продолжении траекторий, с шагом на каждый момент времени получения отметок, и формировании гипотез о возможных вариантах траекторий [1]. Пусть после момента времени t_0 измерения проводились для M моментов времени t_1, t_2, \dots, t_M . Тогда каждый k -й шаг алгоритма (для k от 1 до M) будет состоять из следующих этапов:

1. Стробирование для траекторий, отслеживаемых на предыдущий момент времени (t_{k-1}).
2. Построение новых локальных гипотез по данным на рассматриваемый момент времени (t_k) с учётом предшествующих данных (за время t_{k-1}).
3. Построение новых глобальных гипотез на рассматриваемый момент времени (t_k).
4. Выбор новой глобальной гипотезы по критерию отношения правдоподобия.
5. Управление локальными гипотезами для уменьшения вычислительной сложности.

Среди различных вариаций МНТ предлагается обратить внимание на основанный на деревьях траекторно-ориентированный МНТ с вычислением веса гипотез с помощью отношения правдоподобия, имеющий более широкие возможности для уменьшения вычислительной сложности на 4 и 5 этапах, чем другие версии МНТ [1, 2].

Стробирование траекторий. Стробирование - для каждой рассматриваемой после предыдущего шага траектории, определение области значений отметок (строба), которые будут считаться подходящими для возможного продолжения этой траектории на текущем шаге. Отметки, расположенные вне такой области, считаются заведомо не принадлежащими этой траектории, что позволяет снизить вычислительную сложность, уменьшив количество рассматриваемых на следующих этапах вариантов отождествления. Различные методы стробирования подробно описаны в существующей литературе [1]. Предлагается использовать эллипсоидное стробирование, основанное на расстоянии Махаланобиса [3].

Построение локальных гипотез. Локальная гипотеза – предположение о том, что конкретной траектории принадлежит конкретная рассматриваемая на текущем шаге отметка, или не принадлежит ни одна из них. В том числе локальные гипотезы строятся и для возможных новых траекторий – такая гипотеза будет иметь вид «отметка z принадлежит траектории T », где z – обозначение отметки, а T – новая траектория, начинающаяся в z . На этом этапе строятся все возможные с учётом стробирования локальные гипотезы для текущего шага.

Построение глобальных гипотез. Глобальная гипотеза – набор совместимых локальных гипотез, покрывающий все траектории предполагаемых объектов, уже сопровождаемые на текущем шаге, и все отметки текущего шага. Локальные гипотезы считаются совместимыми, если никакие две из них не включают одну и ту же отметку текущего шага или траекторию предыдущего, и покрывающими все отметки и уже сопровождаемые траектории, если каждая отметка текущего шага и траектория предыдущего входят в какую-либо из этих гипотез.

Выбор глобальной гипотезы. Можно определить численный показатель «веса» траектории, характеризующий её «качество», называемый логарифмическим отношением правдоподобия (Log-Likelihood Ratio, LLR). Для новой траектории LLR вычисляется следующим образом:

$$LLR_{new} = \log \frac{\lambda_{new}}{\lambda_{FA}}, \quad (1)$$

где: LLR_{new} – начальный LLR новой траектории на текущем шаге, λ_{new} и λ_{FA} – ожидаемые пространственные плотности (количества на единицу объёма пространства) истинных обнаружений новых объектов и ложных обнаружений соответственно.

Для последующих шагов можно вычислять LLR траекторий рекуррентно:

$$LLR_k = LLR_{k-1} + L\Delta LR_k, \quad (2)$$

где: LLR_k и LLR_{k-1} – LLR траектории на шагах k и $k-1$ соответственно, $L\Delta LR_k$ – изменение LLR при добавлении в траекторию отметки z_k на шаге k .

При наличии отметки, соответствующей траектории, $L\Delta LR_k$ вычисляется как:

$$L\Delta LR_{new} = \log \frac{P_D p(z_k | Z^{k-1})}{\lambda_{FA}}, \quad (3)$$

где: P_D – вероятность обнаружения, λ_{FA} – ожидаемая плотность ложных обнаружений, z_k – отметка на текущем шаге (за момент времени t_k), Z^{k-1} – история отметок траектории за прошлые шаги (все отметки траектории за моменты времени с t_1 по t_{k-1}), $p(z_k | Z^{k-1})$ – функция правдоподобия принадлежности z_k траектории при условии Z^{k-1} .

Значение указанной функции правдоподобия можно найти с помощью применения к отметкам траектории фильтра Калмана [3, 6], на основе используемых в нём величин [4, 7].

При отсутствии отметки, соответствующей траектории, $L\Delta LR_k$ вычисляется как:

$$L\Delta LR_{new} = \log(1 - P_D P_G), \quad (4)$$

где: P_D и P_G – вероятности обнаружения и стробирования соответственно.

Вероятность глобальной гипотезы выражается через вероятности входящих в неё локальных гипотез, которые можно получить из их веса, после чего выбирается наиболее вероятная глобальная гипотеза. Также выбор лучшей глобальной гипотезы по LLR локальных можно представить как задачу о назначениях или задачу линейного программирования [1, 2].

Управление локальными гипотезами. Выше описан принцип работы алгоритма с рассмотрением гипотез на один шаг вперёд относительно сопровождаемых траекторий, однако МНТ предполагает работу с гипотезами на несколько шагов вперёд. Локальные гипотезы, не принадлежащие лучшей глобальной, не отбрасываются, и на каждом следующем шаге локальные гипотезы строятся как продолжения каждой локальной гипотезы предыдущего шага, а не только «лучших». Основанный на деревьях траекторно-ориентированный МНТ можно рассматривать как метод скользящего окна размером в n шагов. На шаге k каждая рассматриваемая траектория представлена деревом высоты не более n . Корнем дерева представляется часть траектории вплоть до шага $k-n$, либо локальная гипотеза о возникновении новой траектории, если она не сопровождалась на шаге $k-n$. Для последующих шагов вплоть до k поддерживаются все локальные гипотезы для этой траектории как вершины дерева на соответствующей их шагу высоте, каждая гипотеза – как потомок гипотезы предыдущего шага, от которой она образована. Например, при $n = 2$ для сопровождаемой вплоть до шага $k-2$ траектории T листом дерева может быть гипотеза вида « T продолжается отметкой $z_{k-1,i}$, затем отметкой $z_{k,j}$ », являющаяся потомком гипотезы « T продолжается отметкой $z_{k-1,i}$ », которая в свою очередь является потомком корня. Здесь $z_{k-1,i}$ – отметка на шаге $k-1$, $z_{k,j}$ – отметка на шаге k . Под глобальной гипотезой шага k тогда понимается набор совместимых локальных гипотез шага k , покрывающих все сопровождаемые на шаге $k-n$ траектории и все отметки шагов с $k-n+1$ по k , а задача о назначениях приобретает многомерный вид (Multi-Frame Assignment, MFA) [2].

Поддержание полного набора локальных гипотез для большого количества шагов значительно влияет на вычислительную сложность, поэтому для её снижения в процессе выполнения алгоритма число поддерживаемых локальных гипотез уменьшается. Для этого предлагается использовать метод отсечения локальных гипотез (N-scan pruning) [2], поддерживающий постоянный размер окна обзора исключением из рассмотрения некоторых менее вероятных гипотез таким образом, что при переходе к следующему шагу у корня дерева сопровождаемой траектории остаётся только один потомок, становящийся новым корнем. Также может использоваться кластеризация/объединение схожих локальных гипотез [1].

Заключение. Описан алгоритм многогипотезного сопровождения, включая его расширение, представляющее интерес для создания пассивной системы наблюдения – решение задачи траекторного сопровождения движущихся объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коновалов А.А.** Основы траекторной обработки радиолокационной информации. Спб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 164 с.

2. **Ba-Ngu Vo, Mahendra Mallick, Yaakov Bar-Shalom, Stefano Coraluppi, Richard Osborne, III, Ronald Mahler, Ba-Tuong Vo.** Multitarget tracking. Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 2015.
3. **Gustaf Hendeby, Rickard Karlsson.** Target tracking. Linköping university, 2019.
4. **Roger R. Labbe Jr.** Kalman and Bayesian Filters in Python. 2020.
5. **Воронина Н.Г.** Решение задачи сопровождения траекторий морских объектов по угломерной информации. Подводные исследования и робототехника, 2019, №3 (29). с. 13-23.
6. **Хмарский П.А., Солонар А.С.** Особенности реализации адаптивных дискретных фильтров Калмана при косвенных измерениях. Доклады БГУИР, 2012, №8 (70). с. 57-63.
7. **Бар-Шалом Я., Ли Х.-Р.; пер. с англ. Дмитриева Д.Д.** Траекторная обработка. Принципы, способы и алгоритмы. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 271 с.

D.A.Sevastyuk (ITMO University, CSRI Electropribor, Saint-Petersburg). **Problem of trajectory tracking of moving objects**

Abstract. Report describes the problem of trajectory tracking of moving objects. It justifies the importance of considering modern solutions of this problem, provides problem statement and describes a version of a relevant algorithm for its solution, including various enhancements.

УДК 681.51

Е. А. КЕЛЛЕР, К. А. ШАБАНОВ
(НПП «Авиационная и Морская Электроника», Санкт-Петербург)

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДВИЖНОГО АВТОНОМНОГО РОБОТА

В работе рассматривается кинематическая модель робота с полным приводом и полным управлением, которая должна обеспечивать независимое управление всеми колесами робота. Описано аналитическое решение обратной задачи кинематики для построения системы управления. Приводится сравнение кинематики с полным приводом и полным управлением с кинематикой Аккермана и кинематикой роботов на основе дифференциального привода.

Введение. В настоящее время в различных сферах жизнедеятельности человека большое распространение получили мобильные роботы. Производственные предприятия, логистические компании, военные производства, медицинские учреждения, исследовательские лаборатории и т.п. стремятся к повышению эффективности работы, увеличению производительности, точности и безопасности. Все это возможно благодаря внедрению инновационных мобильных роботов во все сферы жизни человека [1-2]. Мобильный робот представляет собой сложный механизм, который способен самостоятельно передвигаться в пространстве. Самый важный момент для всех движущихся объектов – это кинематика, так как от правильно выбранной кинематики робота будет зависеть его дальнейшая эффективность и функциональные возможности. Существует множество различных вариантов построения кинематики колесных роботов, которые имеют как свои плюсы, так и минусы. Например, с дифференциальным приводом и характерной для него кинематикой, которая широко используется благодаря низкой стоимости, простоте программирования и контроля. Такая система является голономной, то есть обладает неограниченной подвижностью [3-4]. Известна также кинематика Аккермана, которая обеспечивает поворот передних колес на нужные углы для выполнения заданного маневра. Ее недостатком на практике является сильно ограниченный радиус поворота. Кроме того, роботы с кинематикой Аккермана имеют голономные ограничения, то есть не могут двигаться в любом направлении [5-6]. Ограничения, связанные с кинематикой Аккермана преодолевает разработанная технология 4WS4WD («4 Wheel Steer, 4 Wheel Drive» – кинематика с полным приводом и полным управлением). Целью работы является аналитическое решение обратной задачи кинематики для построения системы рулевого управления.

Описание системы 4WS4WD. Система 4WS4WD – это технология, которая обеспечивает независимое управление всех четырех колес мобильного робота. Изначально эта методика использовалась в спецтехнике, военной и строительной технике, но в силу своего удобства и большой эффективности начинает получать распространение во всех отраслях. Выделим основные преимущества, которые имеет эта система: возможность без ограничений изменять радиус кривизны траектории и возможность перемещения точки, вокруг которой происходит вращение по всей горизонтальной плоскости [7-9].

Постановка задачи. Главное отличие технологии 4WS4WD от других кинематик заключается в возможности перемещаться в любом направлении. Входными данными, которые мы получаем с задающего устройства для решения задачи будут:

- линейная скорость центра масс робота V ;
- направление движения робота θ , то есть курс движения робота, положительное значение угла соответствует движению по часовой стрелке;
- радиус поворота робота R , т.е. радиус кривизны траектории, по которой движется робот, положительное значение соответствует движению по часовой стрелке; вместо радиуса может быть задана угловая скорость.

Научный руководитель: доцент кафедры Филатов Д.М.

Требуется на основании перечисленных входных данных решить обратную задачу кинематики и определить:

- угол отклонения каждого колеса $\delta_{FL}, \delta_{FR}, \delta_{RL}, \delta_{RR}$ (рис. 1);
- скорости перемещения каждого колеса $V_{FL}, V_{FR}, V_{RL}, V_{RR}$.

Решение обратной задачи кинематики. Для управления рулевой системой мобильного робота необходимо решить обратную задачу кинематики. На рис. 1 схематично показано решение для 4WS4WD робота при произвольно заданных курсе θ , радиусе кривизны траектории R (угловой скорости ω) и скорости V .

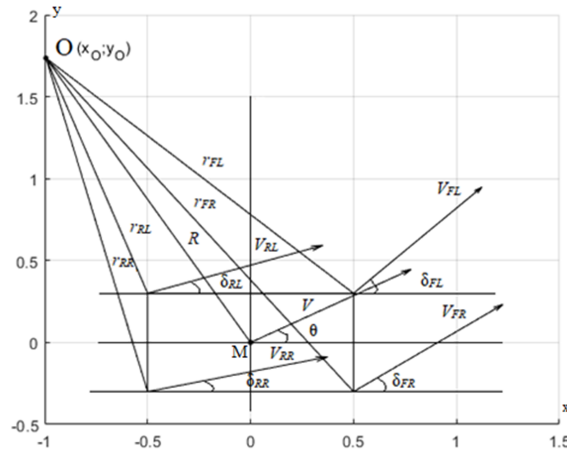


Рис. 1 Схема решения обратной задачи кинематики для 4WS4WD робота

На рис.1 приведены следующие условные обозначения: (x, y) – система координат, связанная с роботом; M – центр масс робота; O – точка пересечения оси вращения с горизонтальной плоскостью $\delta_{FL}, \delta_{FR}, \delta_{RL}, \delta_{RR}$ – углы отклонения переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес соответственно; $r_{FL}, r_{FR}, r_{RL}, r_{RR}$ – радиусы кривизны траектории движения переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес соответственно.

Из рисунка видно, что каждое колесо проходит по различающимся между собой траекториям с различными радиусами кривизны: внешние колеса проезжают большее расстояние, чем внутренние. При этом во избежание бокового скольжения все колеса должны поворачивать на разные углы: внутренние колеса должны иметь больший угол поворота, чем внешние.

Определим способ решения обратной задачи кинематики для углов, радиусов кривизны траектории и скоростей всех колес. Выбрав на плоскости точку O , как центр вращения робота, необходимо из нее провести прямые к центрам колес, это будут их радиусы кривизны их траектории. Колеса поворачиваем перпендикулярно к этим прямым, так как направления движения и скорости при повороте будут касательными к окружности. Это будет соответствовать углам отклонения колес $\delta_{FL}, \delta_{FR}, \delta_{RL}, \delta_{RR}$.

Сначала необходимо определить координаты центра масс M и точки O робота, затем координаты всех колес. Зная координаты центра вращения и координаты колес, можно определить радиусы окружностей, по которым будут двигаться колеса. Углы вращения колес определяются для двух разных случаев: при положительной и отрицательной угловых скоростях робота. Далее, считая, что весь робот движется с одной угловой скоростью, будет нетрудно определить угловые и линейные скорости всех четырех колес.

Заключение. В работе описано решение обратной задачи кинематики. На ее основе появляется возможность разработать комплекс программного обеспечения для рулевой системы управления для независимого управления всеми четырьмя колесами мобильного робота в конфигурации 4WS4WD. Следует отдельно отметить, что каждое колесо такого робота должно быть оснащено приводным и рулевым двигателями, например, бесколлекторным двигателем

постоянного тока для приведения во вращение колеса и шаговым двигателем для его поворота. Вся система должна быть оснащена датчиками обратной связи для синхронизации скоростей и углов поворота всех колес в каждый момент времени. В противном случае возможно возникновение боковых сил, действующих на колеса, которые могут затруднить перемещение и ускорить износ двигателей и колес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bodrenko A. "New Method of Using Mobile Robots for Moving Cargo in Warehouse," *Bulletin of Science and Practice*. 2019. 5(6). pp. 192-211;
2. Кизилов С.А., Бойцова М.С. "Мобильный робот для применения в трубопроводах," *Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения*. 2015. с. 291-295;
3. Рассадин Ю.М., Шинкарюк А.Г. "Адаптивное управление мобильным колёсным роботом с дифференциальным приводом," *Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого)*. 2018. с. 353-355;
4. Кутафин А.А., Захаркина С.В. "Разработка системы управления дифференциальным приводом робота," *Сборник научных трудов кафедры автоматизации и промышленной электроники*. 2021. с.76-80;
5. Frankovský P., Gmitterko A., Dominik L., Hroncová D., Virgala I., Miková L. "The use of geometric mechanics concept to modeling of Ackerman steered car-like vehicle," *EAN 2017 - 55th conference on experimental stress analysis*. 2017. pp. 748-751;
6. Иоффе М.Л. "Принцип Аккермана и его реализации в современных автомобилях," *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2021. с. 40-47;
7. Spentzas K.N., Alkhezali I., Demic M. "Kinematics of four-wheel-steering vehicles," *Forschung im ingenieurwesen*. 2001. pp. 211-216;
8. Itoh H., Oida A., Yamazaki M. "Numerical simulation of a 4wd-4ws tractor turning in a rice field," *Journal of terramechanics*. 1999. pp. 91-115;
9. Верзун А.Н., Савинов Н.А., Коробкин В.В., Ступаков Э.П., Бажутин Д.В., Мирошник Д.Н., Захаров А.В., Вережкин А.В. "Разработка мобильного робота с четырехколесным рулевым механизмом и полным приводом," *Инновационные перспективы Донбасса*. 2021. с. 139-143.

E. A. Keller, K.A. Shabanov (Joint-Stock Company Science & Production Enterprise "Air & Marine Electronics", the city of St. Petersburg). **Kinematic model of a mobile autonomous robot**

Abstract. The paper considers a kinematic model of a robot with all-wheel drive and full control, which should provide independent control of all the wheels of the robot. An analytical solution of the inverse kinematics problem for building a control system is described. The kinematics with all-wheel drive and full control are compared with Ackerman kinematics and kinematics of robots based on differential drive.

УДК 681.51

О.В. ОСЬКИНА
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ ВЕКТОРА СОСТОЯНИЯ ГЕНЕРАТОРА МУЛЬТИГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА

В работе рассматривается мультигармонический сигнал, представленный как выходной сигнал линейного генератора. Параметры сигнала: фазы и амплитуды гармоник считаются известными, а частоты – неизвестными. Предполагается, что измерению доступна только выходная переменная системы. Ставится задача синтеза динамической системы, обеспечивающей оценку вектора состояния генератора сигнала по измерениям выходной переменной, а также формирование оценки самого сигнала на заданный момент времени и его прогноза на заданный период времени. Приводятся результаты моделирования, подтверждающие сходимость оценки к истинным значениям.

Введение. Задача построения наблюдателя за параметрами мультигармонического сигнала изучается во многих отраслях науки, включая обработку сигналов. Аппроксимация с помощью гармонических сигналов применяется во множестве приложений, в список которых входят коммуникационные системы, системы точного позиционирования и системы динамического позиционирования для судов. В связи с этим были предложены различные методы для оценивания параметров мультигармонических сигналов в непрерывном времени [1...3], однако интерес к задаче остается актуальным до сих пор.

Целью данной работы является исследование применения адаптивных наблюдателей для решения задачи прогнозирования мультигармонических сигналов с неизвестными параметрами.

Постановка и решение задачи. В работе рассматривается линейная динамическая система, являющаяся генератором мультигармонического сигнала (1).

$$y(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(w_i t + \varphi_i), \quad (1)$$

где A_i, φ_i – известная амплитуда и фаза i -той гармоники, w_i – неизвестная частота i -той гармоники, n – известное число гармоник.

Предполагается, что измерению доступна только выходная переменная системы $y(t)$. Решается задача построения динамической системы, обеспечивающей оценку вектора состояния генератора сигнала по измерениям выходной переменной, а также формирование оценки самого сигнала $\hat{y}(t_k)$ на момент времени t_k и прогноза $\hat{y}(t_k + \tau)$ на любое время τ .

Известно [4], что сигнал (1) может быть представлен как решение дифференциального уравнения:

$$(p^2 - \theta_1)(p^2 - \theta_2)(p^2 - \theta_3)...(p^2 - \theta_n)y(t) = 0, \quad (2)$$

где $\theta_i = -w_i^2$, $i = \overline{1, n}$ – постоянные параметры.

Система (2) приводится в пространстве состояний в следующем виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + By(t), \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (3)$$

где $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{2n \times 2n}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ \theta_1^* \\ 0 \\ \vdots \\ \theta_n^* \end{bmatrix}_{2n \times 1}$, $C = [1 \ 0 \ \dots \ 0]_{1 \times 2n}$, $x(0) = \begin{bmatrix} y(0) \\ \dot{y}(0) \\ \vdots \\ y^{(2n-1)}(0) \end{bmatrix}_{2n \times 1}$, а подлежащие

оцениванию параметры $\theta_i^* \ i = \overline{1, n}$, полученные после раскрытия скобок в (2), определяются системой (4)

$$\begin{cases} \theta_1^* = \theta_1 + \theta_2 + \dots + \theta_n, \\ \theta_2^* = -\theta_1\theta_2 - \theta_1\theta_3 - \dots - \theta_{n-1}\theta_n, \\ \vdots \\ \theta_n^* = (-1)^{n+1} \theta_1\theta_2 \dots \theta_n \end{cases} \quad (4)$$

Заметим, что в приведенных выражениях вектор начальных условий $x(0)$ считается неизвестным. Для синтеза наблюдателя используется обобщенный подход к синтезу наблюдателей, основанный на оценке параметров (GPEBO - Generalized parameter estimation-based observers) [5]. Вводится модель наблюдателя:

$$\begin{cases} \dot{\xi}(t) = A_0\xi(t) + Ly(t), \quad \xi(0) = 0_{2n \times 1} \\ \dot{\eta}(t) = A_0\eta(t) + Iy(t), \quad \eta(0) = 0_{2n \times 2n} \end{cases} \quad (5)$$

где I – единичная матрица размерности $2n \times 2n$; L – подобранная матрица обратной связи размерности $2n \times 1$, такая что автономная система $\dot{x}(t) = A_0x(t)$, где $A_0 = A - LC$, является асимптотически устойчивой. При это оценка вектора состояния $x(t)$ определяется, как:

$$\hat{x}(t) = \xi(t) + \eta(t)B,$$

тогда ошибка наблюдателя описывается как:

$$\varepsilon(t) = \hat{x}(t) - x(t) = \xi(t) + \eta(t)B - x(t) \quad (6)$$

Следующим шагом берется производная от ошибки (6):

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}(t) &= \dot{\xi}(t) + \dot{\eta}(t)B - \dot{x}(t) = A_0\xi(t) + Ly(t) + A_0\eta(t)B + Iy(t)B - A_0x(t) - LCx(t) - By(t) = \\ &= A_0(\xi(t) + \eta(t)B - x(t)) = A_0\varepsilon(t) \end{aligned} \quad (7)$$

Решение получившегося дифференциального уравнения (7) имеет вид:

$$\varepsilon(t) = e^{A_0 t} \varepsilon(0) = \Phi(t)\varepsilon(0) \quad (8)$$

где Φ – фундаментальная матрица, $\dot{\Phi}(t) = A_0\Phi(t)$, $\Phi(0) = I_{2n \times 2n}$. Выбирая для системы (5) нулевые начальные условия, получаем $\varepsilon(0) = -x(0)$. Приравняв правые части выражений (6) и (8), получим:

$$\begin{aligned} \xi(t) + \eta(t)B - x(t) &= -\Phi(t)x(0) \Rightarrow \\ \Rightarrow x(t) - \xi(t) &= \eta(t)B + \Phi(t)x(0) \end{aligned} \quad (9)$$

Умножив обе части равенства (9) на вектор-строку C , получим:

$$\begin{aligned}
 Cx(t) - C\xi(t) &= C\eta(t)B + C\Phi(t)x(0) \Rightarrow \\
 \Rightarrow y(t) - C\xi(t) &= [C\eta(t) \quad C\Phi(t)] \begin{bmatrix} B \\ x(0) \end{bmatrix}.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Таким образом, производится преобразование исходной модели (3) к линейной регрессионной модели:

$$z(t) = \Psi(t)\Theta, \tag{11}$$

где $z(t) = y(t) - C\xi(t)$; $\Psi(t) = [C\eta(t) \quad C\Phi(t)]$; $\Theta = \begin{bmatrix} B \\ x(0) \end{bmatrix}$. Вектор B , содержащий параметры θ_i^* , $i = \overline{1, n}$, и вектор начальных условий $x(0)$, полученной регрессионной модели оценивается с использованием метода наименьших квадратов с фактором забывания [6]. Алгоритм оценивания следующий:

$$\begin{aligned}
 \hat{\Theta} &= \gamma F(t)\Psi^T(t)(z(t) - \Psi(t)\hat{\Theta}), \\
 \dot{F} &= \begin{cases} -\gamma F(t)\Psi^T(t)\Psi(t)F(t) + \beta F(t), & \text{если } \|F(t)\| \leq M, \\ 0 & \text{если } \|F(t)\| > M, \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

где $F(0) = \frac{1}{f_0}I$, $\gamma > 0, \beta > 0, f_0 \geq 0, M > 0$ – настраиваемые параметры.

По полученным оценкам строится прогноз $\hat{y}(t_i + \tau)$ согласно следующему выражению:

$$\hat{y}(t_i + \tau) = Ce^{\hat{A}\tau} e^{\hat{A}t} \hat{x}(0), \tag{13}$$

$$\text{где } \hat{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \hat{\theta}_1^* & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ \hat{\theta}_n^* & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}_{2n \times 2n}, C = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]_{1 \times 2n}, \hat{x}(0) = \begin{bmatrix} \hat{y}(0) \\ \hat{y}'(0) \\ \vdots \\ \hat{y}^{(2n-1)}(0) \end{bmatrix}_{2n \times 1}$$

Для демонстрации работы алгоритма проведено моделирование на примере сигнала $y(t) = \sum_{i=1}^4 A_i \sin(w_i t + \varphi_i)$. При моделировании использованы следующие параметры: $A = [1 \quad 2 \quad 3 \quad 4]$, $w = [1 \quad 2 \quad 3 \quad 4]$, $\varphi = [0.1 \quad 0.2 \quad 0.3 \quad 0.4]$, $\gamma = 1e10$; $M = 1e5$; $\beta = 0.01$; $f_0 = 0.1$; Результаты моделирования представлены в соответствии с рисунками 1-3.

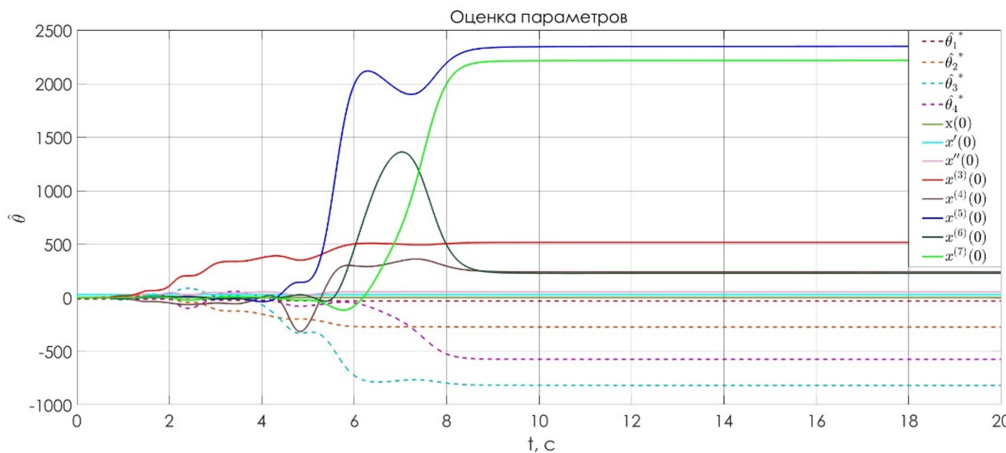


Рис. 1. Результат оценивания параметров θ_i^* , $i = \overline{1, 4}$ и вектора начальных условий $x(0)$

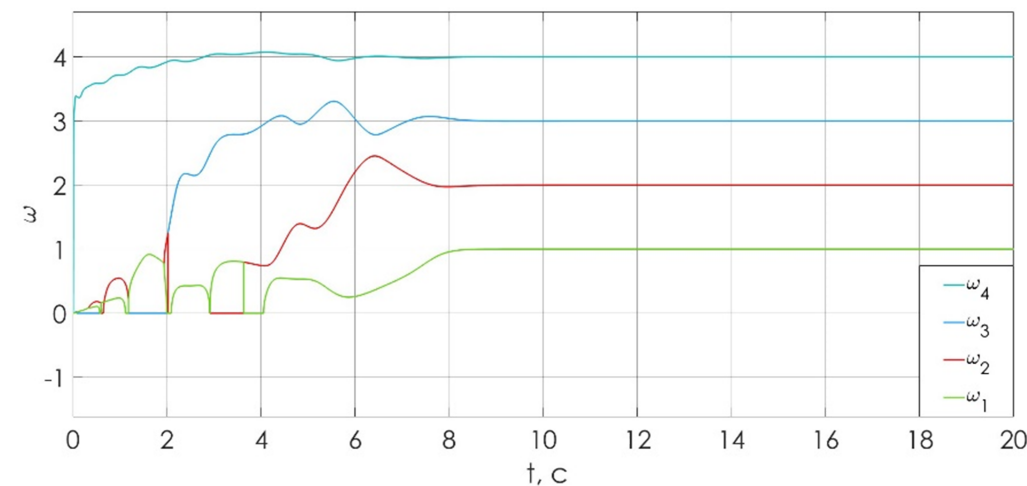


Рис. 2. Результат оценивания частот $\omega_i, i = \overline{1,4}$

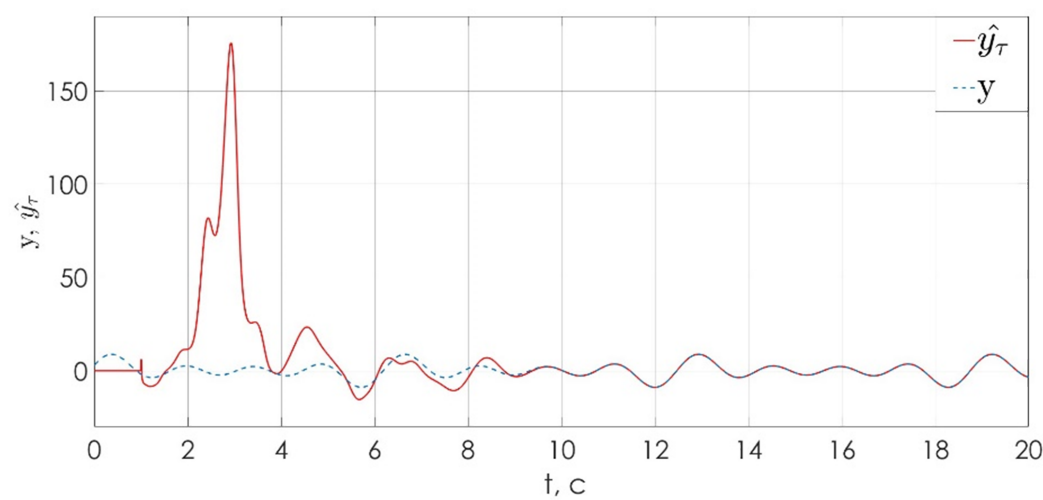


Рис. 3. Результат прогноза при $\tau = 1(c)$

Заключение. В работе предложен алгоритм оценивания вектора состояния и неизвестных параметров линейной динамической системы, являющейся генератором мультигармонического сигнала. Так же показано, что подход GREBO может быть использован для решения задачи прогнозирования. Работоспособность подхода проиллюстрирована математическим моделированием в программной среде MATLAB (Simulink). Результаты моделирования иллюстрируют работоспособность предложенного алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пыркин А. А., Бобцов А. А., Ведяков А. А., Колюбин С. А. Оценивание параметров полигармонического сигнала //Автоматика и телемеханика. – 2015. – №. 8. – С. 94-114.
2. Chen B. et al. Estimation of multi-sinusoidal signals: A deadbeat methodology //2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC). – IEEE, 2016. – С. 3763-3768.
3. Pin G. et al. Identification of multi-sinusoidal signals with direct frequency estimation: An adaptive observer approach //Automatica. – 2019. – Т. 99. – С. 338-345.
4. Бобцов А. А., Колюбин С. А., Пыркин А. А. Компенсация неизвестного мультигармонического возмущения для нелинейного объекта с запаздыванием по управлению //Автоматика и телемеханика. – 2010. – №. 11. – С. 136-148.
5. Ortega R., Bobtsov A., Nikolaev N., Schiffer J., Dochain D. Generalized Parameter Estimation-based Observers: Application to Power Systems and Chemical-Biological Reactors // Automatica. 2021. V. 129. P. 109635.
6. Ljung L. System identification, Signal analysis and prediction, Birkhäuser, Boston, MA, 1998, pp. 163—173.

O.V. Oskina, (ITMO University, Saint-Petersburg). **Adaptive state observer for multi-sinusoidal signal generator**

Abstract. The multi-sinusoidal signal presented as an output of linear generator is considered in the work. The signal parameters (amplitude, frequency, and phase) are unknown. It is assumed that output of the system is measurable. The problem is to design the dynamic system that can provide the estimation of the state vector of the generator using the output measurements, the estimation of the output signal $\hat{y}(t_k)$ and the signal prediction $\hat{y}(t_k + \tau)$. The observer is designed based on method GPEBO (Generalized parameter estimation-based observers). The solution to the estimation problem is based on transforming the signal model to a linear regression equation. The unknown parameters are found by the method of least squares tuning with forgetting factor. The results involve the analysis of the proposed method using computer modeling in the MATLAB(Simulink). The obtained results confirm the convergence of the estimated parameters.

УДК 681.51

В. С. БЫКОВА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СНИМКАХ

Описано применение нейронной сети для распознавания донных объектов различных классов на снимках гидролокатора бокового обзора. Приведен процесс отработки алгоритма обучения нейронной сети и результаты работы нейронной сети на тестовой выборке.

Введение. Одной из функциональных задач автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), является поиск донных объектов. Поиск донных объектов – комплексная задача, выполнение которой состоит из решений следующих проблем:

- определение алгоритмов управления АНПА при поиске донных объектов;
- распознавание донных объектов по данным каждого из средств мониторинга дна.
- комплексная обработка данных от всех средств мониторинга дна для поиска объектов различных типов.

В настоящей работе описывается решение задачи распознавания донных объектов для одного из средств мониторинга дна – гидролокатора бокового обзора.

В работах [1-2] приведены алгоритмы распознавания различных донных объектов на фото и акустических снимках гидролокатора бокового обзора на основе анализа контурных признаков объектов и их характерных точек. Однако натурные эксперименты, описанные в работе [3], показали, что в реальных условиях большая часть назначенных характерных точек не обнаруживается, ввиду чего распознавание осуществляется с недостаточно высокой достоверностью. Работы [4-5] описывают различные алгоритмы применения нейронных сетей для распознавания донных объектов на акустических снимках, которые показывают хорошие результаты.

Целью данной работы является отработка алгоритма обучения и применения нейронной сети для решения задачи распознавания донных объектов на гидроакустических снимках.

Отработка алгоритма обучения нейронной сети. Для классификации рассматривались донные объекты типа «самолет», «протяженный объект», «площадной объект правильной формы». Гидролокационные снимки были взяты из открытых источников [6]. Для увеличения объема обучающей и тестовой выборки для каждого из классов объектов были применены следующие техники аугментации – увеличения данных на основе имеющихся:

- поворот изображения на углы от 0 до 95 градусов;
- масштабирование изображения;
- зеркальное отображение.

В результате аугментации было сформировано 5400 изображений размером 227x227 пикселей, из которых 3600 были обучающими и 1800 тестовыми.

В качестве нейронной сети была выбрана нейронная сеть с глубоким обучением SqueezeNet [5]. Выбор этой сети был обусловлен возможностью проводить её обучение с наименьшими затратами вычислительной мощности. SqueezeNet является сверточной нейронной сетью, содержащей 18 скрытых слоёв обучения). Выбранная нейронная сеть настроена на классификацию изображений объектов различных классов (до 1000) и была проверена на базе данных ImageNet – базы данных аннотированных изображений, предназначенных для тестирования методов распознавания. Для организации процесса переобучения нейронной сети под сформированную выборку настраивались параметры нейронной сети [7] (скорость обучения, количество эпох обучения, функция оптимизации обучения и т.д.) таким образом, чтобы ошибка обучения нейронной сети имела постепенно убывающее значение, а вероятность распознавания на обучающей выборке стремилась к стопроцентной.

Научный руководитель: д.т.н, проф., начальник НИЦ Машошин А.И.

Далее работа обученной нейронной сети проверялась на изображениях донных объектов из тестовой выборки, некоторые из которых представлены на рисунке 1.

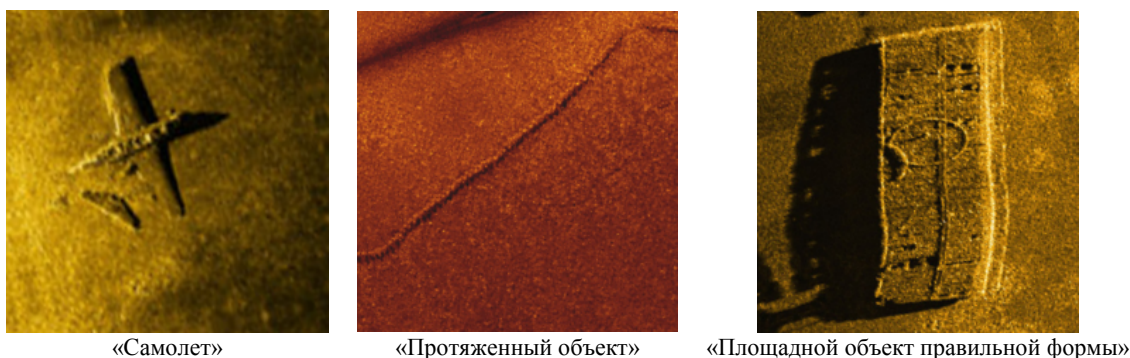


Рис. 1. Пример гидролокационных изображений тестовой выборки

Результатом классификации нейронной сетью является вектор вероятностей, который определяет принадлежность входного изображения ко всем заданным классам обучающей выборки. При этом было принято условие, что объект является классифицированным правильно, если его вероятность правильного распознавания к одному из классов более 60%.

Полученные результаты работы нейронной сети. Результаты работы нейронной сети на тестовой выборке приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Результаты распознавания донных объектов с помощью нейронной сети на тестовой выборке

Класс	Вероятность правильного распознавания	Вероятность ложной тревоги
«Самолет»	0,75	0,385
«Протяженный объект»	0,87	0,07
«Площадной объект правильной формы»	0,81	0,12

Из таблицы следует, что объекты класса «протяженный объект» нейронная сеть распознает с наилучшими показателями вероятности правильного распознавания и ложной тревоги.

Заключение. В работе описана отработка алгоритма по обучению нейронной сети на изображениях донных объектов различных классов. Для этого были сформированы обучающая и тестовая выборки, используя методы аугментации, проведена настройка параметров обучения нейронной сети SqueezeNet. Проверка обученной нейронной сети на тестовой выборке показала высокие вероятности правильной классификации донных объектов.

Работа проводилась при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

ЛИТЕРАТУРА

1. Павин А.М. Идентификация подводных протяженных объектов на акустических снимках гидролокатора бокового обзора / Приборы. 2009. №12 с 43-50
2. Павин А.М. Идентификация подводных объектов произвольной формы на фотоснимках морского дна // Подводные исследования и робототехника. 2011. №2(12)
3. Inzartsev A.V., Panin M.A., Bobkov V.A., Morozov M.A. Model solution of the problem of inspection of industrial equipment facilities with the help of ANPA based on the method of video recognition of characteristic points // Underwater research and robotics. 2021. No.3 (37). pp.23-35.
4. Gerg I., Williams D. Additional Representations for Improving Synthetic Aperture Sonar Classification Using Convolutional Neural Networks // Proc. 4th International Conference on SAS/SAR. 2018. V.40. P.11–22.
5. Williams D. Underwater Target Classification in Synthetic Aperture Sonar Imagery Using Deep Convolutional Neural Networks // Proc. of ICPR. 2016.
6. <https://www.edgetech.com/underwater-technology-gallery>

7. Iandola F.N., Han S., Moskewicz M.W., Ashraf K., Dally W.J., Keutzer K. SqueezeNet: AlexNet-level accuracy with 50x fewer parameters and <0.5Mb model size // Under review as a conference paper at ICLR. 2017. P. 1-13.
8. Глубокое обучение / Николенко С., Кадури А., Архангельская Е. Спб.:Питер, 2018. – 480с.

V.S.Bykova (SRC Electropibor, JSC , Saint-Petersburg). **Application of a neural network for solving the problem object recognition on sonar images.**

Abstract. The application of a neural network for recognition of bottom objects of various classes in side-scan sonar images is described, as well as the process of developing a neural network training algorithm, and the results of the neural network operation on a test sample are presented.

УДК 004.94

В. В. ПРОКОПОВИЧ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ ЛИНЕЙНОЙ АНТЕННЫ

Рассматривается вопрос формирования характеристики направленности в интересах проведения моделирования на примере линейной антенны. Описаны существующие способы построения характеристик направленности антенны. Предложен альтернативный подход сокращения времени расчета, проведен качественный сравнительный анализ предложенного и существующих подходов.

Введение. Решение задачи вычисления характеристики направленности (ХН) актуально как в прогнозных расчетах эффективности работы гидроакустической станции, так и при моделировании её работы. При выполнении прогнозных расчетов практически отсутствуют требования к вычислительной сложности, однако при проведении моделирования актуальна задача вычисления ХН в режиме реального времени для множества заданных частот и пространственных направлений. Кроме прямого расчета с использованием фазирующих векторов [1] используется вычисления ХН на основе обеспечения её ширины по уровню 0,7 от максимума на основе гауссовой, либо sinc моделей [2]. Однако такой подход показывает неудовлетворительные результаты для углов фазирования, отличных от нормали к антенне (рис.1), а именно отсутствие асимметрии (свойственной для реальных систем) и некорректность ширины ХН по уровню 0.2 и выше.

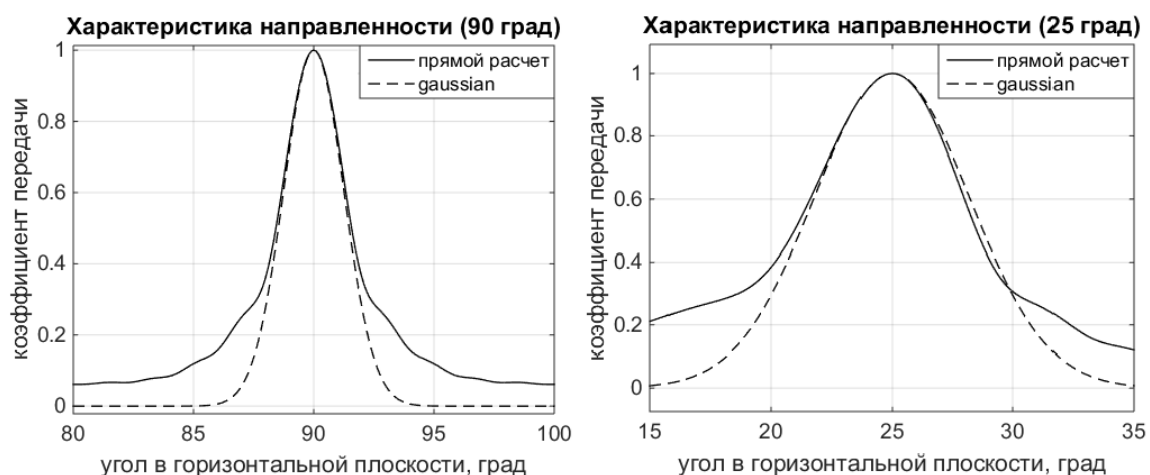


Рис.1. Примеры построения ХН в полосе частот 500-2000 Гц для линейной антенны при прямом расчете и восстановлении формы ХН функцией Гаусса.

В качестве альтернативы в докладе предлагается использовать нейронную сеть при решении задачи вычисления ХН на примере линейной антенны.

Целью работы является синтез нейронной сети для вычисления ХН для фиксированной полосы частот и качественное сравнение результатов её работы с традиционными способами вычисления ХН.

Создание и обучение нейронной сети. Для создания нейронной сети на первом этапе были определены перечни входных (input) и выходных (output) данных:

$$\text{input} = \left\{ \alpha_{comp}, \beta_{comp}, \alpha, \beta \right\}^T, \quad \text{output} = K_d, \quad (1)$$

где $\alpha_{comp}, \beta_{comp}$ – углы фазирования антенной решетки в горизонтальной и вертикальной плоскостях; α, β – углы в горизонтальной и вертикальной плоскостях для расчета коэффициента передачи ХН, K_d – нормированный коэффициент передачи ХН.

Научный руководитель к.т.н. Шафранюк А.В.

Предлагаемая нейронная сеть построена на основе персептрона с одним скрытым слоем. В качестве активационной функции используется стандартная функция Гаусса [3, 4].

Для проведения моделирования использовался пакет программ Matlab с набором стандартных функций для работы с нейронными сетями. В качестве обучающей выборки использовались результаты прямого расчета ХН для заданного множества сеток углов и фиксированной среднегеометрической частоты рабочего диапазона. Тестовая выборка также была получена на основе прямого расчета.

Сравнение результата работы нейронной сети с результатами прямого расчета. Для сравнения были сформированы три нейронные сети с различным количеством нейронов: 10 (NN 10), 20 (NN 20) и 50 (NN 50). Обучающая выборка была сформирована на сетке углов фазирования от 12 градусов до 168 градусов с шагом 5 градусов. Для сравнения с традиционным методом вычисления ХН расчеты проводились на сетке углов от 15 до 165 градусов с шагом 5 градусов. На рис.2 представлены результаты расчета ХН для углов фазирования 90 градусов (перпендикулярно антенне) и 25 градусов.

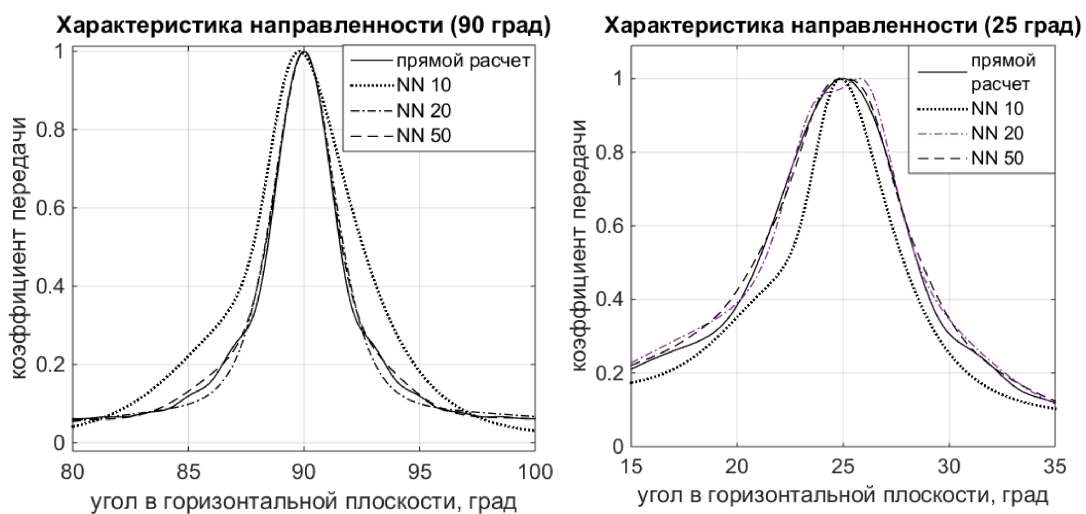


Рис.2 Примеры формирования ХН с использованием нейронных сетей и прямого расчета

При качественном сравнении отметим, что нейронная сеть способна обеспечить достаточное для задач моделирования сходство с результатами прямых расчетов ХН при количестве нейронов (NN 50). При меньшем количестве нейронов можно отметить как некорректную ширину ХН (NN 10), так и смещения максимума ХН (NN 20).

Заключение. Предложенный подход позволяет вычислить ХН антенны для произвольного направления, качественно схожую с результатами прямого расчета. Отметим, что вычисление ХН с использованием нейронной сети для широкой полосы частот значительно быстрее прямых расчетов.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда
(проект 23-29-00803).*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Смарышев М. Д.** Направленность гидроакустических антенн. Л.: Судостроение, 1973. 278 с.
2. **Прокопович В.В., Шафранюк А.В.** Разработка имитаторов входных данных первичной обработки информации в гидроакустических комплексах // В сборнике: Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики. Труды XIV Всероссийской конференции. Сер. "Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики" 2018. С. 585-588.
3. **Пятакович В.А., Василенко А.М., Мироненко М.В.** Нейросетевые архитектуры для решения задач классификации информационных полей морских объектов, методика их обучения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 2017

4. **Пятакович В.А., Василенко А.М., Мироненко М.В.** Обучение нейронной сети как этап разработки экспертной системы для классификации источников физических полей при мониторинге акваторий // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета – 2017 №3(32) – С.138-149
 5. **Шафранюк А.В.** Имитационно-моделирующий комплекс для обеспечения жизненного цикла систем освещения подводной и надводной обстановки // Труды всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» – 2016 –С.314-316
-

V.V. Prokopovich (Concern CSRI Elektropribor, JSC). **Using neural network to calculate the directional characteristics of a linear antenna**

The question of formation of characteristics in the interests of modeling on the example of a linear antenna is considered. The existing methods of constructing the antenna directivity characteristics are given. An alternative approach to reducing the calculation time is proposed, a qualitative comparative analysis of proposed and existing approaches is carried out.

Секция 9.
ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Е. М. ХАЦАНОВА, П. П. ТКАЧЕНКО
(АНО ВО «Университет «Сириус», Сириус, Россия)

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ В ЖИДКОСТИ
ПРИ ЛИНЕЙНОМ И УГЛОВОМ ДВИЖЕНИИ ОБРАЗЦА КОРПУСА
ПОДВОДНОГО ДРОНА**

В работе приводятся результаты эксперимента по исследованию сил сопротивления со стороны реальной жидкости на образец подводного дрона заданной геометрии при линейном и вращательном движениях. По результатам эксперимента получены алгебраические зависимости для плоского движения образца в воде для проверки существующих математических моделей движения подводного дрона в реальной жидкости.

Введение. Для математического моделирования движения объекта в реальной жидкости необходимо знать зависимости сил сопротивления, действующих на объект со стороны жидкости, от различных характеристик: параметров объекта, характеристик жидкости и планируемых параметров движения [1-3]. Во многих исследовательских работах упомянуто о существующих трудностях в теоретическом моделировании таких зависимостей [4]. Предлагаемый доклад посвящен экспериментальному определению зависимостей сил сопротивления в жидкости при прямолинейном и угловом движении корпуса дрона.

Постановка задачи. Для подводного дрона (далее – образца) заданной геометрии [5] (рис. 1) необходимо определить значения сил и моментов сопротивления, действующих со стороны воды, при плоскопараллельном движении вдоль осей x , y и при вращательном движении относительно неподвижной оси z при различных линейных и угловых скоростях движения соответственно. Все эксперименты проводятся без изменения глубины погружения образца.

Результаты экспериментов. В первом эксперименте, в аквариуме, заполненном водой, было реализовано прямолинейное перемещение образца вдоль оси x (рис. 1) на расстояние 400 мм. Для каждой из 100 скоростей v в диапазоне от 0 до 0,25 м/с было получено 100 значений сил лобового сопротивления F_x , снятых с датчика. На рис. 2А изображена зависимость силы сопротивления жидкости перпендикулярной направлению движению и её дисперсия. Значения были обработаны с помощью фильтра низких частот с частотой среза в 5 Гц. Полученные результаты лучше аппроксимировала линейная зависимость, чем квадратичная (рис. 2.Б – В). Ниже представлена полиномиальная зависимость силы сопротивления F_x вдоль оси x от скорости движения v , аппроксимирующая данные эксперимента:

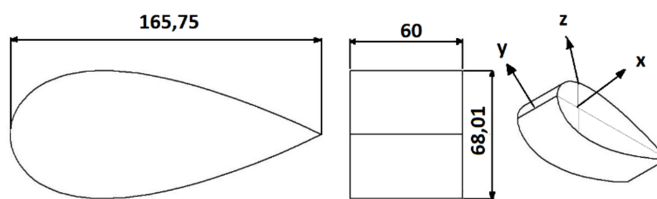


Рис. 1. Геометрические характеристики образца

$$F_x(v) = -0.35259 + 2.45043 v. \quad (1)$$

Во втором эксперименте провели аналогичные измерения при движении образца вдоль оси y (рис. 1). Значения были обработаны с помощью фильтра низких частот с частотой среза в 5 Гц (рис. 3А). Полученные результаты лучше описывала квадратичная зависимость, чем линейная (рис. 3.Б – В). Ниже представлена полиномиальная зависимость силы сопротивления F_y вдоль оси y от скорости движения v , аппроксимирующая данные эксперимента:

Научные руководители: к.ф.-м.н., проф. Гусев С.В., д.ф.-м.н., проф. Соколов С.В.

$$F_y(v) = 0.08320 - 1.24694 v + 10.70434 v^2. \quad (2)$$

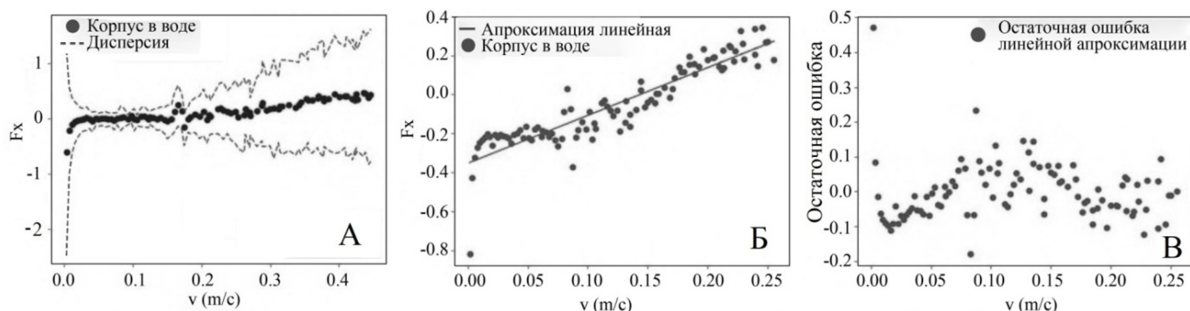


Рис. 2. Результаты первого эксперимента.

А – значения силы сопротивления жидкости перпендикулярной направлению движения и их дисперсия;
 Б – линейная аппроксимация силы сопротивления на образце; В – погрешность аппроксимации.

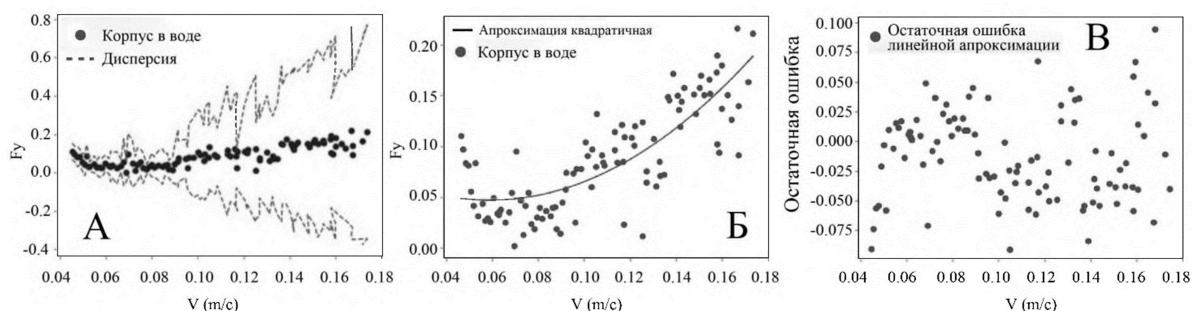


Рис. 3. Результаты второго эксперимента.

А – значения силы сопротивления жидкости перпендикулярной направлению движения и их дисперсия;
 Б – квадратичная аппроксимация силы сопротивления на образце; В – погрешность аппроксимации.

В третьем эксперименте было реализовано вращательное движение образца вокруг неподвижной оси z . Для каждого из значений угловой скорости ω (в диапазоне от 0 до 0,85 рад/с) осуществлялся поворот на 90° и записывались 90 значений моментов сил сопротивления M_z , снятых с датчика. Значения были обработаны с помощью фильтра низких частот с частотой среза в 5 Гц (рис. 4А), после чего была проведена аппроксимация линейной функцией (рис. 4.Б – В), так как отклонение реальных данных от аппроксимирующей их кривой отвечали нашим требованиям к точности аппроксимации.

Ниже представлена полиномиальная зависимость моментов сил сопротивления M_z от угловой скорости ω , аппроксимирующая данные эксперимента:

$$M_z(\omega) = -0.00545 + 0.00996 \omega. \quad (3)$$

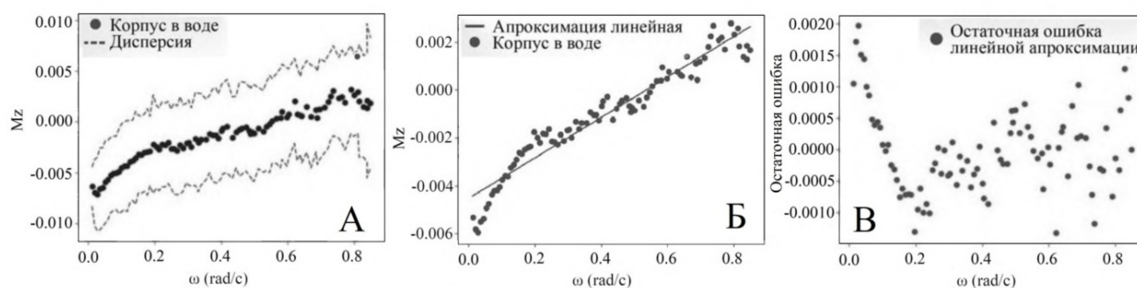


Рис. 4. Результаты третьего эксперимента.

А – значения моментов силы сопротивления жидкости и их дисперсия; Б – линейная аппроксимация силы сопротивления на образце; В – погрешность аппроксимации

Как видно из результатов эксперимента задача описания сил сопротивления в реальной жидкости требует подбора коэффициентов аппроксимации и формы аппроксимирующей функции. Для исследования того, какая именно особенность образца приводит к изменению

вида зависимости сил сопротивления от скорости, планируется использовать технологию компьютерного зрения для распознавания потоков и вихрей при движении образца.

Для решения данной задачи используется следующий алгоритм:

1. на вход подается видео с движением лопатки;
2. видео разбивается на отдельные кадры;
3. на каждом кадре происходит определение местоположения лопасти лопатки и маркированных потоков;
4. полученная информация анализируется и производится численное моделирование движения лопатки и окружающей её жидкости.

Заключение. В работе представлены результаты экспериментального определения сил и моментов сопротивления, действующих со стороны воды на образец подводного дрона, и алгебраические зависимости сил и моментов сопротивления от линейных и угловых скоростей движения. Результаты экспериментов показали, что для описания движения одного образца нужно подбирать не только коэффициенты аппроксимации, но и сами виды аппроксимирующих зависимостей. Дальнейшие эксперименты будут направлены на использование компьютерного зрения в задаче анализа вихрей, возникающих в ходе эксперимента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gibouin F. et al. Study of the thrust–drag balance with a swimming robotic fish. *Physics of Fluids*. 2018. Т. 30. № 9
2. Черноусько Ф.Л. О перемещении тела в жидкости за счет колебаний присоединенного звена. ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2010, Т. 431, № 1. С. 46–49.
3. Yury L. Karavaev, Anton V. Klekovkin, Ivan S. Mamaev, Valentin A. Tenenev, Evgeny V. Vetchanin. A Simple Physical Model for Control of an Propellerless Aquatic Robot. *Journal of Mechanisms and Robotics*. 2022. Vol. 14. №1. P. 11
4. Almedej J. Drag Coefficient of Flow Around a Sphere: Matching Asymptotically the Wide Trend. *Powder Technology*. 2008. Vol. 186. № 3. P.218-223.

E.M. Khatsanova, P.P.Tkachenko (ANO VO Sirius University, Sirius, Russia). **Experimental determination of resistance forces in a liquid during linear and angular motion of a sample of the underwater drone body**

Abstract. The paper presents the results of an experiment on the study of resistance forces from a real fluid on a sample of a given geometry inplane-parallel and rotational motion and rotational motion. The obtained polynomial dependences for the planned motion of a sample in water are presented to verify the existing mathematical models of the motion of an underwater drone in a real fluid.

УДК 681.51

М.Д.ТУМАЕВ, Е.А. ДОБРЯНИН
(Московский институт электромеханики и автоматики, Москва)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРА НА ВЫДЕРЖИВАНИЕ РЕЖИМА 4D-НАВИГАЦИИ

В докладе рассматривается изменение параметров ветра при полете воздушного судна на маршруте. На основе данных испытательного полета среднемагистрального самолета приводятся графики параметров ветра и оценивается их влияние на работу режима 4D-навигации.

Введение. В настоящее время в целях совершенствования структуры воздушного пространства и упрощения обслуживания воздушного движения к воздушным судам (ВС) предъявляется требование полетов по заранее определенным трассам, схемам вылета и прибытия с использованием метода зональной навигации. Зональная навигация (RNAV - Area Navigation) - метод навигации, который позволяет воздушному судну выполнять полет по любой желаемой пространственной траектории [1,2].

4D-навигация – навигация в горизонтальной и вертикальной плоскостях с решением задачи прибытия в заданный пункт полета и в заданное время.

Для решения задачи выдерживания времени прибытия в контрольный пункт маршрута по плану или вне плана полета необходимо управление скоростью полета ВС. Это решение будет более эффективным, если прогнозы параметров ветра, внешней температуры и т. д. будут точнее.

Настоящий доклад посвящен исследованию параметров ветра при полете воздушного судна и прибытия в точку в заданное время.

Изменение параметров ветра при движении самолета. Воздушная среда находится в постоянном движении, поэтому перемещение самолета относительно земной поверхности (путевая скорость) является результатом его движения относительно воздуха (воздушная скорость) и движения воздушной массы относительно земли (скорость ветра). На современных самолетах устанавливается навигационное оборудование, которое позволяет непосредственно измерять скорость и направление полета самолета относительно воздушной среды. Для определения скорости и направления движения самолета относительно земли необходимо учитывать влияние ветра на полет самолета. Геометрическая сумма вектора воздушной скорости \vec{V} и вектора ветра \vec{U} дает равнодействующую, показывающую направление и скорость движения самолета в данный момент относительно земли. Эта скорость называется путевой скоростью \vec{W} .

На рис. 1, 2 приводятся графики поведения скорости и направления ветра при движении самолета по маршруту в средних широтах, полученные по результатам полетов среднемагистрального самолета. Движущееся в атмосфере ВС испытывает влияние ветра на путевую скорость полета. В работе исследовалось влияние скорости ветра на путевую скорость полета, по которой оценивается выдерживание времени прибытия в контрольный пункт. Параметры ветра определяются путем решения навигационного треугольника скоростей [3] по данным спутниковой навигационной системы (путевая скорость) и системы воздушных сигналов (истинная воздушная скорость), которые входят в состав пилотажно-навигационного комплекса. Анализ, полученных графиков показывает, следующее:

- в полете возможно изменение как скорости, так и направления ветра;
- изменение эшелона полета может привести к скачку по скорости ветра, как по модулю, так и по направлению;
- наличие разворотов также меняет величину бокового, попутного и встречного ветров.

Таким образом, изменение динамики полета оказывает существенное влияние на параметры ветра.

Научный руководитель: гл. научный сотрудник д.т.н., проф. Зайцева Н.А.

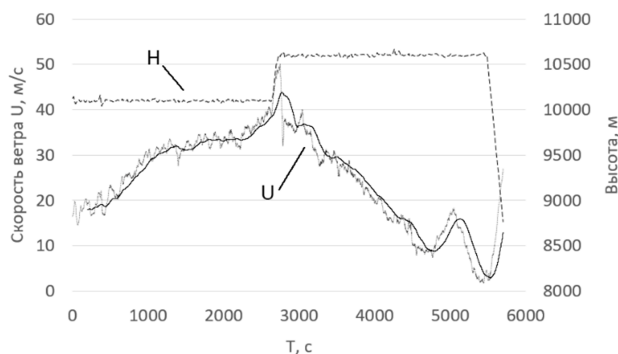


Рис. 1. Графики зависимостей скорости ветра (U) и высоты полета (H) от времени.

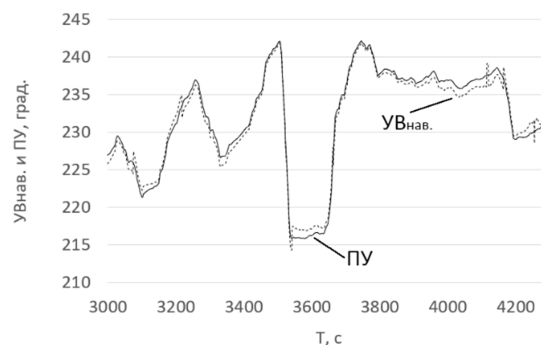


Рис. 2. Графики зависимостей угла ветра ($УВ_{нав}$) и путевого угла ($ПУ$) от времени.

Функция 4D-навигации помимо определения координат φ , λ и высоты H полета требует определения времени прибытия в пункт маршрута. Обычно задается время прибытия в конкретный пункт маршрута (RTA - Required time of arrival). Это время может уточняться в зависимости от изменений условий полета или должно выдерживаться.

Для корректировки скорости движения ВС с целью обеспечения его прибытия в контрольный пункт в заданное время RTA применяется функция управления временем полета ТОАС (Time of arrival control) с использованием информации о параметрах ветра, которая подробно описана в работе [2].

Для более эффективного выполнения режима 4D-навигации необходимо на земле (перед стартом) наличие предварительной информации о параметрах ветра на всем маршруте полета [4,5], что не всегда возможно и для этого требуется наличие математической модели ветра [6], которая могла бы компенсировать отсутствие данных о нем и позволить более точно рассчитать время прибытия в контрольный пункт в заданное время RTA.

Заключение. В докладе проведена оценка влияния параметров ветра на скорость движения воздушную судна по результатам летных испытаний пилотажно-навигационного комплекса. В дальнейшем планируется создание бортовой математической модели ветра, позволяющей определить его параметры в зоне отсутствия данных о нем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов А.Г., Зайцева Н.А. К вопросу анализа концепции организации воздушного пространства // Навигация и управление летательными аппаратами, Выпуск 27, 2019-4. С 41.
2. Зайцева Н.А., Калинина И.В., Добрянин Е.А. О выдерживании времени прибытия в контрольную точку // Навигация и управление летательными аппаратами, Выпуск 39, 2022-4. С 75
3. И. И. Помыкаев, В. П. Селезнев, Л. А. Дмитроченко. Навигационные приборы и системы : [учебник для вузов] / – Москва : Машиностроение, 1983.
4. RTCA DO-283A. Minimum Operational Performance Standards for Required Navigation Performance for Area Navigation. RTCA, Inc. Washington, 2015.
5. Шакина Н.П., Иванова А.Р. Прогнозирование метеорологических условий для авиации. – М.: Триада лтд, 2016. – 312 с.
6. Гандин Л.С., Дубов А. С. Численные методы краткосрочного прогноза погоды, под редакцией проф. М. И. Юдина // Гидрометеорологическое издательство / Ленинград, 1968 – 429 с.

M.D.Tumaev, E.A.Dobryanin (Moscow Institute of Electromechanics and Automatics, Moscow). **Wind parameter influence on 4D-navigation mode maintenance.**

Abstract. The report examines the behaviour of wind parameters during en-route flight. A test flight of a medium-range aircraft is considered as an example. Graphs of the behaviour are given. Based on the data obtained, the operation of the 4D navigation mode is evaluated.

УДК 531.383

А. Г. КОЛЕСНИКОВА, Д. С. СТРЕЛЬЦОВ
(Тульский государственный университет, Тула)

УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС «БЕСПЛАТФОРМЕННАЯ СИСТЕМА ОРИЕНТАЦИИ НА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ДАТЧИКАХ ПЕРВИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ»

Представлено описание и принцип работы учебно-лабораторного комплекса, предназначенного для изучения бесплатформенных систем ориентации и навигации летательных аппаратов, реализованных на микромеханических гироскопах и акселерометрах. Имеется возможность изучать алгоритмы систем ориентации с применением различных кинематических параметров. Визуализация пилотажной информации осуществляется при помощи цифровых двойников авиационных приборов.

Введение. Бесплатформенная система ориентации (БСО) — система ориентации, в которой положение летательного аппарата определяется с помощью инерциальных чувствительных элементов, размещенных непосредственно на борту подвижного объекта. БСО по сравнению с платформенными системами ориентации имеют значительные преимущества по массогабаритным характеристикам, стоимости и энергопотреблению [1-3]. В связи с активным внедрением БСО в подвижные объекты различного базирования, актуальным является разработка учебно-лабораторных комплексов по изучению схмотехнического, математического и программного обеспечения БСО. Предлагаемый доклад посвящен описанию разработанного комплекса «Бесплатформенная система ориентации на микромеханических датчиках первичной информации».

Описание учебно-лабораторного комплекса. Учебно-лабораторный комплекс состоит из персонального компьютера с предустановленным программным обеспечением собственной разработки, двух мониторов, масштабной модели летательного аппарата со встроенными микромеханическими гироскопами и акселерометрами, методических указаний по выполнению лабораторных работ. На первый монитор выводится закабинная обстановка летательного аппарата, на второй – цифровые двойники пилотажно-навигационных приборов (рис.1), в числе которых: авиагоризонт, указатель курса, высотомер, автомат углов атаки и сигнализации перегрузок, указатель поворота. Учебный комплекс обладает следующими функциональными возможностями:

- визуализация параметров ориентации на цифровых двойниках пилотажно-навигационных приборов и закабинной обстановки в реальном масштабе времени;
- пилотирование виртуальной модели самолета с помощью джойстика;
- подключения масштабной модели самолета со встроенными микромеханическими датчиками первичной информации;
- оценки влияния инструментальных погрешностей датчиков первичной информации на процесс пилотирования;
- выбора типа летательного аппарата, влияющего на динамику процесса пилотирования;
- селекция видовой камеры: от первого/третьего лица.
- выбора алгоритма ориентации: углы Эйлера-Крылова, направляющие косинусы и др.
- оценки точности инерциальных датчиков.

Программная часть написана на языках программирования *C#* и *Processing*. Передача данных осуществляется по интерфейсу *Bluetooth*. Все программы совместимы с операционными системами семейств *Linux* и *Windows*. Аппаратная часть построена на микроконтроллере *Arduino*.

К достоинствам представленного учебно-лабораторного комплекса можно отнести:

- минимальные требования к персональному компьютеру;
- беспроводная связь модели самолета с компьютером;

Научный руководитель: заведующий кафедрой д.т.н. Матвеев В.В.

- относительно небольшая цена;
- реалистичность процесса полета и отображение пилотажной информации;
- мультиплатформенность.



Рис. 1. Внешний вид учебно-лабораторного комплекса

Заключение. В Тульском государственном университете для повышения качества образовательного процесса разработан учебно-лабораторный комплекс «Бесплатформенная система ориентации на микромеханических датчиках первичной информации». Он позволяет обучать студентов по направлению подготовки 24.03.02 (24.04.02) «Системы управления движением и навигация» алгоритмам систем ориентации с применением различных кинематических параметров: углов Эйлера-Крылова, направляющих косинусов, кватернионов и др. Дальнейшая работа связана с модернизацией программного обеспечения в части добавления моделей летательных аппаратов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоманевренных летательных аппаратов (FEWG-2022-0002)»

ЛИТЕРАТУРА

1. **Матвеев В. В.** Мобильные устройства в научно-исследовательской и экспериментальной работе: 2-е изд., испр. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2021. 134 с.
2. **Матвеев В. В.** Задача ориентации в бесплатформенной инерциальной навигационной системе / В. В. Матвеев, А. Г. Колесникова, Д. С. Стрельцов // Приборостроение-2022: материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16-18 ноября 2022 года, Минск, Республика Беларусь. – Минск : Изд-во БНТУ, 2022. – С. 49-51.
3. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С 3-10.

A.G. Kolesnikova, D.S. Streltsov (Tula state University, Tula). **Educational and laboratory complex «Strapdown orientation system on micromechanical sensors of primary information»**

Abstract. The educational and laboratory complex is designed to study strapdown systems for orientation and navigation of aircraft, implemented on micromechanical gyroscopes and accelerometers. It is possible to study the algorithms of attitude control systems using various kinematic parameters. Visualization of flight information is carried out using digital twins of aviation instruments.

УДК 621.384.31

А.Н.ХОМЯЧКОВА
(Тульский государственный университет, Тула)

ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

В работе предлагается лабораторный комплекс для испытания систем малого космического аппарата, а также режимов функционирования: автосопровождения и ориентации. Излагается перечень лабораторных работ, выполняемых с помощью комплекса.

Введение. Вместе с бурным развитием космической техники, значительностью достигнутых с ее помощью результатов и многочисленностью выдвигаемых задач по дальнейшему освоению космического пространства актуальной является задача систематизировать и обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований по теории космического полета и проектированию малых космических аппаратов (МКА) [1, 2].

В связи с возросшей потребностью в квалификационных инженерных кадрах и научных работниках возникает необходимость обучения молодых специалистов в области космических технологий.

Настоящий доклад посвящен лабораторному комплексу для испытания систем малого космического аппарата, предназначенный для обучения молодых специалистов.

Лабораторный комплекс. В состав лабораторного комплекса входит макет МКА (рисунок 1), имитаторы небесных светил, имитатор звездного неба. Разработана специальная система подвеса МКА на нитях, позволяющая имитировать отсутствие трения в космосе. В состав макета МКА входит контроллер, оптико-электронная система ориентации на небесное светило [3], модуль питания, *Bluetooth*-модуль, микромеханический гироскопический датчик угловой скорости. В качестве исполнительных элементов выступает двигатель-маховик.

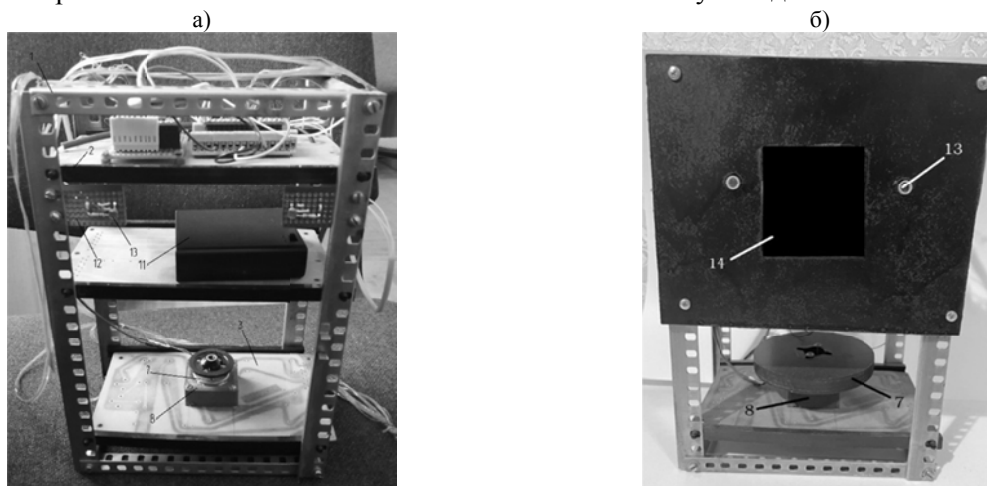


Рис. 1. Макет МКА вид спереди: а) вид без солнечной панели, б) вид солнечной панелью: 1 – корпус; 2 – направляющие; 3 – пластины; 7 – двигатель-маховик; 8 – корпус двигателя; 11 – элемент питания; 12 – установочная плата; 13 – фоторезисторы; 14 – солнечная панель

Контроллер собирает информацию с датчиков и управляет скоростью вращения и направлением маховика, придавая требуемую ориентацию корпусу МКА. Схема стендовых испытаний представлена на рисунке 2. В состав комплекса входит настольный компьютер с предустановленным программным обеспечением, позволяющий визуализировать параметры МКА в режиме реального времени по беспроводному протоколу [4].

Научный руководитель: заведующий кафедрой д.т.н. Матвеев В.В.

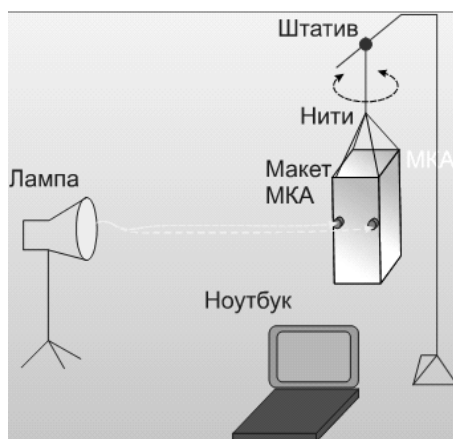


Рис.2. Схема стендовых испытаний

Лабораторный комплекс позволяет выполнить следующие лабораторные работы:

- 1) исследование функционирования системы ориентации в режиме стабилизации МКА;
- 2) экспериментальное определение погрешностей гироскопического датчика угловой скорости МКА;
- 3) определение характеристик двигателя-маховика;
- 4) исследование солнечных датчиков;
- 5) исследование процессов автосопровождения макета МКА за имитатором небесного светила;
- 6) исследование параметров солнечного излучения;
- 7) контроль параметров МКА с помощью специального программного обеспечения на настольном компьютере.

Программная часть написана на языке C, передача данных осуществляется через *Bluetooth*. Все программы совместимы с операционными системами семейств *Linux* и *Window*. Аппаратная часть построена на микроконтроллере *Arduino*.

Заключение. Изложены результаты разработки лабораторного комплекса, предназначенного для испытания систем малого космического аппарата, а также режимов функционирования, автосопровождения и ориентации, созданного в Тульском государственном университете. Приведен перечень лабораторных работ, предназначенных для проведения на комплексе.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания по теме «Развитие теории инерциальных датчиков первичной информации для навигационных систем высокоманевренных летательных аппаратов (FEWG-2022-0002)»

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. С. Нариманова, М. К. Тихонравова Основы теории полета космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1972, 608 с.
2. Белоконов И.В., Тимбай И.А., Николаев П.Н. Анализ и синтез движения аэродинамически стабилизированных космических аппаратов нанокласса формата CubeSat // Гироскопия и навигация. Том 26. №3 (102), 2018. С. 69-91.
3. Хомячкова А.Н. Оптико-электронная система ориентации космического аппарата/ВКР, Тула, ТулГУ. 2021. – 95 с.
4. Хомячкова А.Н. Дополнительная общеобразовательная общеразвивающая программа базового уровня «Инженерия бортовых комплексов управления космическим системам»/ XIII Тульский молодежный экономический конкурс инновационных проектов и идей: Сборник тезисов работ / Под ред. А.В. Овчарова. – Т: Имидж Принт, 2022 – с. 667-669.

A.N. Khomyachkova (Tula state university, Tula), **Laboratory complex for testing small spacecraft system**

Abstract. The paper proposes a laboratory complex for testing the systems of a small spacecraft, as well as the modes of operation: auto-tracking and orientation. The list of laboratory works performed with the help of the complex is presented.

УДК 629.7.018

В. В. МАЙОРОВ

(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, г. Самара)

СТЕНД ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКОВ ПОТРЕБИТЕЛЬСКОГО КЛАССА НА БАЗЕ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ ФОРМАТА CUBESAT

Приведено описание внешнего вида, конструкции и принципа функционирования разработанного стенда, предназначенного для калибровки датчиков на базе микроэлектромеханических систем в составе наноспутников формата CubeSat.

Введение. Относительная дешевизна и унификация электронных компонентов бытового класса, в частности, датчиков на базе микроэлектромеханических систем (МЭМС) способствует их применению при разработке наноспутников (НС) формата CubeSat используемых в настоящее время для проведения широкого круга научных экспериментов в космосе [1-3]. Эта особенность НС позволяет небольшим коллективам молодых учёных создавать собственные спутники. Однако массовость производства электронных датчиков и их применение в бытовых приборах не предполагает их использование в высокоточных измерениях. Как результат, при наземной отработке НС требуется калибровка бортовых измерительных устройств для достижения ими необходимых точностных показателей. Предлагаемый доклад посвящён разработке стенда калибровки датчиков на базе МЭМС.

Описание стенда. При проведении обзора существующих стендов для решения подобных задач подобрать образец под требуемые характеристики не удалось, что потребовало разработать прототип одноосного поворотного стенда с малой угловой скоростью вращения для калибровки измерительных устройств [4]. Существующие образцы стендов ведут калибровку на больших угловых скоростях чем требуется – минимальная угловая скорость не должна превышать значение 24 угл/с. Не маловажную роль играет стоимость стенда, он должен быть относительно дешёвым и достаточно точным.

Принцип работы предлагаемого стенда заключается в совместном анализе вектора измерений малого поворота калибруемого МЭМС, и опорных значений угловой скорости движения планшайбы, получаемых от измерительной системы стенда. По результатам анализа выполняется уточнение параметров математической модели измерений испытываемого устройства. Данная модель затем используется в контуре системы управления движением НС.

Одной из главных особенностей стенда является то, что МЭМС калибруется в составе печатной платы (ПП) бортовой системы НС, затем проводится повторная калибровка интересующей нас бортовой системы в составе НС. Данное преимущество позволяет учесть погрешности монтажа ПП в стек НС МЭМС.

Конструктивно стенд (рис. 1) представляет собой приводимый во вращение тубус, установленный на двух шариковых подшипниках в цилиндрическом корпусе. Нижняя торцевая часть тубуса связана с шаговым двигателем, позволяющим задавать различную угловую скорость вращения. На верхнем торце тубуса, по оси вращения установлена планшайба, обеспечивающая закрепление ПП стандарта CubeSat с возможностью установки НС формата 3U CubeSat на соответствующей оснастке.

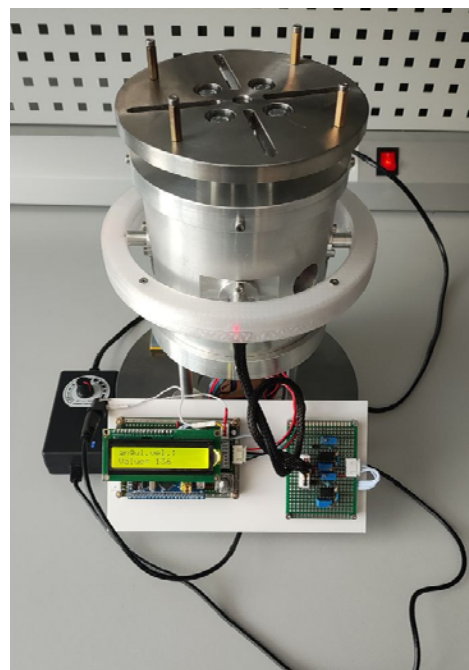


Рис. 1 Прототип стенда

Научный руководитель: младший научный сотрудник Болтов Е.А.

Описание схемы детектирования. В качестве датчиков измерительной системы используются две пары фотодиодов (приемников) и лазерных диодов (источников), излучающих в видимой части спектра, что упрощает монтаж и первичную калибровку системы. Их оптические оси установлены друг относительно друга под углом 90° (рис. 2). Совмещение оптических осей источник/приёмник обеспечивается при помощи зеркала, отражающая поверхность которого совпадает с осью вращения стэнда.

Управление работой стэнда, настройка и проведение измерений обеспечивается микроконтроллером семейства STM32 [5].

На рис. 3 поясняется принцип определения опорных значений угловых скоростей поворота стэнда.

Величины напряжений U , фиксируемые фотодиодами, для каждого из 4 положений зеркала будут отличаться, что может быть связано с технологическими погрешностями изготовления и сборки стэнда, бликами при прохождении луча, различными характеристиками источников и приёмников, а также другими факторами. Для уменьшения влияния данных отклонений по амплитуде сигнала программно-аппаратными средствами задаётся предельный уровень регистрации сигнала при достижении которого фиксируется прохождение контрольной точки (рис. 3).

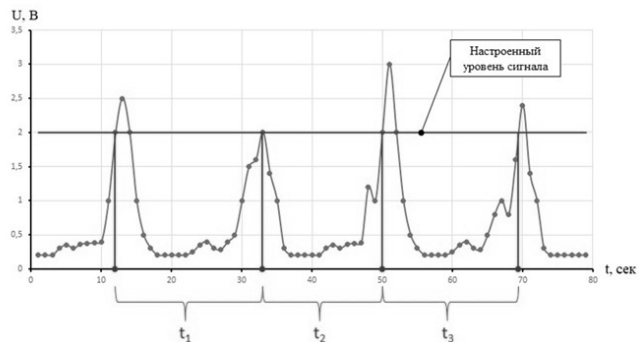


Рис. 3 Типовой график измерений за один оборот

Измерение угловой скорости. Для каждой из четырёх контрольных точек определяется время их прохождения, затем рассчитываются интервалы времени t_1 , t_2 , t_3 между моментами прохождения соответствующих контрольных точек (рис. 3). Итоговые (эталонные) значения интервалов t_1 , t_2 , t_3 определяются по результатам 10-20 контрольных оборотов стэнда. Зная время между прохождениями контрольных точек (пиков) и полагая, что стэнд движется с постоянной скоростью, по равенству временных интервалов, рассчитывается угловая скорость вращения стэнда как угол/время.

Заключение. В работе представлено описание разработки прототипа одноосного поворотного стэнда с возможностью регистрировать собственную угловую скорость вращения. В дальнейшем предполагаются работы по усовершенствованию конструкции и измерительной системы.

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chesi, S., Gong, Q., Romano, M., Aerodynamic Three-Axis Attitude Stabilization of a Spacecraft by Center-of-Mass Shifting // Journal of Guidance, Control, and Dynamics 2017. Vol. 40. №. 7. Pp. 1613–1626.
2. Васенина А.А., Сидоренко К.А. Адаптация ионосферной модели по данным глобальных навигационных спутниковых систем // Решетневские чтения. 2014. Т1. С. 263-264.
3. М.Е. Прохоров, А.К. Абубекеров, А.И. Захарова Звездный датчик для наноспутников // Решетневские чтения. 2014. Т1. С. 507-508.

4. A. Bogatyrev, I. Lomaka, P. N. Nikolayev Technology for calibration of measuring instruments of samsat nanosatellites' family // 2017 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). 2017. Pp. 407 – 410
5. Болтов Е.А., Ломака И.А., Майоров В.В. и др. Разработка стенда калибровки датчиков угловой скорости наноспутника формата CubeSat // XLVI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства. — 2022. — Т. 4. — С. 451-453

V.V. Maiorov (Samara University, Samara). **Bench development for calibration of consumer class sensors based on microelectromechanical systems for CubeSat**

Abstract. The description of the appearance, design and principle of operation of the developed stand, designed to calibrate sensors based on microelectromechanical systems (MEMS) as part of nanosatellites of the CubeSat format, is given.

УДК 519.876.5

А. М. СТОЛЯРОВА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДВИЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПАРОМА С ПРОВЕРКОЙ МАНЕВРЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Разработана модель, которая предназначена для имитации вырабатываемых навигационных параметров и параметров ориентации железнодорожного паромы. Найдены характеристики движителя и гидродинамические характеристики. Адекватность модели определена по натурным данным, проведена проверка маневренных характеристик.

Введение. Предлагаемый доклад посвящен разработке адекватной модели движения судна с выработкой навигационных параметров и параметров ориентации на ее основе. Математическая модель описывает движение паромы под действием сил работы движителя и сил внешнего воздействия. Целью работы является оценка коэффициентов модели движения паромы. Проверка результатов работы проводится сравнением результатов, полученных при моделировании, и реальных маневренных характеристик.

Модель движения железнодорожного паромы. Уравнение продольного движения судна имеет вид:

$$m \cdot (1 + k_{11}) \dot{V}_x = R_x + T_p, \quad (1)$$

где m - масса погруженной части, k_{11} - коэффициент присоединенных масс, V_x - продольная составляющая относительной скорости, R_x - сила сопротивления, T_p - сила тяги гребного винта.

В исследуемой модели движения сила сопротивления пропорциональна квадрату продольной составляющей скорости судна. Данная сила определяется формулой [1]:

$$R_x = C_x \cdot \frac{\rho V_x^2}{2} \cdot S_m, \quad (2)$$

где C_x - коэффициент сопротивления, ρ - плотность воды, S_m - площадь мидель-шпангоута.

Опираясь на предварительную оценку [2] скорости движения паромы и силы сопротивления, методом наименьших квадратов определен коэффициент C_x - гидродинамический коэффициент сопротивления. Данный коэффициент является безразмерной величиной.

Сила тяги гребного винта регулируемого шага имеет вид [3]:

$$T_p = K_t \cdot \rho \cdot n^3 \cdot D^4, \quad (3)$$

где K_t - коэффициент упора гребного винта, n - частота оборотов винта, D - диаметр винта.

Коэффициент упора в формуле (3) учитывает вклад шагового отношения винта и относительной поступи. Данное соотношение можно представить как:

$$K_t = K_{t0} \cdot \left(\frac{P}{D}\right) + K_{ti} \cdot J, \quad (4)$$

где K_{t0} - коэффициент тяги, учитывающий шаговое отношение гребного винта, (P/D) - шаговое отношение гребного винта, K_{ti} - коэффициент тяги, учитывающий поступь гребного винта, J - поступь гребного винта.

С помощью метода наименьших квадратов по данным предварительной оценки шагового отношения винта и относительной поступи из отчета [2] определены значения коэффициентов тяги движителя: K_{t0} и K_{ti} .

Проверка маневренных характеристик. В результате были промоделированы режимы движения паромы при определенном заданном управлении с учетом оценки коэффициентов. На

Научный руководитель: ведущий научный сотрудник д.т.н. Пелевин А.Е.

рисунке 1 представлены тормозные характеристики [4] соответствующие четырем исследуемым режимам движения из таблицы маневренных элементов автомобильно-железнодорожного парома ПР № CNF19M:

- 1) ППХ-СТОП, сброс скорости судна с установившегося значения при ППХ (передний полный ход) до нуля;
- 2) ЗПХ-СТОП, сброс скорости судна с установившегося значения при ЗПХ (задний полный ход) до нуля;
- 3) СТОП-ППХ, разгон судна от начальной нулевой скорости до установления постоянной скорости, соответствующей ППХ;
- 4) СТОП-ЗПХ, разгон судна от начальной нулевой скорости до установления постоянной скорости, соответствующей ЗПХ.

Каждому режиму движения, перечисленному выше, соответствует столбец, характеризующий пройденное судном расстояние. Время движения указано слева от столбца, а начальная и конечная скорости – справа.

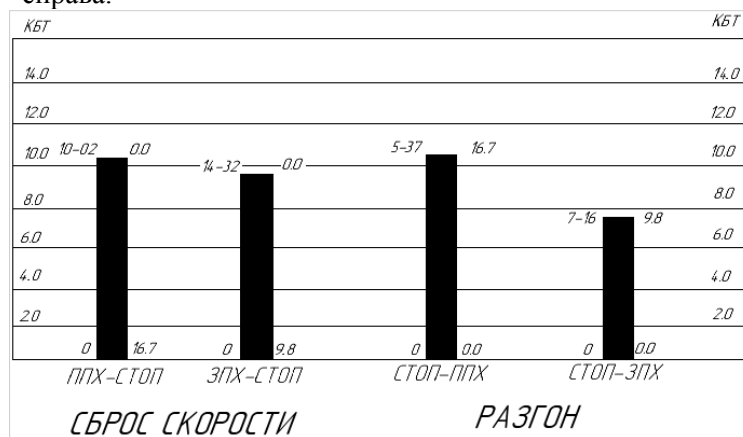


Рис. 1. Тормозные характеристики, соответствующие четырем режимам

Результаты моделирования, характеризующие продольное движения железнодорожного парома, близки к реальным тормозным характеристикам исследуемого судна [4]. Движение в режимах остановки потребовало дополнительного исследования.

Заключение. Было проведено дополнительное исследование в части доработки математической модели для движения в режимах остановки: уточнен коэффициент сопротивления C_x , введены коэффициент засасывания и гидродинамический коэффициент попутного потока.

Следующим этапом разработки является анализ бокового движения и объединение двух моделей движения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мирохин Б. В., Жинкин В. Б., Зильман Г. И. Теория корабля: Учебник - Л.: Судостроение, 1989.- 352 с.
2. Отчет CNF19M-100-053. "Исследование ходовых качеств автомобильно-железнодорожного парома нового поколения для линии Усть-Луга-Балтийск проекта CNF19M". - ООО «Цифровые Морские Технологии»
3. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна: Справочник. - Л.: Судостроение, 1988. - 360 с.
4. Таблица маневренных элементов автомобильно-железнодорожного парома ПР № CNF19M

A.M.Stolyarova (State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, Saint Petersburg). **Creating a train ferry movement model and verification of maneuverability characteristics**

Abstract. The created model is designed to simulate generated navigation and orientation parameters. Propulsion characteristics and hydrodynamic characteristics were found. The adequacy of the model is determined by natural data. Maneuverability characteristics were checked.

УДК 681.51

В. Д. СОЛОМЕНЦЕВ
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ МАКЕТОМ ОДНООСНОГО ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА
НА ДАТЧИКЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ В СРЕДЕ LABVIEW**

Представлена система управления одноосным индикаторным гиросtabilизатором на датчике угловой скорости с цифровым контуром обратной связи, позволяющая обеспечить калибровку, настройку гиросtabilизатора и исследование его поведения. Приведены результаты настройки макета гиросtabilизатора при помощи разработанной системы.

Введение. Назначение гиросtabilизаторов (ГС) заключается в обеспечении неизменным положения объекта стабилизации и управления этим положением. Точность и быстродействие работы индикаторного ГС определяются в первую очередь структурой контура отрицательной обратной связи системы стабилизации [1]. Предлагаемый доклад посвящен реализации системы управления макетом одноосного ГС на датчике угловой скорости в среде LabView. Данная система управления предназначена для настройки и тестирования алгоритмов стабилизации.

Описание системы. Рассматриваемая система состоит из макета одноосного ГС с волоконно-оптическим датчиком угловой скорости, управляющего модуля ГС, персонального компьютера с технологическим программным обеспечением в среде LabView, адаптера CAN-UART.

Макет ГС (рис. 1) представляет собой вал в подшипниках, с установленными на нём датчиком угла Netzer DS-90, датчиком угловой скорости ВГ 103ПТ производства АО «Физоптика», бесколлекторным двигателем стабилизации МД117 производства «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР» и грузами, выполняющими роль объекта стабилизации.

Управляющий модуль ГС представляет собой печатную плату с микроконтроллером, преобразователем интерфейсов, источником питания. Программное обеспечение модуля ГС реализует функции:

- инициализации периферийных устройств, установленных на плате с микроконтроллером;
- чтения данных с датчиков, отвечающих за стабилизацию и управление платформой;
- приёма сигналов управления платформой через интерфейс CAN;
- вычисления и формирования сигналов контура обратной связи системы стабилизации в соответствии с выбранным режимом работы;
- записи и чтения параметров из памяти EEPROM микроконтроллера;
- управления бесколлекторным двигателем стабилизации;
- выдачи и приём отладочной информации через интерфейс CAN.

Выходными данными модуля ГС являются пакеты, передаваемые на персональный компьютер, обработка которых осуществляется программой управления, реализованной в среде LabView.

Взаимодействие управляющего модуля ГС с программой управления сводится к формированию сообщений на основе данных с графического интерфейса (Рис. 2) и обмену ими с персональным компьютером. Одновременно с этим в программе реализован алгоритм приёма данных и обновления окна с графиками сигналов датчика угла и датчика угловой скорости. Разработанный в среде LabView интерфейс управления макетом ГС обладает следующими функциями:

- вывод сигналов датчика угла и датчика угловой скорости в окно графиков;
- определение смещения нуля датчика угловой скорости (компенсация дрейфа);
- калибровка датчика угла;
- настройка параметров контура стабилизации;
- управление ГС по углу и скорости.

В общем случае под настройкой параметров контура стабилизации понимается не только подбор коэффициентов передаточной функции обратной связи, но и реализация нелинейных алгоритмов стабилизации [2].

Научный руководитель: к.т.н., доцент кафедры Кулешов А.В.

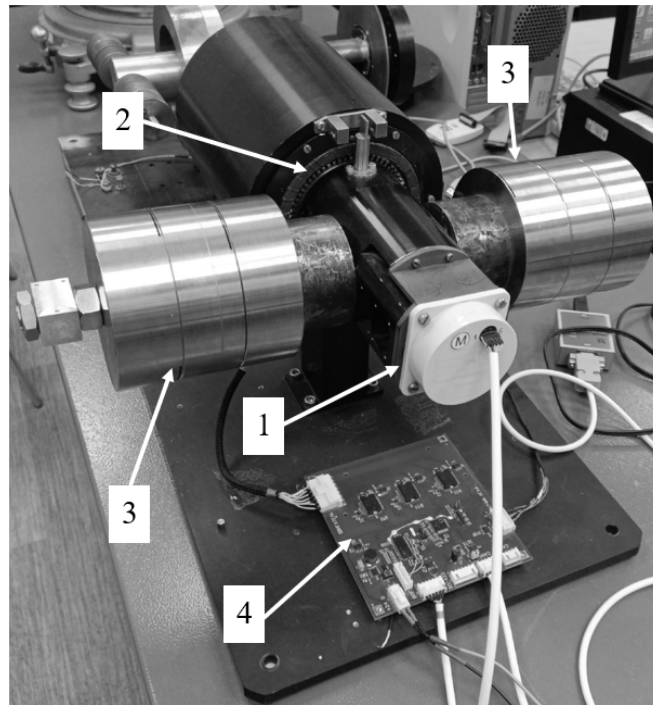


Рис. 1. Внешний вид макета ГС

1 – датчик угловой скорости; 2 – двигатель стабилизации; 3 – грузы; 4 – управляющий модуль ГС.

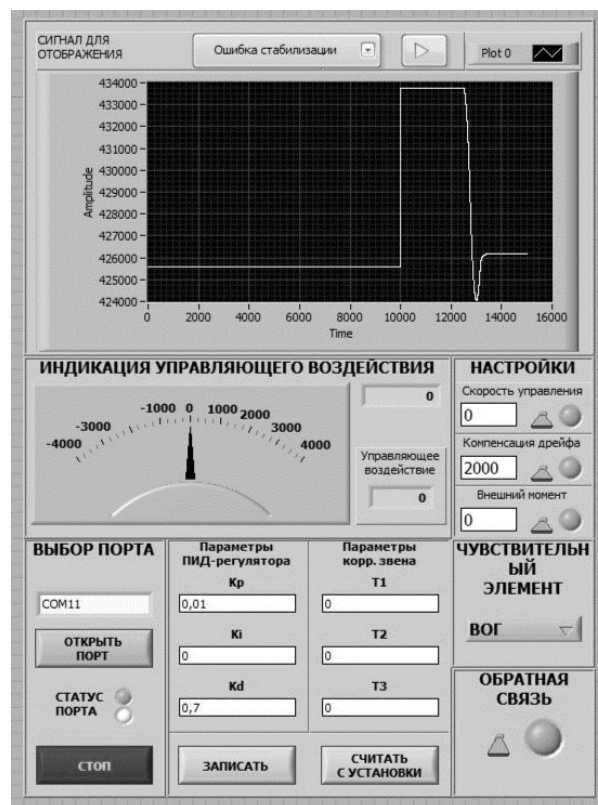


Рис. 2. Вид графического интерфейса

Заключение. Разработанная система управления позволяет проводить калибровку, настройку и испытания алгоритмов стабилизации макета гиростабилизатора, а также в реальном времени отслеживать параметры переходного процесса при помощи графиков. Данная система упрощает экспериментальное исследование поведения и настройку индикаторного ГС. В ходе разработки с помощью полученной системы была проведена настройка макета одноосного ГС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. Теория гироскопов и гиросtabilизаторов: Учеб. для вузов по спец. «Гироскоп. приборы и устройства». – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 423 с.: ил.
2. Соломенцев В.Д. Исследование возможности использования нечеткой логики в регуляторе индикаторного гиросtabilизатора // ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ МОЛОДЕЖНЫЙ ЖУРНАЛ. - 2022. - №12 (77).

V.D.Solomentsev, (BMSTU, Moscow). **LabView control system for indicator gyro stabilizer based on rate gyro**

The paper presents a LabView control system for indicator gyro stabilizer based on rate gyro, which allows for calibration, adjustment of the gyrostabilizer and the study of its behavior. The results of setting up the prototype of the gyro stabilizer using the developed system are presented.

УДК 681.51

А. Л. ТОЛСТОЙ
(СПбГУ, Санкт-Петербург)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВСЕМИРНОГО ВРЕМЕНИ НА МОДЕРНИЗИРОВАННОМ ПАССАЖНОМ ИНСТРУМЕНТЕ

Приводится описание и результаты модернизации пассажного инструмента, принцип определения Всемирного времени и методика калибровки кадров, полученных с использованием КМОП-матриц, предназначенная для фильтрации шума, проявляющегося в виде вертикальных или горизонтальных полос.

Введение. В настоящее время особую важность приобретают независимые от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) астрономические методы навигации, позволяющие ориентироваться как на суше, так и на воздухе или на воде [1, 2]. Опыт показывает, что эффективность и работоспособность таких средств зависит от наличия шкалы времени. Необходим стандарт времени и частоты, хранящий шкалу времени, привязанную к какой-либо опорной шкале, например, Всемирного (UT1) или Всемирного координированного времени (UTC). В настоящее время задачи синхронизации со шкалой времени UT1 или UTC решаются с использованием ГНСС. Отсутствие информации от ГНСС из-за наличия помех или выхода из строя спутникового оборудования приводит к появлению ошибок синхронизации и нарушению работоспособности астрономических приборов. Актуальной является задача временного обеспечения при отсутствии доступа к ГНСС или иным внешним искусственным источникам точного времени.

Предлагаемый доклад посвящен обработке методики определения Всемирного времени на модернизированном пассажном инструменте с целью создания аппаратуры для оперативного определения Всемирного времени на основе переносного пассажного инструмента.

Принцип работы пассажного инструмента. Наблюдения на пассажном инструменте (рис. 1) вплоть до последних десятилетий XX века являлись основным средством определения Всемирного времени и разности Всемирного и Всемирного координированного времен.

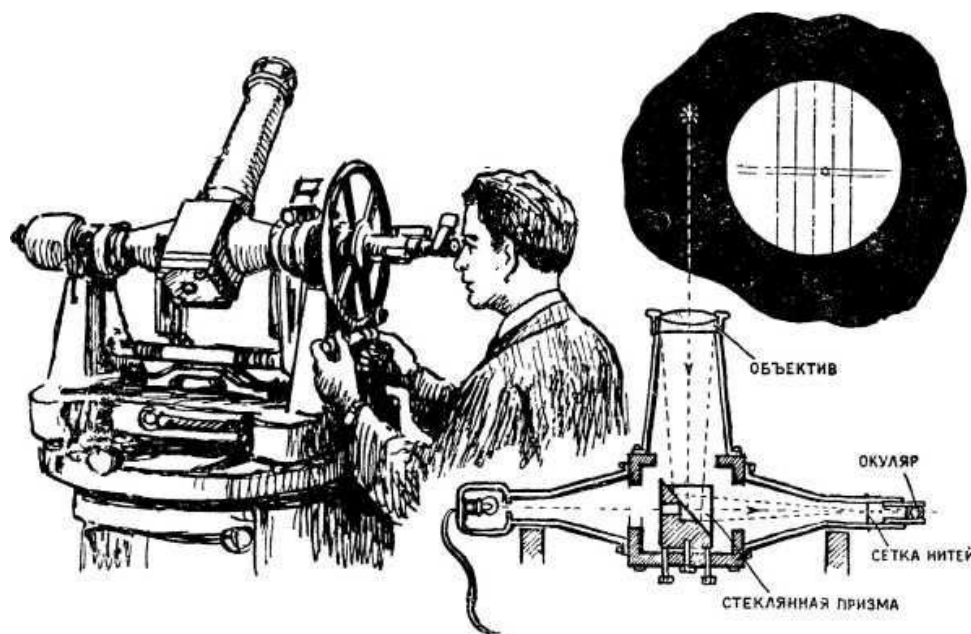


Рис. 1. Пассажный инструмент

Принципиальные основы наблюдательной методики могут быть представлены следующим алгоритмом [3]:

Научный руководитель: доцент кафедры Петров С.Д.

1. инструмент устанавливается таким образом, чтобы визирная ось прибора находилась вблизи плоскости меридиана;
2. наблюдатель фиксирует моменты прохождения звездой вертикальных нитей;
3. осуществляется перекладка визирной оси;
4. наблюдатель фиксирует моменты прохождения звездой тех же вертикальных нитей, что в п.2;
5. для каждой нити производится усреднение моментов прохождения, зафиксированных до и после перекладки, что дает независимые оценки момента прохождения звездой инструментального меридиана;
6. для каждой звезды проводится усреднение моментов прохождения инструментального меридиана, полученных в п.5;
7. при помощи формулы Майера [3] производится оценка момента прохождения звездой небесного меридиана на основе полученных данных;
8. исходя из априорных данных о прямом восхождении звезды рассчитывается время, в которое звезда должна пересечь небесный меридиан;
9. находится разность измеренного и рассчитанного моментов прохождения звездой небесного меридиана, что после учета систематических ошибок является оценкой поправки часов наблюдателя; такие оценки усредняются и дают искомую величину – поправку часов.

До середины XX века фиксация моментов прохождения звездой рабочих нитей осуществлялась наблюдателем, что неизбежно вносило дополнительную ошибку. Начиная с 1940-х годов в практику была внедрена фотоэлектрическая регистрация моментов прохождений, что существенно повысило точность наблюдений. Регистрация прохождений с помощью полупроводниковых приборов, таких как ПЗС-матрицы, не была внедрена, так как развитие данной технологии пришлось на то время, когда для определения Всемирного времени стали использовать радиоинтерферометры со сверхдлинными базами [4], и наблюдения на пассажных инструментах стали прекращаться.

Модернизация пассажного инструмента. Предлагается произвести модернизацию пассажного инструмента за счет использования КМОП-матрицы в качестве основного регистрирующего прибора как наиболее доступного с экономической точки зрения, а также обеспечивающего несопоставимо большую скорость считывания по сравнению с ПЗС-матрицами ввиду того, что считывание сигнала происходит параллельно, а не последовательно.

Для работы с матрицей предлагается использовать компьютер, сопряженный с блоком хранения времени и частоты, для оперативной обработки наблюдений пассажного инструмента с целью определения Всемирного времени и привязки к нему шкалы времени хранителя. Подобная система позволит определять Всемирное время с минимальной задержкой, причем сам аппаратный комплекс может быть выполнен транспортабельным.

В 1960-70-е годы, когда наблюдения на пассажном инструменте были основным средством определения Всемирного времени, точность его определения составляла 2 мс. Применение регистрации на КМОП-матрицу позволит существенно увеличить количество обрабатываемых звезд, кроме того, новые методики обработки изображений позволят точнее определять центр изображения звезды в кадре, учитывать оптические аберрации системы, вместе с применением в перспективе адаптивной оптики достижение точности в 1 мс представляется возможным.

В настоящее время производится отработка технологий и методик наблюдений на пассажном инструменте, расположенном на астрономической наблюдательной площадке Санкт-Петербургского государственного университета. Инструмент оснащен КМОП-матрицей, присоединяемой к инструменту с помощью специально сделанного адаптера, организовано сопряжение инструментальной части с переносным компьютером. В качестве рабочих часов используются системные часы компьютера, синхронизированные со шкалой Всемирного координированного времени через Интернет. Использование автономного блока хранения времени и частоты на кварцевых или рубидиевых генераторах предполагается в будущем.

На рис.2 представлен модернизированный пассажный инструмент Bamberg, расположенный на территории наблюдательной площадки СПбГУ.

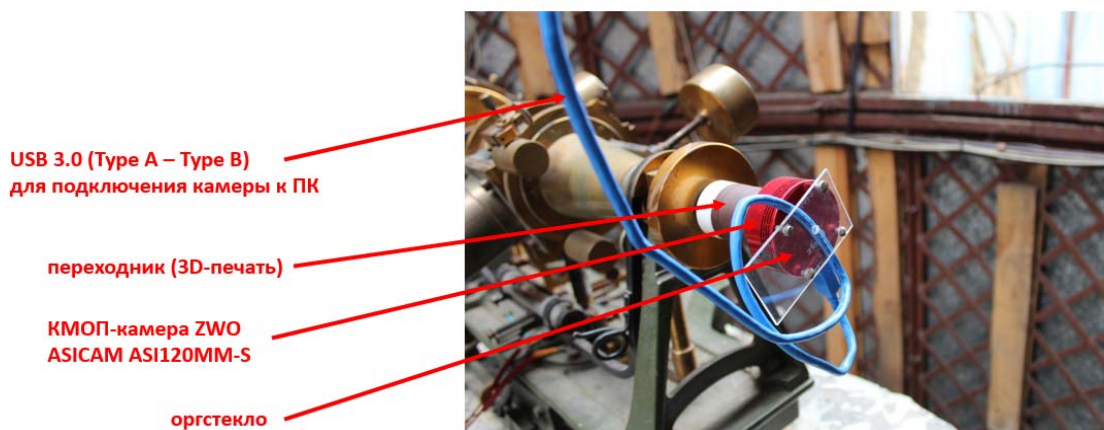


Рис. 2. Модернизированный пассажный инструмент Vamberg

Проблема обработки изображений. В отличие от шума ПЗС матриц (рис. 3 слева) получаемые с использованием КМОП-матриц изображения содержат специфический шум (рис. 3 справа), выраженный в виде вертикальных или горизонтальных полос, проходящих через все изображение [5]. Проблема обработки подобных изображений известна и предложена методика ее решения [6], однако она не применима в рамках настоящей работы, т.к. в ней используется сглаживание, которое приведет к смещению энергетических центров изображений звезд относительно их истинных положений, и, соответственно, к дополнительной погрешности определения времени.

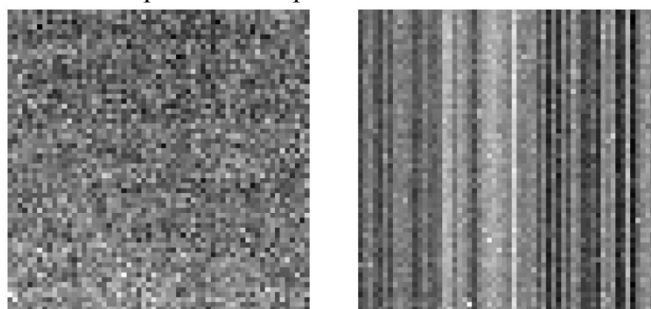


Рис. 3. Сравнение шума ПЗС-матрицы (слева) и КМОП-матрицы (справа)

Проведенные исследования показали, что положение и уровни яркости шумовых полос на изображениях изменяются во времени достаточно медленно, что согласуется с [7].

Для фильтрации шумовых полос на изображениях, получаемых с использованием КМОП-матриц, был разработан алгоритм калибровки, заключающийся в формировании «мастер-кадра», представляющего собой сумму последовательности кадров, содержащих полосы, и вычитании полученного «мастер-кадра» из последующих кадров. Результаты применения предложенного алгоритма представлены на рис. 4.

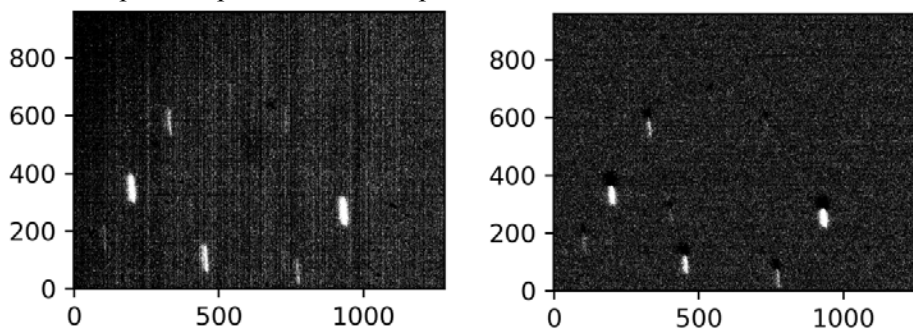


Рис. 4. Слева изображение, полученное без применения алгоритма калибровки, справа изображение, полученное после применения алгоритма калибровки (вычитания «мастер-кадра»)

Заключение. Приведено описание и результаты модернизации пассажного инструмента, принцип определения Всемирного времени, а также предложена методика калибровки кадров, полученных с использованием КМОП-матрицы, при наблюдениях методом прохождения [3]. Дальнейшие исследования будут направлены на оценку точности определения Всемирного времени с использованием модернизированного пассажного инструмента.

ЛИТЕРАТУРА

1. **M. Mondal, S. Shidlovskiy, D. Shashnev, M. Khaddour.** "Non-GNSS Navigation Systems in Aerial Vehicles (Multi-Rotors)// 2021 International Conference on Information Technology (ICIT). Amman, Jordan. 2021. pp. 451-455.
2. **Пешехонов В.Г.** Высокоточная навигация без использования информации глобальных навигационных спутниковых систем // Гироскопия и навигация. Том 30. №1 (116), 2022. С. 3-11.
3. **Витязев В.В., Гусева И.С., Кияев В.И., Мищенко М.П., Петров С.Д., Титов О.А., Цветков А.С.** "Небесные и земные координаты": Учеб. пособие - СПб, Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2011. - 314 с.
4. **Schartner M.** et al. VLBI Intensive sessions on a European baseline for the estimation of dUT1 //EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2018. – С. 14986.
5. **El Gamal A.,** EE392B: Introduction to Image Sensors and Digital Cameras, Lecture Notes, Lecture 7: Fixed Pattern Noise, URL: <https://isl.stanford.edu/~abbas/ee392b/lect07.pdf>
6. **Cao Y., He Z., Yang J., Cao Y. and Yang M.Y.Y.,** Spatially Adaptive Column Fixed-Pattern Noise Correction in Infrared Imaging System Using 1D Horizontal Differential Statistics. *IEEE Photonics Journal*, 2017, Vol. 9. № 5.: 1-13.
7. **T. Zhang, X. Li, J. Li, and Z. Xu,** "CMOS Fixed Pattern Noise Removal Based on Low Rank Sparse Variational Method," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 11, p. 3694, May 2020, doi: 10.3390/app10113694.

A.L.Tolstoy (Saint Petersburg State University, Saint-Petersburg). **Determination of Universal Time on modernized transit instrument.**

Abstract. The work is devoted to the modernization of the transit instrument for determining the Universal Time. The problem of artifacts of images obtained on CMOS matrices is revealed. A technique for calibrating images on a CMOS matrix is proposed, which excludes the appearance of false images, and, accordingly, increases the accuracy of determining the Universal Time.

УДК 62-529.4

А. Д. КЛИНОВИЦКИЙ

(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург)

ТРЕХОСЕВОЙ МАНИПУЛЯТОР ПОРТАЛЬНОГО ТИПА ДЛЯ УХОДА ЗА КУЛЬТУРНЫМИ РАСТЕНИЯМИ

Представлена разработка прототипа устройства «Умная грядка», а также программного обеспечения для него. В результате работы была создана 3D-модель масштабируемого трехосевого манипулятора портального типа и программное обеспечение, обеспечивающее в автоматическом режиме индивидуальный контроль показателей культурных растений на грядке.

Введение. Новые технологии, в частности, робототехнику, все чаще внедряют в различные сферы, например, в сельское хозяйство [1]. Однако существующие методы автоматизации ухода за растениями, как правило, не учитывают условия для каждого из растений в отдельности. Предлагаемый метод также подходит для полей с однотипными растениями, но не для участков, где растения разных видов растут вместе. Например, для домашнего огорода, где растут одновременно различные виды овощей и фруктов или при проведении экспериментов с несколькими видами растений с различными условиями ухода для них. Предлагаемый доклад посвящен созданию трехосевого манипулятора портального типа для ухода за культурными растениями, который может работать во всей плоскости почвы, при этом система датчиков и камера позволят поддерживать оптимальные условия для культурных растений и обнаруживать сорняки на всей грядке.

Постановка задачи. Задачей работы является создание устройства и программного обеспечения для него, способного осуществлять индивидуальный уход за каждым из растений на грядке, с учетом предпочитаемых и текущих метрик, таких как влажность и освещенность, а также поиск сорняков при помощи систем технического зрения. Также учитывается необходимость регулярного полива растений, что ограничивает гибкость графика. Решение поставленной задачи позволит автоматизировать процесс ухода за растениями, учесть и уменьшить влияние человеческого фактора и, освободить время людей, которые занимаются уходом за растениями.

Конструкция манипулятора должна учитывать легкое масштабирование его габаритов для установки на различные грядки и исполнение с учетом необходимости работы в агрессивной влажной среде на улице или в теплице. Вся система должна работать в автоматическом режиме, но предусматривать информирование пользователя и возможность работы в ручном режиме через приложение.

Исходя из сформулированной задачи можно определить следующий перечень функций устройства:

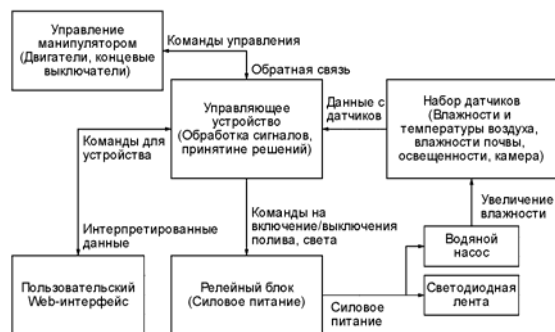


Рис. 1. Функциональная схема устройства

В состав устройства входит микрокомпьютер, управляющий манипулятором на который установлены датчики (фоторезистор и датчик влажности почвы) и камера. Полученные данные

устройства:

- 1) Сбор информации о растениях при помощи датчиков;
- 2) Обработка данных с датчиков;
- 3) Предоставление данных пользователю через сеть Интернет;
- 4) Выполнение действий по уходу за растениями в зависимости от состояния растения или по команде человека.

Функциональная схема устройства.

Функциональная схема устройства представлена на

обрабатываются в микрокомпьютере и выводятся пользователю через сеть Интернет в Web-интерфейс, а также используются для автоматического принятия решений.

Выбор манипулятора, который будет перемещать рабочий инструмент по грядке, зависит от необходимых операций. Существует множество манипуляторов, но манипулятор порталного типа подходит в данной задаче лучше всего, так как он легко масштабируется, имеет прямоугольную рабочую область, подходящую под стандартный вид грядок, а также обладает простотой в управлении [2].

Создание устройства. 3D-модель предлагаемого манипулятора порталного типа показана на рис. 2. Чтобы защитить конструкцию от коррозии, для каркаса выбран анодированный алюминий (AlMgSi 6063 T66), так как он обладает низкой плотностью, а значит небольшим весом, а также устойчив к воздействию влаги [3]. Рабочая область такого манипулятора легко масштабируется за счет увеличения длины направляющих, создавая возможность установки на различные типы грядок. Вся электроника должна находиться в корпусе, обладающем степенью защиты IP65, что позволяет использовать манипулятор в условиях дождя и влажной среды, а ввод проводов в корпус осуществляется с помощью водонепроницаемых вводов. Внешние датчики также располагаются во влагозащищенных корпусах, чтобы не допустить коррозии и короткого замыкания. В качестве приводов предлагается использовать шаговые двигатели, так как они обладают высоким моментом при низких оборотах и не требуют обратной связи при исключении пропуска шагов, а герметизация осуществляется при помощи лака без нарушения работоспособности.

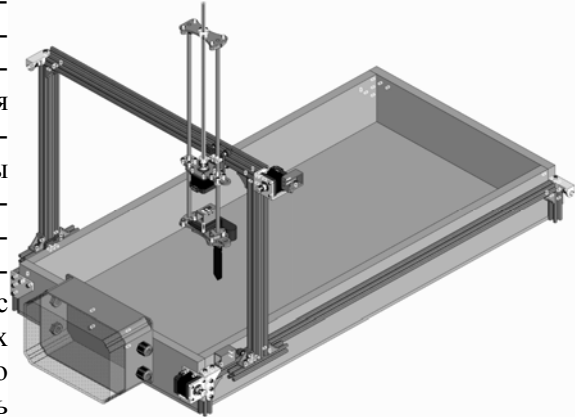


Рис. 2. 3D-модель манипулятора порталного типа

Программное обеспечение. Устройство имеет различные датчики, с разными интерфейсами сопряжения. Была разработана схема подключения устройств к микрокомпьютеру (рис. 3) с указанием используемых интерфейсов.



Рис. 3. Схема интерфейсов подключения устройств к микрокомпьютеру

Полученное растением в течение суток и включить подсветку при необходимости, соблюдая световой цикл для растения. Через заданные пользователем временные интервалы происходит панорамная съемка грядки под манипулятором, а при помощи алгоритмов сравнения кадров и известных координат расположения культурных растений определяются предполагаемые места появления сорняков, информация о которых выводится пользователю в приложение.

Заключение. В работе описан проект масштабируемого трехосевого манипулятора порталного типа. Была создана 3D-модель опытного образца и проект программного

обеспечения для него, предназначенное для индивидуального контроля в автоматическом режиме условий содержания культурных растений на грядке и включения при необходимости оросительной системы и системы подсветки для поддержания оптимальных условий, а также система фотообнаружения предполагаемых мест появления сорняков. Участие человека в процессе сведено к минимуму, система работает в полуавтоматическом режиме.

ЛИТЕРАТУРА

1. Загазежева О. З., Шалова С. Х. Перспективы развития сельского хозяйства на основе внедрения роботизированных технологий //Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2021. – №. 5 (103). – С. 21-32.
2. Израелян Г. М. Сравнительный анализ типовых конструкций манипуляторов в робототехнике // Научный журнал «EO IPSO». – С. 6.
3. Siddiqui R. A., Abdul-Wahab S. A., Pervez T. Effect of aging time and aging temperature on fatigue and fracture behavior of 6063 aluminum alloy under seawater influence //Materials & Design. – 2008. – Т. 29. – №. 1. – С. 70-79.

A. D. Klinovitskiy, (Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg). **Three-axis gantry-type manipulator for plants cultivation.**

The prototype of hardware «Smart Garden» with software is presented. Developed hardware consists of sensors, camera, and manipulator. Hardware provides the function of automatic plants cultivation from seeds to harvest.

УДК621.43

М.И.КЛИМОВ, Н.Ю.КИВВА, А. Д. ВАСЬКОВ
(МБУ ДО“ДДТ”, г. Реутов, Моск. обл.)

РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННОГО БИРОТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Разрабатывается инновационный бироторный двигатель с высоким коэффициентом полезного действия. В работе приводится общая конструктивная схема двигателя, описывается принцип его работы и анализируются преимущества двигателя перед существующими образцами двигателей внутреннего сгорания.

Введение. В последнее время на транспорте помимо традиционных (поршневых) двигателей внутреннего сгорания (ДВС) начали использоваться силовые установки на базе электродвигателей (гибридные и электрические), которые, однако, также имеют ряд недостатков.

К основным минусам поршневых ДВС относят [1]:

- низкий коэффициент полезного действия (КПД);
- большое содержание вредных веществ в выхлопных газах;
- большие габариты и масса.
- Силовые установки на базе электродвигателей характеризуются следующими недостатками:
 - малый запас хода, обеспечиваемый аккумуляторными батареями (АКБ);
 - длительное время зарядки АКБ (время полной зарядки АКБ легкового электрокара около часа при условии использования специальных зарядных станций; при зарядке от бытовой розетки для этого потребуется несколько часов);
 - отсутствие экологически безопасных технологий переработки отслуживших свой срок АКБ.

Предлагаемый доклад посвящен описанию инновационного бироторного двигателя, при разработке которого учитывались перечисленные выше недостатки.

Постановка задачи. Необходимо разработать двигатель внутреннего сгорания с высоким КПД, оказывающий минимальное загрязняющее воздействие на окружающую среду и работающий на традиционных видах топлива (дизельное топливо, все используемые марки бензинов, пропан-бутановая смесь, биотопливо), что облегчит его применение в перспективных мобильных системах.

Описание конструкции. В качестве конструктивной схемы разрабатываемого изделия была выбрана бироторная схема двигателя, приведённая на рисунке 1.

Такой двигатель обладает более высоким КПД за счет исключения из кинематической схемы кривошипно-шатунного механизма и механизма газораспределения [1, 2], при этом за счет более простой конструкции повышается надёжность при одновременном сокращении габаритов и массы.

Как и большинство существующих автомобильных бензиновых ДВС, данный двигатель работает по циклу Отто [3], однако его конструкция позволяет разбить рабочий цикл по отдельным секциям двигателя и организовать дополнительную степень расширения отработанного газа, сняв при этом с вала дополнительную мощность.

В каждой секции двигателя установлены по два ротора, имеющие профилированные специальным образом лопасти, установленные на параллельные валы и входящие в зацепление друг с другом. Вращение роторов геометрически согласовано посредством шестерён, установленных на концах валов. При этом рабочие камеры, в которых проходят процессы сжатия воздуха и расширения газа образованы поверхностями роторов и стенкой корпуса.

Научный руководитель: лаборант Белоусов Л.Н.

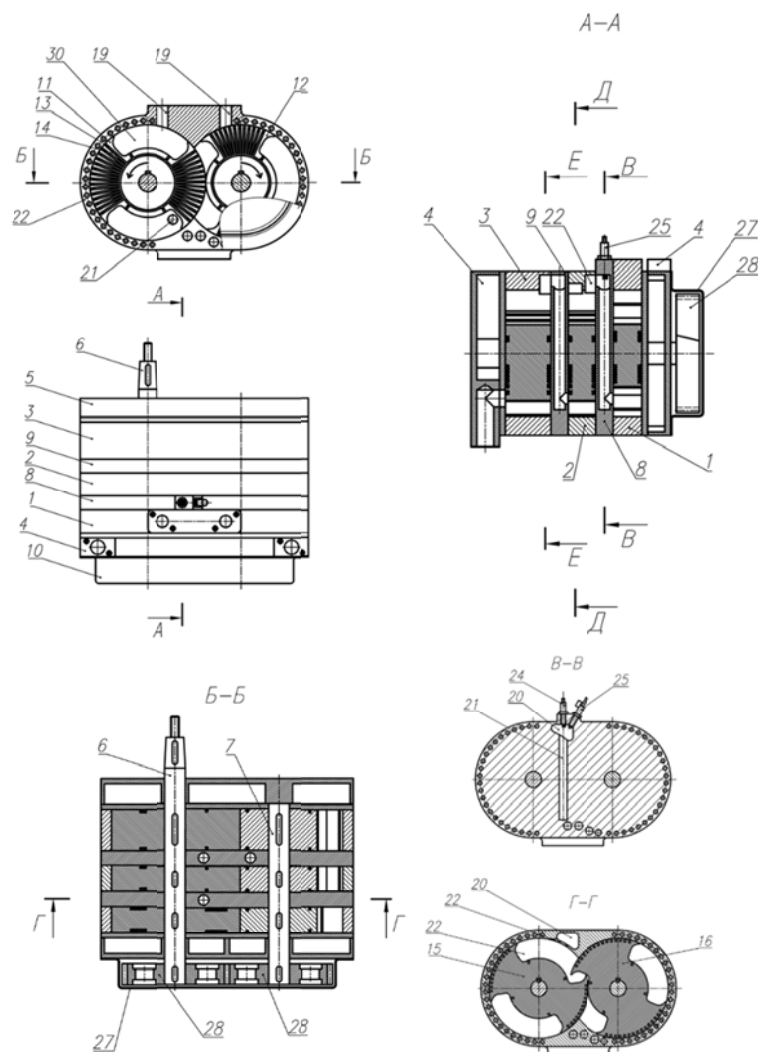


Рисунок 1 Схема бироторного двигателя внутреннего сгорания

1 – компрессорная секция; 2 – рабочая секция; 3 – расширительная секция; 4, 5 – передняя и задняя стенки; 6, 7 – валы; проставка с камерой сгорания; 9 – проставка с каналами подачи газа в расширительную секцию; 10 – редуктор; 11, 12, 15, 16 – роторы; 13 – канавки уплотнений; каналы охлаждения; 19 – каналы впускного коллектора; 20 – выпускной канал камеры сгорания; 21 – камера сгорания; 22 – рабочая камера с окном подачи газа; 24 – свеча зажигания; 25 – форсунка; 27 – крышка редуктора; 28 – шестерни редуктора.

Представленная конструкция секции двигателя обладает следующими достоинствами:

- большое расстояние от центра лопасти ротора до оси позволяет получить высокий крутящий момент на валу при маленьких габаритах секции двигателя;
- все нагрузки от давления в рабочих камерах секции передаются навалы, при этом, отсутствует давление роторов на стенки корпуса и, как следствие, сильно снижается механический износ роторов и корпуса секции;
- при работе двигателя, в отличие от существующих ДВС, вследствие отсутствия в его конструкции деталей, совершающих возвратно-поступательные движения, а так же симметричности всех вращающихся деталей, отсутствует перемещение его центра масс;
- роторы двигателя играют роль клапанов, что позволяет исключить из конструкции двигателя механизм газораспределения;

Заключение. Представлена конструкция разработанного инновационного бироторного двигателя, обладающего рядом преимуществ по сравнению с двигателями внутреннего сгорания и электродвигателями. В настоящее время разрабатывается бензиновая версия двигателя, но его конструкция позволяет использовать и другие традиционные виды топлива.

ЛИТЕРАТУРА

1. Б.А. Шароглазов, М.Ф. Фарафонов, В.В. Клементьев. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование расчетов и процессов. С. 163–168
2. В.И. Гладков, Основы двигателестроения. С. 234–236
3. А.И. Дашенко. Технология двигателестроения. С. 96–100

M.I. Klimov, N.Y. Kivva, A.D. Vaskov(MBI AE "HCG", Reutov Moscow region). **Development of an innovative rotary engine**

Abstract. An innovative bi-rotor engine with a high efficiency is being developed. The work provides a general design diagram of the engine and the principle of its operation, and analyzes the advantages of the engine over existing models of internal combustion engines.

Секция 10.
ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.518.3

Д.В.РОМАЕВ
(АО «НАВИС», Санкт-Петербург)

М.Р.ХИДОЯТОВ
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им В. И. Ленина «ЛЭТИ»,
Санкт-Петербург)

**ИЗМЕРЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ КООРДИНАТЫ ПРИ ВЫСОКОТОЧНЫХ РАБОТАХ
В РЕЖИМАХ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ. АНАЛИЗ ПОКАЗАНИЙ
ДАТЧИКОВ, ОСНОВАННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРИНЦИПАХ**

Анализируются характер ошибки и сбои измерений высоты, сделанных различными приборами (приемником спутниковой навигации, инерциальной навигационной системой, датчиком глубины) в ходе натурных испытаний системы динамического позиционирования DP5000.

Введение. Система управления динамическим позиционированием (СУ ДП) [1, 2, 3] может обеспечивать различные режимы движения судна – от мягкого удержания в точке и координированного управления при помощи джойстика управления для круизных судов и яхт до высокоточных работ при кабелеукладке, бурении, дноуглубительных и насыпных работах. Для некоторых работ с использованием СУ ДП требуется иметь высокоточное измерение высоты (вертикальной качки). В докладе анализируется точность измерений высоты, основанных на различных физических принципах, в ходе работы системы DP5000 [4] (АО Навис). Судно двигалось со скоростью до 0.5 уз на волнении до 3 баллов. Глубина акватории составляла около 15 метров.

Измерения глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) - GPS/ГЛОНАСС. Приемник ГНСС – определяет высоту относительно референц-эллипсоида. Протокол NMEA 0183 предусматривает выработку приемниками сообщения GGA, содержащего высоту над уровнем моря и разность высоты поверхности референц-эллипсоида и уровня моря. В работах [5, 6] было показано, что при работе в режиме Fixed RTK (получение дифференциальных поправок с базовой станции расположенной в непосредственной близости от приемника ГНСС) точность измерения высоты от ГНСС составляет несколько сантиметров. Ошибки в этом режиме состоят из шумовой составляющей с малыми амплитудами, погрешности в виде медленно меняющихся трендов и скачков при смене «созвездий» спутников (величина скачка порядка 5 см). При нормальной работе в Fixed RTK такой точности достаточно для обеспечения вышеупомянутых операций. Основные сложности возникают при переключении из Fixed RTK в другие режимы. Такие переключения сопровождаются существенной потерей точности (на рис.1 выброс в районе 500 секунды). Возможны как кратковременные (на несколько секунд), так и долговременные (на десятки секунд) интервалы потери точности.

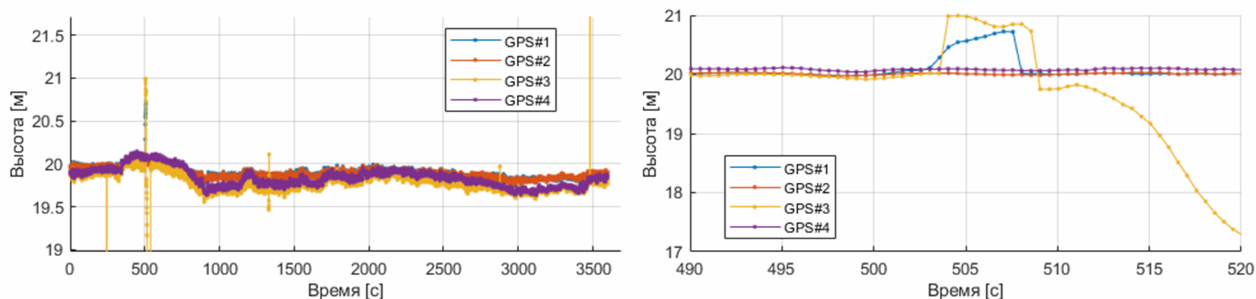


Рис. 1. Показания высоты, полученные четырьмя приемниками ГНСС, и фрагмент выброса

Данное обстоятельство вынуждает дополнять измерения ГНСС измерениями датчиков, основанных на других физических принципах (комплексирование данных). Основные задачи комплексирования – обеспечение устойчивости к сбоям и скачкам в измерениях, а также повышение точности измерения вертикальной качки (колебаний с периодами 3-8 секунд амплитудой 5-50 см).

Измерения инерциальных навигационных систем (ИНС). При проведении испытаний на судне использовались три ИНС типа Ekinoh [6, 7], которые корректировались от показаний внешних приемников ГНСС (их измерения рассматривались выше). Сравнение данных высоты от приемников ГНСС с данными высоты от Ekinoh показывает, что измерение вертикального ускорения позволяет сгладить высокочастотную составляющую (частоты которых много больше частот качки судна) ошибки измерений ГНСС, но не позволяют устранить медленноменяющуюся составляющую ошибки рис.2 (медленный дрейф). При потере у приемника ГНСС используемого для коррекции Ekinoh режима Fixed RTK происходит быстрый рост погрешности показаний высоты как самого приемника ГНСС, так и использующего его Ekinoh. В данной ситуации ИНС обеспечивает прогноз координат с приемлемой точностью лишь на коротком интервале времени (рис. 2). Характер погрешности высоты ИНС – низкочастотные тренды иного характера, чем у ГНСС.

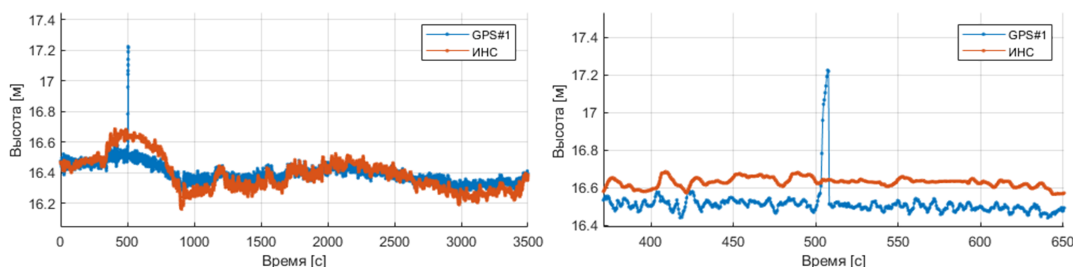


Рис.2. Показания приемника ГНСС и ИНС, сбой показаний приемника

Датчик глубины. В ходе испытаний использовался также датчик глубины, совмещающий в себе эхолот и датчик давления. Датчик выдает сообщения по протоколу NMEA 0183, содержащие глубину под килем и гидростатическое давление в месте установки датчика. Был проведен анализ этих данных совместно с актуальной картой промеров глубины (которая при выполнении работ регулярно обновляется, точность таких промеров порядка 2-5 см на данных глубинах [8]) для привязки к референц-эллипсоиду WGS-84, на работу с которым был настроен приемник ГНСС. Пример измерений датчика показан на рис.3. Оценка высоты, полученная таким образом, плохо согласуется с высотой, полученной по данным ГНСС, однако может быть использована в случае долговременной потери режима Fixed RTK ГНСС для диагностики выбросов.

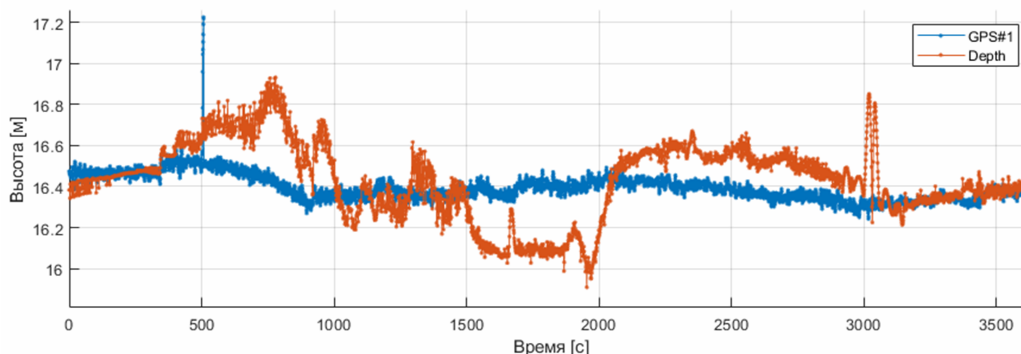


Рис.3. Высота по данным глубиномера и ГНСС

Заключение. В работе проведен анализ натуральных данных (одновременных измерений) нескольких ГНСС-приемников, ИНС и датчика глубины. Результаты анализа позволяют постро-

ить фильтр для выработки комплексной оценки высоты заданной точки на судне в условиях качки и сбоя датчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Fossen, Thor. Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control.// John Wiley & Sons, 2011
2. H. Fay, Dynamic Positioning Systems, Principles, Design and Applications. // Paris, France: Editions Technip, 2005
3. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами. //Л.: Судостроение, 1988. - 272 с., ил.
4. Система динамического позиционирования [Электронный ресурс] – URL: <https://navis.spb.ru/katalog/sistemy-dinamicheskogo-pozicionirovaniya/>
5. Фатеев, В. Ф. Использование сигналов ГЛОНАСС для измерения высоты / В. Ф. Фатеев, В. П. Лопатин // Мир измерений. – 2018. – № 1. – С. 28-32.
6. Голиков Д.А., Ромаев Д.В. Использование инерциальных датчиков при высокоточных работах систем динамического позиционирования. Материалы конференции «Транспорт России. Проблемы и перспективы». 2022
7. Инерциальная навигационная система Ekinoh [Электронный ресурс] – URL: sbg-systems.com
8. Турко, И. И. Методические особенности картирования подводного рельефа многолучевыми эхолотами / И. И. Турко, Г. В. Агапова // Океанология. – 2003. – Т. 43. – № 2. – С. 302-309. – EDN OOGPPP.

D.V.Romaev (Joint Stock Company “NAVIS”, Saint-Petersburg), M.R.Khidoyatov (Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, Saint-Petersburg). **Vertical coordinate measurements during high-precision work in dynamic positioning modes. analysis of sensor data based on various physical principles**

Abstract. The data of height measurements made by various devices during full-scale tests of the NavDP dynamic positioning system are considered. Among such devices: satellite navigation receivers, inertial navigation system, depth sensor. The nature of the error and failures in height measurements are analyzed.

УДК 629.78

П. В. ВАСИН, Е.В. БАРИНОВА
(Самарский университет, г. Самара)**ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МАСС-ЦЕНТРОВОЧНЫХ И ИНЕРЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСПУТНИКА
МЕТОДОМ СТАТИСТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ**

Для обеспечения высокого качества управления космическим аппаратом в космосе необходимо гарантировать низкие погрешности измерения его масс-центровочных и инерционных характеристик (МЦИХ). При экспериментальном определении данных характеристик используется метод крутильных колебаний, как наиболее точный. В работе анализируется влияние точностных характеристик стенда и параметров космического аппарата на погрешности измерения МЦИХ наноспутника (НС) методом статистических испытаний.

Введение. Качество управления движением космического аппарата на орбите зависит от множества факторов, среди которых можно выделить погрешности определения МЦИХ, значения которых используются в любом алгоритме управления движением [1-2]. МЦИХ включают в себя координаты центра масс (ЦМ) аппарата, а также составляющие его тензора инерции – всего 9 независимых характеристик.

Для экспериментального определения МЦИХ наноспутников формата CubeSat 1U-3U в Самарском университете был разработан стенд [3], основанный на принципе крутильных колебаний. Как показано в [4], данный метод относится к классу наиболее точных.

Погрешность определения характеристик на стенде не превосходит 0,5 мм для координат центра масс НС и 1,5% для его осевых моментов инерции. Данный диапазон был получен путём проведения натуральных экспериментов с наборным эталонным объектом с переменными МЦИХ [5]. Задача определения погрешностей измерений является многопараметрической, поэтому её решение путём проведения натуральных экспериментов требует больших временных затрат. В связи с этим предлагаемая работа посвящена решению задачи адаптации и применения метода статистического моделирования для оценки влияния точностных характеристик стенда и параметров НС на определяемые МЦИХ.

Оценка погрешностей определения МЦИХ НС. Задача оценки погрешностей экспериментального определения МЦИХ НС успешно решалась в [5] путём проведения натуральных экспериментов. Однако ввиду сложности оценки влияния каждого из факторов, вызывающих погрешности измерений, в отдельности было предложено использовать универсальный метод статистических испытаний. Данный метод даёт наиболее полные оценки погрешностей измерений среди прочих вероятностных моделей.

Проведение статистических испытаний. В работе была проведена серия экспериментов по определению МЦИХ для 3 вариантов сборки эталонного наборного объекта с массами 1,471, 3,559 и 5,993 кг. Для проведения статистического моделирования использовалась известная математическая модель, связывающая точностные характеристики стенда определения МЦИХ НС, параметры наноспутника и определяемые характеристики [6]. Поочерёдно в качестве случайных рассматривались следующие точностные характеристики стенда: точность изготовления оснастки, точность определения крутильной жёсткости торсиона, точность определения периода колебаний, а также параметры НС такие как масса и точность изготовления рамы. Схематично процесс исследования влияния точностных характеристик стенда и параметров наноспутника на точность определения его МЦИХ изображён на рисунке 1. При исследовании влияния точности определения координат центра масс на погрешности составляющих тензора инерции проводились статистические испытания, где в качестве случайных величин рассматривались координаты ЦМ, распределённые по нормальному закону. Выбор закона распределения был сделан на основе проведённого анализа влияния независимых случайных факторов на точность определения координат ЦМ, а также на основе свойства

предельности нормального закона распределения. Аналогичный подход был использован при исследовании влияния точности определения осевых моментов инерции на погрешности измерения центробежных моментов инерции. При проведении статистического моделирования с последующей обработкой результатов использовалось 15000 реализаций случайных факторов.

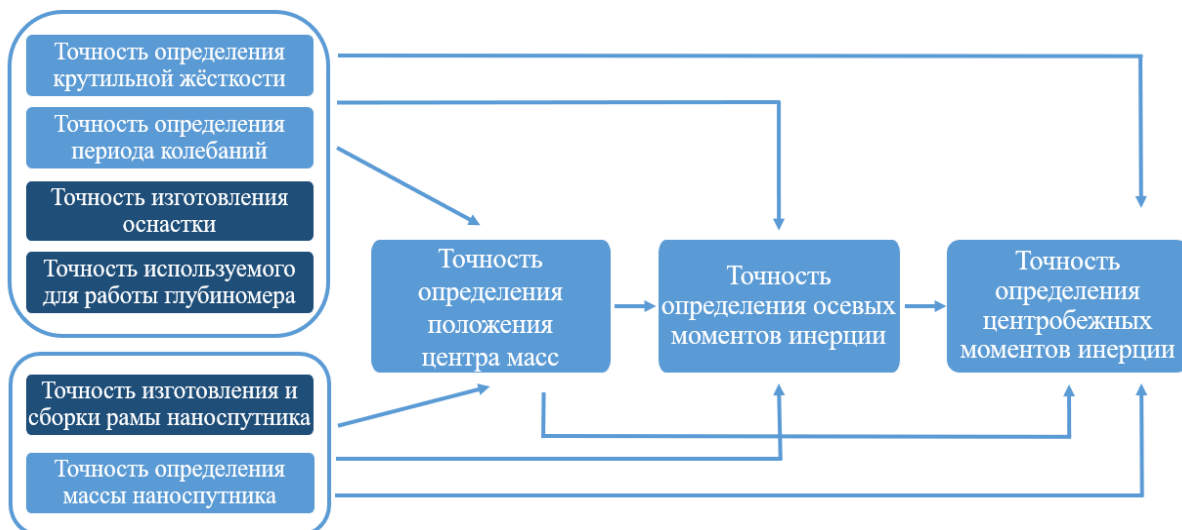


Рис. 1. Схема исследования влияния случайных факторов на точность определения МЦИХ наноспутника

При моделировании задавались следующие предельные (3σ) значения погрешностей: для массы – 1 г, для периодов колебаний – 0,5 мс, для линейных размеров с учетом неточности изготовления оснастки, используемого для работы глубиномера, изготовления и сборки рамы НС – 0,25 мм.

В таблицах 1–3 приведены результаты статистического моделирования для трех эталонов. Жирным шрифтом выделены наибольшие погрешности среди рассматриваемых. В правом столбце таблицы представлены абсолютные отклонения расчётных значений от полученных экспериментально. Следует отметить, что абсолютные отклонения от расчётных величин для каждого из параметров меньше, чем их "3σ", что полностью согласуется с результатами проведённого анализа.

Таблица 1

Результаты статистического моделирования для эталона массой 1,471 кг

Оцениваемый параметр	Предельные (3σ) погрешности оценивания МЦИХ, связанные с влиянием случайных факторов					Погрешности, полученные экспериментально
	Неточность массы	Неточность периодов колебаний	Неточность линейных размеров	Неточность крутильной жёсткости	Все случайные факторы	
x_c , мм	0,0013	0,11	0,18	0,01	0,21	0,05
y_c , мм	0,00002	0,10	0,18	0,0002	0,20	0,02
z_c , мм	0,00002	0,10	0,18	0,0002	0,20	0,02
I_x , кг·м ²	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-8}$	$5,3 \cdot 10^{-5}$	$5,6 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$
I_y , кг·м ²	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{-4}$
I_z , кг·м ²	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$2,3 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$
I_{xy} , кг·м ²	$3,4 \cdot 10^{-11}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$0,1 \cdot 10^{-5}$
I_{xz} , кг·м ²	$3,0 \cdot 10^{-11}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-9}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$0,02 \cdot 10^{-5}$
I_{yz} , кг·м ²	$5,5 \cdot 10^{-13}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$

Таблица 2

Результаты статистического моделирования для эталона массой 3,559 кг

Оцениваемый параметр	Предельные (3σ) погрешности оценивания МЦИХ, связанные с влиянием случайных факторов					Погрешности, полученные экспериментально
	Неточность массы	Неточность периодов колебаний	Неточность линейных размеров	Неточность крутильной жёсткости	Все случайные факторы	
x_c , мм	0,0057	0,07	0,18	0,12	0,23	0,07
y_c , мм	0,0031	0,05	0,18	0,07	0,19	0,15
z_c , мм	0,00001	0,05	0,18	0,0001	0,18	0,01
I_x , кг·м ²	$6,1 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$7,0 \cdot 10^{-6}$	$9,8 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-4}$
I_y , кг·м ²	$2,0 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-4}$
I_z , кг·м ²	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$5,0 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{-4}$
I_{xy} , кг·м ²	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$
I_{xz} , кг·м ²	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$6,4 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$
I_{yz} , кг·м ²	$1,3 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$0,2 \cdot 10^{-5}$

Таблица 3

Результаты статистического моделирования для эталона массой 5,993 кг

Оцениваемый параметр	Предельные (3σ) погрешности оценивания МЦИХ, связанные с влиянием случайных факторов					Погрешности, полученные экспериментально
	Неточность массы	Неточность периодов колебаний	Неточность линейных размеров	Неточность крутильной жёсткости	Все случайные факторы	
x_c , мм	0,02	0,06	0,22	0,54	0,59	0,04
y_c , мм	0,0009	0,04	0,18	0,03	0,19	0,47
z_c , мм	0,0004	0,04	0,18	0,02	0,19	0,31
I_x , кг·м ²	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{-4}$
I_y , кг·м ²	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-4}$
I_z , кг·м ²	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-4}$
I_{xy} , кг·м ²	$2,3 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
I_{xz} , кг·м ²	$1,1 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$4,7 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$0,3 \cdot 10^{-4}$
I_{yz} , кг·м ²	$6,8 \cdot 10^{-9}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	$0,1 \cdot 10^{-4}$	$0,1 \cdot 10^{-4}$

Факторный анализ. Полученные результаты были использованы при проведении факторного анализа, который позволил выявить случайные величины, вклад которых в формирование погрешностей измерений МЦИХ незначителен. Для наиболее весомых случайных факторов были подобраны требования, гарантирующие необходимую точность экспериментального определения МЦИХ НС.

Результаты проведённого факторного анализа выявили, что:

- 1) влиянием неточности определения массы наноспутника на погрешности определения его МЦИХ можно пренебречь;
- 2) неточность определения периодов колебаний формирует основную составляющую погрешности определения центробежных моментов инерции НС;
- 3) неточность определения группы линейных размеров, как правило, формирует основную составляющую погрешности определения координат ЦМ НС;
- 4) неточность определения крутильной жёсткости оказывает существенное влияние на погрешности определения всех МЦИХ НС и практически полностью формирует погрешность определения осевых моментов инерции.

Результаты проведённого факторного анализа для 3 вариантов сборки эталонного наборного объекта на качественном уровне одинаковы. Исключение составляет только крутильная жёсткость торсиона стенда. Влияние неточности её определения вносит существенный вклад в формирование не только осевых моментов инерции эталона массой 5,993 кг, но и координаты x_c его ЦМ. Данную зависимость необходимо исследовать дополнительно, чтобы снизить её влияние до приемлемых величин.

Заключение. В данной работе была проведена оценка погрешностей экспериментального определения МЦИХ наноспутников методом статистического моделирования для трёх вариантов сборки эталонного наборного объекта, рассмотрены основные случайные факторы, формирующие погрешности измерений. В ходе работы было выявлено, что влиянием неточности определения массы наноспутника можно пренебречь. Полученные результаты были проанализированы с целью выделения наиболее весомых и незначительных факторов формирования погрешностей измерений. Для обеспечения требуемой точности определения МЦИХ НС для наиболее весомых случайных факторов были подобраны требования, выполнение которых гарантирует низкие погрешности измерений.

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России

ЛИТЕРАТУРА

1. Коваленко А.П. **Магнитные системы управления космическими летательными аппаратами.** М.: Машиностроение, 1975. 248 с.
2. Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. Бортовые системы управления космическими аппаратами: Учебное пособие. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.
3. Белоконов И.В., Барина Е.В., Ивлиев А.В., Ключник В.Н., Тимбай И.А. Устройство для определения положения центра масс и моментов инерции объектов: патент РФ № 2698536; опубл. 28.08.2019; бюл. № 25.
4. Гернет М.М., Ратобильский В.Ф. Определение моментов инерции. М.: Машиностроение, 1969. 247 с.
5. Васин П.В., Барина Е.В. Методика определения погрешности стенда измерения масс-центровочных и инерционных характеристик наноспутников с помощью эталонных объектов // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 3. С. 7-22.
6. Belokonov I.V., Kliuchnik V.N., Barinova E.V., Ivliev A.V., Boltov E.A. Procedure of experimental evaluation of nanosatellite design parameters using the ground test equipment // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 984. Iss. 1.

P.V. Vasin, E.V. Barinova (Federal state autonomous educational institution of higher education «Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev», Samara). **Error estimation of experimental determination of nanosatellite mass-centering and inertial characteristics by the statistical testing method**

Abstract. To ensure high quality control of a spacecraft in space, it is necessary to guarantee low measurement errors of its mass-centering and inertial characteristics (MCIC). In the experimental determination of these characteristics, the method of torsional vibrations is used, as the most accurate. The paper analyzes the influence of the torsional platform characteristic accuracy and the nanosatellite parameters on the measurement errors of the nanosatellite MCIC by the statistical testing method.

УДК 629.78

М.С. ЩЕРБАКОВ, С.А. МЕДВЕДЕВ
(Самарский университет, Самара)

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ОДНОИМПУЛЬСНОГО МАНЕВРИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОДДЕРЖАНИЯ ИНСПЕКЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА ВЫСОКОЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ОРБИТАХ

В работе рассматривается инспекционное движение, при котором космический аппарат-инспектор (КА) совершает облёт объекта инспекции (ОИ), движущегося по высокоэллиптической орбите. Под действием возмущающего фактора, в качестве которого рассматривается нецентральность гравитационного поля Земли, возникает необходимость в периодическом проведении корректирующих манёвров для поддержания инспекционного движения. В работе исследуется возможность применения одноимпульсных манёвров для поддержания движения КА при движении ОИ по высокоэллиптическим орбитам с учётом особенностей орбитального движения и гравитационных возмущений.

Введение. Одним из видов группового полёта является инспекционное движение – облёт космическим аппаратом-инспектором (КА) объекта инспекции (ОИ) по периодической траектории в предположении компланарности орбит. Объектом инспекции может быть, как другой космический аппарат, который взаимодействует с инспектором, так и элемент космического мусора, визуальный осмотр которого производит КА. Во время движения КА и ОИ в центральном поле притяжения и соблюдения условия равенства орбитальных энергий инспекционная траектория КА представляет собой замкнутую кривую, в центре которой находится ОИ [1]. Для околокруговых орбит ОИ эта кривая представляет собой эллипс [2], а при движении ОИ по высокоэллиптическим орбитам, кривая принимает сложную форму, которая зависит от орбитальных параметров ОИ и выбора момента времени для реализации инспекционного движения.

При наличии возмущающих факторов инспекционная траектория перестаёт быть замкнутой, что может привести к невозможности выполнения инспекционной миссии КА. Вследствие этого необходимо проводить коррекцию инспекционной траектории. В качестве возмущающего фактора, влияющего на инспекционное движение, учитывается нецентральность гравитационного поля Земли, обусловленная её полюсным сжатием. В предыдущих работах [3-4] коллектива межвузовской кафедры космических исследований Самарского университета было установлено, что одноимпульсное маневрирование позволяет эффективно бороться с возмущениями гравитационной природы при движении ОИ по круговым орбитам. Движение ОИ по высокоэллиптическим орбитам усложняет процесс реализации инспекционного движения. Это обусловлено разницей орбитальной скорости в апогее и перигее орбиты как ОИ, так и КА. В результате скорость разрушения инспекционной траектории возрастает.

В работе исследуется возможность применения одноимпульсных манёвров для поддержания движения КА в малой окрестности номинальной инспекционной траектории при движении ОИ по высокоэллиптическим орбитам с учётом особенностей орбитального движения и гравитационных возмущений.

Постановка задачи. Периодическое инспекционное движение рассматривается в орбитальной системе координат $Oxuz$ (ОСК) с началом в центре масс ОИ и следующим расположением осей: ось Ox совпадает с радиус-вектором ОИ, ось Oy лежит в плоскости орбиты ОИ и направлена в сторону его орбитального движения, ось Oz дополняет систему координат до правой [5]. В центральном гравитационном поле инспекционная траектория имеет вид замкнутой кривой при условии выполнения равенства орбитальных энергий ОИ и КА. Под действием гравитационного возмущения, инспекционная траектория разомкнута и систематически смещается. Гравитационное возмущение учитывается с помощью коэффициента второй зональной гармоники гравитационного потенциала Земли. В работе

рассматривается смещение инспекционной траектории только в орбитальной плоскости. Процесс смещения возмущённой траектории (синий цвет) относительно номинальной (красный) показан на рис. 1. Чёрной точкой на рис. 1 обозначено положение ОИ.

Систематическое смещение инспекционной траектории может привести к опасному сближению КА и ОИ или невыполнению целевой задачи космической миссии вследствие увеличения относительного расстояния между ними. Для контроля изменения размеров инспекционной траектории (ИТ) используется критерий допустимой деформации:

$$|\rho| \geq 1,05 \cdot |\rho_{max}^*|, \quad (1)$$

где ρ – вектор координат КА в ОСК, который изменяется во времени; ρ_{max}^* – вектор координат наиболее удалённой от ОИ точки номинальной инспекционной траектории.

Интервал времени, на котором выполняется критерий допустимой деформации, называется временем технической устойчивости $T_{тех.уст.}$. Для поддержания инспекционного движения в окрестности номинальной инспекционной траектории на протяжении всей миссии необходимо проводить корректирующие манёвры. Одноимпульсная коррекция реализуется следующим образом. Вначале определяется момент времени нарушения (1). Затем рассчитываются точки для приложения корректирующего импульса, исходя из условия минимизации влияния гравитационного возмущения. Этот эффект достигается за счёт отсутствия в начальный момент времени реализации инспекционного движения радиальной проекции гравитационного ускорения, порождаемого второй зональной гармоникой гравитационного поля [6]. Эти точки определяются в соответствии с положением ОИ на своей траектории, которое характеризуется истинной аномалией (ϑ). Значения истинной аномалии ОИ, обеспечивающие минимизацию влияния гравитационного возмущения обозначаются ϑ_0 . За один орбитальный виток истинная аномалия ОИ четыре раза принимает описанное выше значение ($\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \vartheta_4$). В момент времени, когда ОИ оказывается в заданной точке своей орбиты (ϑ_0), прикладывается корректирующий импульс, обеспечивающий переход КА на обновлённую инспекционную траекторию в виде оскулирующей траектории относительного движения, которая формируется исходя из условия обеспечения равенства орбитальных энергий и которая была бы возможна, если бы в текущий момент времени КА и ОИ совершали движение в центральном поле притяжения. Корректирующий импульс рассчитывается по формуле:

$$\Delta\dot{\rho}(\vartheta_0) = \dot{\rho}_н(\vartheta_0) - \dot{\rho}_в(\vartheta_0), \quad (2)$$

где $\dot{\rho}_в(\vartheta_0)$ и $\dot{\rho}_н(\vartheta_0)$ – векторы скорости КА при движении по возмущённой и обновленной инспекционным траекториям в точке приложения корректирующего импульса в момент времени, когда истинная аномалия ОИ принимает значение $\vartheta(t) = \vartheta_0$. Действие одноимпульсной коррекции показано на рис. 1.

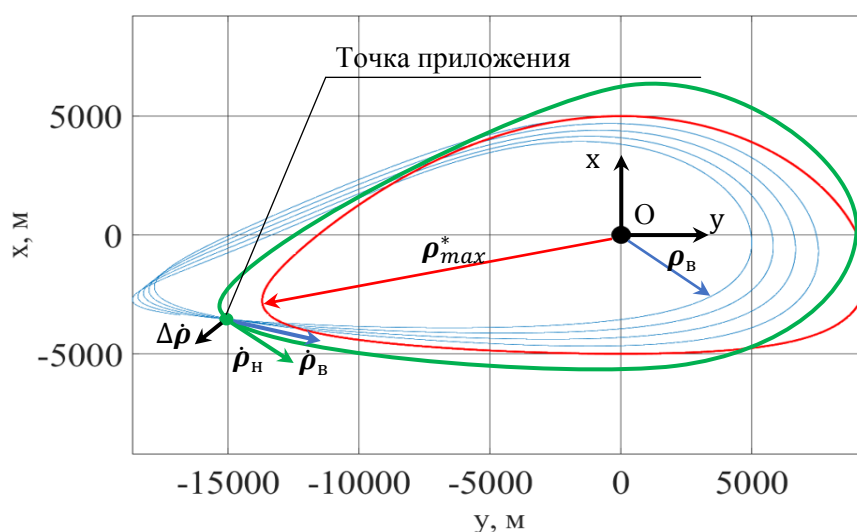


Рис. 1. Демонстрация одноимпульсной коррекции

В работе исследуется возможность применения одноимпульсной коррекции для поддержания инспекционного движения КА при движении ОИ по высокоэллиптическим орбитам.

Численное моделирование. Было проведено моделирование инспекционного движения в нецентральной гравитационном поле на высокоэллиптической орбите типа «Молния» с использованием математической модели вида [1]. Проведено четыре эксперимента по поддержанию инспекционного движения с помощью одноимпульсной коррекции. В каждом эксперименте рассматривается только одно положение ОИ на своей орбите для приложения корректирующего импульса (ϑ_0). Одноимпульсная коррекция реализуется следующим образом. После нарушения условия (1) КА продолжает совершать пассивное инспекционное движение до момента времени, когда истинная аномалия ОИ не примет выбранного значения, после чего прикладывается корректирующий импульс. Особенностью одноимпульсной коррекции в задаче инспекционного движения является то, что КА не возвращается на исходную инспекционную траекторию (показана красным цветом на рисунке 1), а переходит на обновлённую инспекционную траекторию (показана зелёным цветом на рисунке 1), для которой определяется свой вектор ρ_{max}^* .

Общее количество корректирующих импульсов – 5. Начальные параметры орбиты ОИ и начальные координаты КА в ОСК представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Начальные параметры орбиты типа Молния			
высота перигея h_{π} , км	эксцентриситет e_0	наклонение i_0 , °	аргумент перицентра ω_{π} , °
497	0,74	63,4	270

Таблица 2

Начальные координаты КА в ОСК		
x_0 , км	y_0 , км	z_0 , км
5	0	0

Результаты моделирования приведены на рис. 2 в виде значений $|\rho_{max}^*|$ и $T_{\text{тех.уст.}}$. При этом $|\rho_{max}^*|$ определяется каждый раз заново для обновлённой инспекционной траектории, на которую переходит КА после приложения корректирующего импульса. Продолжительность технической устойчивости ($T_{\text{тех.уст.}}$) определяет интервал времени пассивного инспекционного движения КА между приложением соседних корректирующих импульсов. На рис. 2 $\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \vartheta_4$ – значения истинной аномалии ОИ (ϑ_0), которые используются для приложения корректирующих импульсов (рассчитываются для орбиты ОИ, заданной в таблице 1).

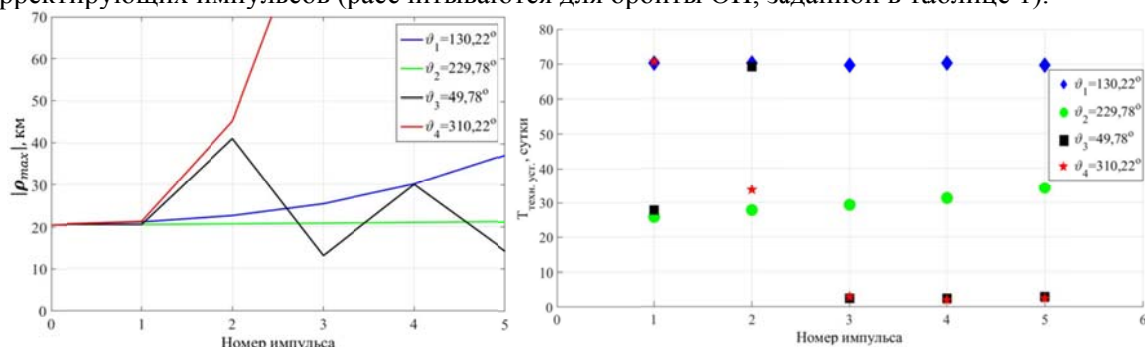


Рис. 2. Результаты расчётов

В результате исследования установлено, что использование одноимпульсных манёвров при $\vartheta_0 = \vartheta_1$ и $\vartheta_0 = \vartheta_2$ сопровождается сравнительно медленным увеличением $|\rho_{max}^*|$, тогда как приложение импульсов при $\vartheta_0 = \vartheta_3$ и $\vartheta_0 = \vartheta_4$ приводит к резким изменениям $|\rho_{max}^*|$ и значительному снижению $T_{\text{тех.уст.}}$. Различие результатов проведённого исследования

объясняется тем, что скорость орбитального движения КА в точках $(\vartheta_1, \vartheta_2, \vartheta_3, \vartheta_4)$ будет разной. Чем выше орбитальная скорость КА в точке приложения импульса, тем быстрее происходит деформация обновлённой инспекционной траектории (уменьшается продолжительность $T_{\text{тех.уст.}}$). Это приводит к увеличению расстояния между КА и ОИ в момент приложения корректирующего импульса ($\rho(\vartheta_0)$), что провоцирует увеличение размера обновлённой инспекционной траектории.

Заключение. Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о том, что размеры обновленной инспекционной траектории в результате применения одноимпульсной коррекции при $\vartheta_0 = \vartheta_3$ и $\vartheta_0 = \vartheta_4$ изменяются нестабильно, что приводит к увеличению топливных затрат и переходу КА на нерасчетную инспекционную траекторию. Использование двух других значений истинной аномалии ОИ ($\vartheta_0 = \vartheta_1$ и $\vartheta_0 = \vartheta_2$) для приложения корректирующих импульсов принципиально позволяют поддерживать инспекционное движение на высокоэллиптической орбите типа «Молния».

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ускова Е.А., Щербаков М.С.** Выбор орбитальных параметров и исследование устойчивости инспекционного движения по орбитам малой эллиптичности «Вестник молодых учёных и специалистов Самарского университета», 2020
2. **Белоконов И.В., Щербаков М.С.** Выбор начальных условий движения, обеспечивающих техническую устойчивость группового полёта космических аппаратов. XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. (25-29 Мая 2020 г.), Санкт-Петербург, Россия, ЦНИИ Электроприбор, Сборник трудов 2020
3. **Белоконов И.В., Халецкая Е.В., Щербаков М.С.** Стратегия импульсного маневрирования для поддержания квазипериодического инспекционного движения наноспутника. «Космонавтика и ракетостроение» №2, 2022. С. 112-124.
4. **Белоконов И.В., Щербаков М.С., Аваряскин Д.П.** Исследование одноосного алгоритма управления инспекционным движением гравитационно-стабилизированного наноспутника. XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. Сборник материалов, 2022, С. 121-125.
5. **Jian-jun Xing, Guo-jin Tang, Xiao-ning Xi, Hai-yang Li.** Satellite Formation Design and Optimal Stationkeeping Considering Nonlinearity and Eccentricity. M.: Journal of guidance, control, and dynamics, 2007. С. 1523-1527
6. **Щербаков М.С., Медведев С.А.** Исследование возможности применения оскулирующих эллипсов относительного движения в задаче инспекции космических объектов. Труды «НПЦАП» Системы и приборы управления, 2023. С. 42-50.

M.S. Shcherbakov, S.A. Medvedev (Samara university, Samara). **Analysis of the application of single-pulse maneuvering to support the inspection motion of the space vehicle in high elliptical orbits**

Abstract. The paper considers the inspection motion, in which the spacecraft inspector flies around the inspection object moving in a highly elliptical orbit. Under the influence of a disturbing factor, which is considered the non-centrality of the Earth's gravitational field, there is a need for periodic corrective maneuvers to maintain the inspection motion. The paper explores the possibility of using single-pulse maneuvers to maintain the movement of the spacecraft-inspector, when the inspection object moves along highly elliptical orbits, taking into account the features of orbital motion and gravitational disturbances.

УДК 681.3.069

Р. Б. ГОНЧАРОВ

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), город Санкт-Петербург)

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ОТЛАДКЕ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ СВЕРХМАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ТИПА CUBESAT, ОСНОВАННОЙ НА ИНФРАКРАСНЫХ ДАТЧИКАХ

Рассматривается метод автоматизации процедуры отладки системы ориентации наноспутника за счет получения опорной ориентации по показаниям бортовых датчиков угловой скорости. Целью работы является создание компьютерной программы, позволяющей получать параметры ориентации по показаниям гироскопов и инфракрасных датчиков. Приведены аналитические соотношения для двух используемых систем ориентации, предложенный подход экспериментально апробирован.

Введение. Система ориентации наноспутника на аппаратном уровне состоит из датчиков, получающих информацию о положении объекта в пространстве, бортового компьютера, обрабатывающего эту информацию и управляющих органов, обеспечивающих определенную ориентацию этого объекта, объединенных сетью контроллеров [1]. Для отладки системы ориентации необходимо провести калибровку датчиков, входящих в её состав. Калибровка – процесс определения коэффициентов ошибок датчика, в результате сравнения его выходного сигнала с опорным. По способу получения опорной ориентации различают автономную и неавтономную калибровки [2]. Автономная калибровка совершается с использованием внешнего опорного воздействия, обеспечиваемого местным гравитационным полем, угловой скоростью вращения Земли, однородным магнитным полем и так далее. Неавтономная калибровка обеспечивается точными инструментами, такими как высокоточный поворотный стол, центрифуга и прочими [3–5]. Доклад содержит описание эксперимента, математические модели получения параметров ориентации по показаниям датчиков угловой скорости (ДУС) и инфракрасных датчиков (ИК-датчиков), описание программы в виде алгоритма и результаты выполнения программы в виде графиков.

Проведение эксперимента. Эксперимент по отладке системы ориентации сверхмалого космического аппарата проводился в лабораторных условиях. Использованное оборудование: стол, инфракрасный излучатель, опорно-поворотное устройство (ОПУ), наноспутник с бортовой системой ориентации (ДУС и ИК-датчики) и персональный компьютер. В качестве параметров ориентации выступают углы Эйлера-Крылова.

В ходе эксперимента наноспутник жестко закрепляется на подвижной части ОПУ в заданном начальном положении, показанном на рисунке 1, из которого он поворачивается поворотным устройством вокруг вертикальной оси на 180 градусов.

Углы, полученные по показаниям ИК-датчиков, сравниваются с углами, полученными по измерениям ДУС. Согласно техническому заданию: среднеквадратичное отклонение разности между углами ориентации, полученными по ИК-датчикам и ДУС, должно быть не более трех градусов.

Эксперимент моделирует вращение наноспутника по продольной оси. В космосе источник инфракрасного излучения – Земля [6]. Поэтому неподвижная система отсчета $\xi\eta\zeta$, в рамках эксперимента связана с источником ИК-излучения: ζ – ось, направленная в центр источника излучения (моделирует направление вниз в системе NEd), ξ и η – оси, моделирующие направления на север и восток в системе NEd соответственно.

На рисунке 1 представлена схема экспериментального стенда. Оси x, y, z материализуются ИК-датчиками, расположенными на каждой из граней наноспутника, и соответствуют подвижной связанной системе координат: x – продольная ось спутника, y и z – оси спутника, направленные вправо и вниз соответственно, если смотреть по направлению оси x .

Научный руководитель: к.т.н., доцент кафедры Шалымов Р.В.

Поворот происходит относительно неподвижной связанной системы и соответствует повороту на угол крена φ .

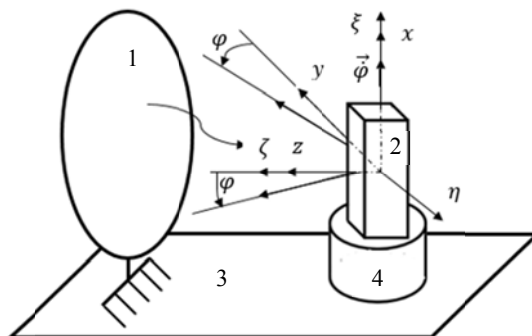


Рис. 1. Схема экспериментального стенда. 1 – ИК-источник, 2 – наноспутник, 3 – стол, 4 – ОПУ..

Получение параметров ориентации по показаниям ДУС и ИК-датчиков. Для получение эталонных углов показания ДУС обрабатываются с помощью метода кинематических уравнений Эйлера, отличающегося простотой, отсутствием избыточности вычислений и отсутствием неопределенности решения в рамках эксперимента. Эталонные углы вычисляются путем интегрирования кинематических уравнений [7]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\varphi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\varphi) \operatorname{tg}(\theta) & \cos(\varphi) \operatorname{tg}(\theta) \\ 0 & \cos(\varphi) & -\sin(\varphi) \\ 0 & \sin(\varphi) / \cos(\theta) & \cos(\varphi) / \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix},$$

где $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - показания ДУС, φ, θ, ψ – крен, тангаж и рысканье. В качестве начальных углов ориентации были заданы $\psi_0 = 0, \varphi_0 = 90^\circ, \theta_0 = 0^\circ$. Начальная выставка выполнялась с использованием поплавкового уровня.

Для получения углов с помощью ИК-датчика используются следующие соображения. Поле зрения инфракрасного датчика представляет собой телесный угол, проекцию которого можно представить в виде круга. Разбивая круг на кольца и присваивая каждому кольцу свой вес, в соответствии с диаграммой чувствительности ИК-датчика (рисунок 2) можно учесть ошибки измерения из-за нелинейности характеристики чувствительности датчика. Объединение двух ИК-датчиков в систему позволяет определить положение вектора направления на источник излучения, а вместе с ним и углы крена и тангажа.



Рисунок 2. Вид зависимости чувствительности ИК-датчика от угла падения.

Описание программы. На вход поступают проекции угловой скорости от ДУС и сигналы ИК-датчиков. Для показаний ДУС в программном виде реализуется вычисление углов φ, θ . Для ИК-датчиков составляется характеристика, отражающая зависимость температуры от угла поворота ОПУ. По этой характеристике измерению от ИК-датчика сопоставляется угол отклонения оси визирования от направления на источник излучения \vec{r} . Пусть углы между направлением на источник излучения и осями визирования ИК-датчиков $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$ равны α, β и γ соответственно. Тогда в координатном представлении векторы $\vec{r}, \vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$ по ортам $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$, образующих базис системы xyz , определяются следующим образом:

$$\vec{r} = r_x \vec{i} + r_y \vec{j} + r_z \vec{k};$$

$$|\vec{r}| = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2} = 1;$$

$$|\vec{n}_k| = 1, k = 1, 2, 3.$$

$$\begin{cases} \vec{n}_1 = n_{1x} \vec{i} + n_{1y} \vec{j} + n_{1z} \vec{k}; \\ \vec{n}_2 = n_{2x} \vec{i} + n_{2y} \vec{j} + n_{2z} \vec{k}; \\ \vec{n}_3 = n_{3x} \vec{i} + n_{3y} \vec{j} + n_{3z} \vec{k}. \end{cases}$$

Из скалярного произведения векторов:

$$\begin{cases} \vec{n}_1 \cdot \vec{r} = \cos(\alpha); \\ \vec{n}_2 \cdot \vec{r} = \cos(\beta); \\ \vec{n}_3 \cdot \vec{r} = \cos(\gamma). \end{cases}$$

Тогда в матричном представлении:

$$A = \begin{bmatrix} \vec{n}_1 \\ \vec{n}_2 \\ \vec{n}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{1x} & n_{1y} & n_{1z} \\ n_{2x} & n_{2y} & n_{2z} \\ n_{3x} & n_{3y} & n_{3z} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) \\ \cos(\beta) \\ \cos(\gamma) \end{bmatrix}; \quad \vec{r} = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix}, \quad A\vec{r} = B, \quad (1)$$

где A – матрица координат векторов осей визирования ИК-датчиков, B – вектор косинусов углов, измеренных по показаниям ИК-датчиков.

С помощью метода наименьших квадратов получаются оценки проекций r_x, r_y, r_z [8]. Согласно условию эксперимента ось ζ направлена в центр источника излучения, поэтому $r_\xi=r_\eta=0, r_\zeta=1$. Отсюда можно определить два угла: крен и тангаж.

$$\vec{r} = A^{-1}B = \begin{bmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} = A_{\psi\theta\phi} \begin{bmatrix} r_\xi \\ r_\eta \\ r_\zeta \end{bmatrix} = A_{\psi\theta\phi} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Здесь $A_{\psi\theta\phi}$ – матрица поворота на углы Эйлера-Крылова.

Результаты эксперимента. Эксперимент проводился при начальном угле курса 0 град. В таблице 1 приведены среднее значение и среднеквадратическое отклонение (СКО) ошибок тангажа и крена, полученных по ИК-датчикам. В качестве эталонных значений использовались углы, вычисленные по ДУС. Графики изменений тангажа и крена в ходе эксперимента представлены на рисунке 1. Сравнительно большое отклонение угла тангажа от нуля обусловлено начальным ненулевым наклоном подвижной платформы ОПУ.

Таблица 1.

Статистические характеристики ошибок определения углов с помощью ИК-датчиков

Ошибка крена		Ошибка тангажа	
Среднее	СКО	Среднее	СКО
2,4°	1,7°	4,3°	1,1°

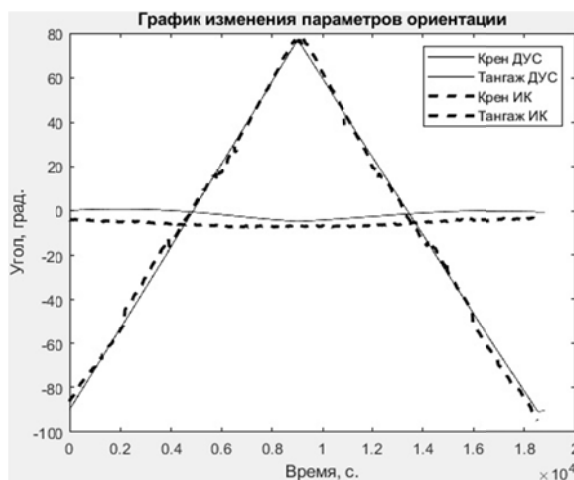


Рис. 1. Графики изменения крена и тангажа

Заключение. Создана программа, которая использует показания бортовых ДУС для определения эталонных значений углов ориентации. Программа позволяет ускорить процесс проведения эксперимента, освободить оператора от ручной записи показаний со шкалы ОПУ. В дальнейшем возможно модернизировать программу с целью автоматического определения скорректированных параметров модели выходного сигнала ИК-датчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **N. K. Y. B. K. a. G. I. Ure.** The Development of a Software and Hardware in the Loop Test System for ITU PSAT II Nano Satellite ADCS, IEEE, pp. 1–15, 2011.
2. **Ru, X.; Gu, N.; Shang, H.; Zhang, H.** MEMS Inertial Sensor Calibration Technology: Current Status and Future Trends. *Micromachines* 2022, 13, 879.
3. **Wang, S.; Ren, S.** Calibration of cross quadratic term of gyro accelerometer on centrifuge and error analysis. *Aerosp. Sci. Technol.* 2015, 43, 30–36.
4. **Choi, K.Y.; Jang, S.A.; Kim, Y.H.** Calibration of inertial measurement units using pendulum motion. *Int. J. Aeronaut. Space Sci.* 2010, 11, 234–239.
5. **Pan, J.; Zhang, C.; Cai, Q.** An accurate calibration method for accelerometer nonlinear scale factor on a low-cost three-axis turntable. *Meas. Sci. Technol.* 2014, 25, 025102.
6. **Tam Nguyen, Kerri Cahoy, Anne Marinan.** Attitude Determination for Small Satellites with Infrared Earth Horizon Sensors, *JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS* Vol. 55, No. 6, November–December 2018,
7. **А. В. Фомичев.** Кинематика точки и твердого тела. учеб. пособие . – Москва : МФТИ, 2021. – 128 с.
8. **Wang, B; Wang, H.; Jin, Z.** An Efficient Algorithm for Infrared Earth Sensor with a Large Field of View. *Sensors* 2022, 22, 9409.

R. B. Goncharov (Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg). **Automation of the experiment on debugging the attitude control system of an ultra-small cubesat spacecraft based on infrared sensors.**

Abstract. The work is based on the task of automating the experiment on debugging the nanosatellite orientation system based on infrared sensors. The solution is achieved by obtaining the reference orientation from the data from the onboard angular rate sensor. The aim of the work is to create a computer program that allows obtaining orientation parameters from gyroscopes and infrared sensors.

УДК 629.784

А. А. ПРУТЬКО
(ПАО «РКК «Энергия», Московская область, г. Королёв)

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ОТНОСИТЕЛЬНО ОРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНАТ НА УЧАСТКЕ ВЫВЕДЕНИЯ НА ОРБИТУ

Представлен алгоритм определения ориентации космического аппарата на участке выведения на орбиту ракетой-носителем. В алгоритме используются измерения датчиков угловых скоростей и акселерометров для интегрирования кватерниона ориентации, векторов скорости и координат, значения которых используются для вычисления требуемого кватерниона.

Введение. Определение ориентации связанной системы координат (ССК) космического аппарата (КА) относительно орбитальной системы координат (ОСК) [1] на участке выведения на орбиту ракетой-носителем необходимо для решения следующих задач: довыведение КА при помощи собственной двигательной установки при нештатном выведении на орбиту; управляемый спуск КА при возникновении аварии ракеты-носителя; нештатное отделение КА от ракеты-носителя.

Цель работы заключается в определении текущих векторов координат, скорости и параметров ориентации КА относительно текущей ОСК, используя совместные измерения датчиков угловой скорости (ДУС) и акселерометров с момента старта ракеты-носителя. Использование ДУС без подвижных механических элементов (например, волоконно-оптический гироскоп, твердотельный волновой гироскоп [2] и др.) позволяет использовать их на участке выведения на орбиту без опасений за их дальнейшее функционирование.

Описание алгоритма. Для определения ориентации необходимо решить следующие задачи:

1. определение кватерниона ориентации ССК на участке выведения относительно ССК, замороженной на момент старта ракеты-носителя (ССК₀);
2. определение кватерниона ориентации ССК₀ относительно геоцентрической системы координат, замороженной на момент старта ракеты-носителя (ГСК₀);
3. определение текущих векторов координат, скорости и параметров ориентации КА относительно ГСК₀ по измерениям акселерометров и ДУС;
4. расчет кватерниона ориентации ОСК относительно ГСК₀.

Для определения кватерниона ориентации ССК относительно ССК₀ необходимо проинтегрировать следующее кинематическое уравнение в кватернионном виде, например, методом Эйлера с коррекцией нормы [3]:

$$\dot{\mathbf{q}}_{ССК_0 \rightarrow ССК} = 0,5 \cdot \mathbf{q}_{ССК_0 \rightarrow ССК} \circ \boldsymbol{\omega}_{КА},$$

где $\boldsymbol{\omega}_{КА}$ – собственная угловая скорость КА, полученная по измерениям ДУС, \circ – кватернионное произведение. При этом $\mathbf{q}_{ССК_0 \rightarrow ССК}$ в начальный момент времени равен единичному кватерниону.

Кватернион $\mathbf{q}_{ГСК_0 \rightarrow ССК_0}$ является постоянным и определяется знанием широты и долготы стартового стола, азимута пуска ракеты-носителя и ориентации ССК относительно ракеты-носителя. Таким образом, можно определить ориентацию КА относительно ГСК₀ по формуле

$$\mathbf{q}_{ГСК_0 \rightarrow ССК} = \mathbf{q}_{ГСК_0 \rightarrow ССК_0} \circ \mathbf{q}_{ССК_0 \rightarrow ССК}.$$

Начальный вектор координат КА \mathbf{R}_0 определяется координатами стартового стола, а начальный вектор скорости КА \mathbf{V}_0 относительно ГСК₀ вычисляется как векторное произведение угловой скорости вращения Земли $\boldsymbol{\omega}_3$ и начального вектора координат КА: $\mathbf{V}_0 = \boldsymbol{\omega}_3 \times \mathbf{R}_0$. Показания акселерометров необходимо привести к ГСК₀ по формуле

$$\mathbf{a}_{ГСК_0} = \mathbf{q}_{ГСК_0 \rightarrow ССК} \circ \mathbf{a}_{ССК} \circ \tilde{\mathbf{q}}_{ГСК_0 \rightarrow ССК},$$

где $\mathbf{a}_{ССК}$ – вектор показаний акселерометров, $\tilde{\mathbf{q}}$ – сопряженный к \mathbf{q} кватернион. Поскольку акселерометры вырабатывают кажущееся ускорение, то при интегрировании ускорения для получения скорости КА необходимо добавить ускорение свободного падения \mathbf{g} , зависящее от текущего вектора координат КА [4]. Таким образом, скорость и координата КА относительно ГСК₀ вычисляются при интегрировании следующих дифференциальных уравнений, например, методом Рунге-Кутты 4 порядка [5]:

$$\dot{\mathbf{V}}_{ГСК_0} = \mathbf{a}_{ГСК_0} + \mathbf{g}, \quad \dot{\mathbf{R}}_{ГСК_0} = \mathbf{V}.$$

Для определения кватерниона ориентации $\mathbf{q}_{ОСК \rightarrow ССК}$ ССК относительно ОСК для начала найдем кватернион $\mathbf{q}_{ГСК_0 \rightarrow ОСК}$ ориентации ОСК относительно ГСК₀. Для этого определим орты $\mathbf{x}_{ОСК}$, $\mathbf{y}_{ОСК}$ и $\mathbf{z}_{ОСК}$ ОСК относительно ГСК₀ по следующим формулам:

$$\mathbf{y}_{ОСК} = \frac{\mathbf{R}_{ГСК_0}}{\|\mathbf{R}_{ГСК_0}\|}, \quad \mathbf{z}_{ОСК} = \frac{\mathbf{V}_{ГСК_0} \times \mathbf{R}_{ГСК_0}}{\|\mathbf{V}_{ГСК_0} \times \mathbf{R}_{ГСК_0}\|}, \quad \mathbf{x}_{ОСК} = \mathbf{y}_{ОСК} \times \mathbf{z}_{ОСК}.$$

Рассмотрим не вырождающийся алгоритм М.Б. Чертока для вычисления кватерниона ориентации из матрицы перехода [6]. Из ортов ОСК относительно ГСК₀ составим матрицу перехода из ГСК₀ в ОСК $\mathbf{M} = c_{ij}, i, j = 1..3$. Далее вычисляются

$$\begin{aligned} 1 + c_{11} + c_{22} + c_{33} &= 4\lambda_0^2, & 1 + c_{11} - c_{22} - c_{33} &= 4\lambda_1^2, \\ 1 - c_{11} + c_{22} - c_{33} &= 4\lambda_2^2, & 1 - c_{11} - c_{22} + c_{33} &= 4\lambda_3^2. \end{aligned}$$

Среди компонент $\lambda_{0..3}$ кватерниона $\mathbf{q}_{ГСК_0 \rightarrow ОСК}$ выбирается наибольшее по абсолютному значению. В зависимости от выбранной компоненты определяются

$$\begin{aligned} \lambda_0 &= \pm \frac{\sqrt{1 + c_{11} + c_{22} + c_{33}}}{2}, \lambda_1 = \frac{c_{23} - c_{32}}{4\lambda_0}, \lambda_2 = \frac{c_{31} - c_{13}}{4\lambda_0}, \lambda_3 = \frac{c_{12} - c_{21}}{4\lambda_0}, \\ \lambda_1 &= \pm \frac{\sqrt{1 + c_{11} - c_{22} - c_{33}}}{2}, \lambda_0 = \frac{c_{23} - c_{32}}{4\lambda_1}, \lambda_2 = \frac{c_{12} + c_{21}}{4\lambda_1}, \lambda_3 = \frac{c_{31} + c_{13}}{4\lambda_1}, \\ \lambda_2 &= \pm \frac{\sqrt{1 - c_{11} + c_{22} - c_{33}}}{2}, \lambda_0 = \frac{c_{31} - c_{13}}{4\lambda_2}, \lambda_1 = \frac{c_{12} + c_{21}}{4\lambda_2}, \lambda_3 = \frac{c_{23} + c_{32}}{4\lambda_2}, \\ \lambda_3 &= \pm \frac{\sqrt{1 - c_{11} - c_{22} + c_{33}}}{2}, \lambda_0 = \frac{c_{12} - c_{21}}{4\lambda_3}, \lambda_1 = \frac{c_{31} + c_{13}}{4\lambda_3}, \lambda_2 = \frac{c_{23} + c_{32}}{4\lambda_3}. \end{aligned}$$

Зная кватернионы $\mathbf{q}_{ГСК_0 \rightarrow ОСК}$ и $\mathbf{q}_{ГСК_0 \rightarrow ССК}$, можем вычислить кватернион $\mathbf{q}_{ОСК \rightarrow ССК}$ по формуле

$$\mathbf{q}_{ОСК \rightarrow ССК} = \tilde{\mathbf{q}}_{ГСК_0 \rightarrow ОСК} \circ \mathbf{q}_{ГСК_0 \rightarrow ССК}.$$

Заключение. Представлен алгоритм определения ориентации КА относительно текущей ОСК на участке выведения на орбиту ракетой-носителем. В алгоритме используются показания ДУС и акселерометров, работающих на участке выведения на орбиту ракеты-носителя, для интегрирования вектора состояния, необходимого для расчета кватерниона ориентации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Борисенко Н. Ю.** Об ускоренном построении орбитальной ориентации грузовых и транспортных кораблей серий «Союз МС» и «Прогресс МС» / Н. Ю. Борисенко, А. В. Сумароков // Известия РАН. Теория и системы управления. — 2017. — № 5. — С. 131—141.
2. **Матвеев В.В.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем / В.В. Матвеев, В.Я. Распопов. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2009. — 280 с.
3. **Бранец В.Н.** Применение кватернионов в задачах ориентации твёрдого тела / В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский. — М.: Наука, 1973. — 320 с.
4. Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). Справочный документ / Военно-топографическое управление генерального штаба вооруженных сил Российской Федерации — М.: 2014.
5. **Аристова Е.Н.** Практические занятия по вычислительной математике в МФТИ Часть I / Е.Н. Аристова, Н. А. Завьялова, А. И. Лобанов. — М.: МФТИ, 2014.
6. **Чуб В.Ф.** Основы инерциальной навигации / В.Ф. Чуб. — М.: ЛЕНАНД, 2021. — 192 с.

A.A. Prutko (S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia, Korolev, Moscow region). **An algorithm for determining spacecraft attitude relative to the orbital coordinate system at the launch site**

Abstract. An algorithm for determining spacecraft attitude at the launch site by a carrier rocket is presented. It is proposed to use the measurements of the angular velocity sensor and accelerometer to integrate the orientation quaternion, velocity vectors and coordinates, the values of which are used to calculate the required quaternion.

УДК 629.7.05

Н. П. СТАРОСТИН

(Раменское приборостроительное конструкторское бюро, Раменское, Московская область)

ОПТИКО-ИНЕРЦИАЛЬНОЕ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Рассматривается задача коррекции инерциальных навигационных систем (ИНС) в условиях отсутствия спутниковой информации. Оценивается возможность применения оптико-электронных средств, входящих в состав систем видео управления беспилотных летательных аппаратов. Представлены алгоритмы формирования оптико-инерциальных наблюдений при визировании наземных ориентиров с известными координатами. Результаты математического моделирования подтвердили достаточно высокую потенциальную точность оптико-инерциального позиционирования с обобщенным фильтром Калмана в контуре оценивания ошибок ИНС.

Введение. Современное состояние беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) характеризуется применением инерциально-спутниковых навигационных систем (ИСНС) [1]. В ИСНС глобальные навигационные спутниковые системы обеспечивают высокоточное позиционирование, а инерциальные - определение угловой ориентации. Однако применение спутниковых систем для позиционирования БПЛА имеет ряд ограничений, а именно [2]: воздействие естественных и имитационных помех; отражение сигналов от зданий и земной поверхности; пропадание сигналов из-за затенений при маневрировании; появление аномальных сигналов. В то же время наличие на борту БПЛА видеокамеры для дистанционного управления позволяет расширить навигационные возможности ИСНС на основе дополнительного оптико-электронного позиционирования БПЛА. Для этого могут быть использованы видимые наземные ориентиры с известными координатами. Традиционные подходы, реализующие такую технологию, предусматривают выполнение позиционной коррекции ИНС путем пролета БПЛА над известными ориентирами. В работе предлагается выполнять слежение на экране индикатора за изображениями ориентиров, которые находятся на видимом расстоянии от БПЛА. Коррекция ИНС реализуется на основе обработки с помощью обобщенного фильтра Калмана (ОФК) [3] наблюдений углов визирования. Изображение, полученное с помощью видеокамеры, привязано к координатной сетке в плоскости индикатора. С учетом фокусного расстояния видеокамеры азимуту и углу места линии визирования ориентира соответствует точка на экране индикатора.

Доклад посвящен исследованию на математической модели точностных характеристик оптико-инерциального позиционирования БПЛА по известным ориентирам на типовой траектории полета.

Формирование наблюдений при визировании наземного ориентира. Пусть единичный вектор \bar{e} направлен вдоль линии визирования наземного ориентира. Тогда этот вектор в проекциях на оси связанной с БПЛА системы координат $oxyz$ [4] будет иметь вид

$$\bar{e}_{xyz} = \{e_x, e_y, e_z\}, \text{ где } e_x = \cos \alpha \cos \beta; e_y = \sin \beta; e_z = -\sin \alpha \cos \beta; \quad (1)$$

α ; β – азимут и угол места ориентира в связанной с БПЛА системе координат $oxyz$.

На основании (1) соотношения для определения прогнозируемых значений углов визирования по информации ИНС примут вид

$$\alpha = -\arctg(e_z / e_x); \beta = -\arcsin e_y. \quad (2)$$

Вектор \bar{e}_{xyz} , компоненты которого участвуют в (2), определяются как $\bar{e}_{xyz} = B\bar{e}_{ENH}$, где $\bar{e}_{ENH} = \{e_E, e_N, e_H\}$ - вектор \bar{e} , представленный в географических осях, B – матрица, определяемая по показаниям углов крена, тангажа и курса от ИНС. В свою очередь, компоненты век-

¹Научный руководитель: д.т.н., профессор МАИ Чернодаров А.В.

тора \bar{e}_{ENH} рассчитываются с помощью выражений $e_E = \Delta E / D$; $e_N = \Delta N / D$; $e_H = \Delta H / D$, в которых $D = \sqrt{\Delta E^2 + \Delta N^2 + \Delta H^2}$; $\Delta E = (\lambda_{ор} - \lambda)R_\lambda \cos \varphi$; $\Delta N = (\varphi_{ор} - \varphi)R_\varphi$; $\Delta H = h_{ор} - h$; $\varphi_{ор}$, $\lambda_{ор}$, $h_{ор}$ - известные геодезические координаты (широта, долгота, высота над эллипсоидом) ориентира, φ , λ , h - вырабатываемые ИНС показания геодезических координат; R_φ , R_λ - радиусы кривизны земного эллипсоида.

Наблюдения для ОФК формируются в дискретные моменты времени i как разности прогнозируемых по информации ИНС и измеренных с помощью бортовой оптико-электронной системы (ОЭС) значений углов α , β

$$Z_i = [\alpha_i \beta_i]_{ИНС}^T - [\alpha_i \beta_i]_{ОЭС}^T. \quad (3)$$

Модель наблюдения (3) имеет вид $Z_i = \tilde{H}_i x_i + \vartheta_i$, в которой матрица \tilde{H}_i связи с вектором ошибок ИНС x_i [5] формируется путем варьирования соотношений (2) по входящим в них параметрам. Здесь ϑ_i - вектор ошибок измерения углов с помощью ОЭС.

Математическое моделирование выполнено с использованием имитационной модели программно-математического обеспечения ИСНС средней точности БИНС-500НС [5]. На рис. 1 показана круговая ошибка оценки местоположения БПЛА $\Delta S = \sqrt{\delta_\varphi^2 + \delta_\lambda^2}$ в режиме инерциального счисления координат с шагом коррекции по наземным ориентирам 5 минут. Здесь $\delta_\varphi = (\varphi_{ИНС+ОЭС} - \varphi)R$; $\delta_\lambda = (\lambda_{ИНС+ОЭС} - \lambda)R \cos \varphi$; $\varphi_{ИНС+ОЭС}$, $\lambda_{ИНС+ОЭС}$ - оценки широты и долготы БПЛА; φ , λ - истинные широта и долгота, R - радиус сферической Земли.

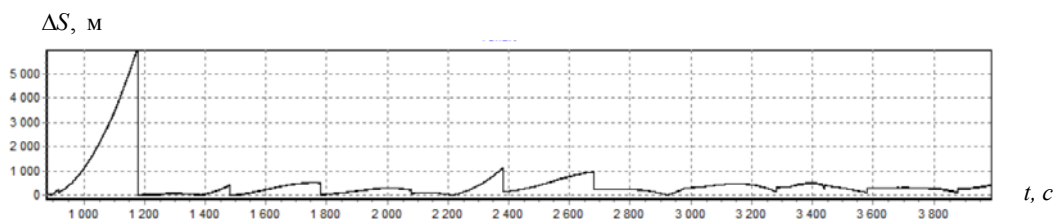


Рис. 1. Круговая позиционная ошибка в инерциальном режиме с коррекцией по наземным ориентирам

Заключение. Оптико-электронные средства, входящие в состав бортового оборудования БПЛА, могут быть использованы не только для управления по видео каналу, но и для оценки ошибок ИНС по наблюдениям наземных ориентиров с известными координатами. Предлагается формировать сигналы наблюдений в виде разностей измеренных и прогнозируемых по информации ИНС углов визирования ориентиров. Для оценки ошибок ИНС такие наблюдения обрабатываются с помощью ОФК. Проведенные исследования подтвердили возможность оптико-инерциального позиционирования БПЛА на базе ИНС средней точности с ошибкой, не превышающей 1000 метров (после $t=1200$ с), с учетом интервалов коррекции порядка 5 минут и оценок дрейфов чувствительных элементов ИНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биард Т. У., МакЛэйн Т.У. Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика / Пер. с англ. А.И. Демьяникова под ред. Г.В. Анцева. М.: Техносфера, 2015. 312 с.
2. Шмидт, Дж.Т. Эксплуатация навигационных систем на основе GPS в сложных условиях окружающей среды // Гироскопия и навигация. 2019. № 1. С. 3 - 21.
3. Степанов, О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. 509 с.
4. ГОСТ 20058-80. Динамика летательных аппаратов в атмосфере. М.: Издательство стандартов, 1981. 52 с.

5. **Чернодаров А.В.** Летная отработка инерциально-спутниковой навигационной системы БИНС-500НС в высоких широтах / А.В. Чернодаров, А.П. Патрикеев, О.А. Карпов // XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2018. С. 296 - 299.

N.P. Starostin (Ramenskoye Design Company, Ramenskoye, Moscow Region, Russia). **Optical-Inertial Positioning of Unmanned Aerial Vehicles**

Abstract. The paper is devoted to the problem of correction of inertial navigation systems (INS) in the absence of satellite information. For this purpose, the possibility of using optoelectronic means that are part of video control systems for unmanned aerial vehicles is being considered. Algorithms for the formation of optical-inertial observations when sighting landmarks with known coordinates are presented. The results of mathematical modeling have confirmed a sufficiently high potential accuracy of optical-inertial positioning with the extended Kalman filter in the INS errors estimation loop.

Таблица 1. 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
1	2	3	4	5	6	7
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)
2020	17-20 марта	300 (в т.ч. 4 зарубежных)	129 (3)	114 (0)	53 (в т.ч. 5 зарубежных)	16 (в т.ч. 5 зарубежных)
2021	16-19 марта	309(в т.ч. 5 зарубежных)	112(3)	101 (0)	50 (в т.ч. 2 зарубежные)	12 (в т.ч. 2 зарубежных)
2022	15-18 марта	250 (в т.ч. 9 зарубежных)	105(3)	91 (0)	36	12
2023	21-24 марта	342 (в т.ч. 10 зарубежных)	134(3)	118 (1)	46	16

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ

**МАТЕРИАЛЫ XXV ЮБИЛЕЙНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**
с международным участием

21–24 марта 2023

Верстка *А. А. Зуева*

Государственный научный центр Российской Федерации
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
197046, С.-Петербург, ул. Малая Посадская, 30