13-я МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ



6–8 октября 2020 г.
ГНЦ РФ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
Санкт-Петербург

МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ ВКЛЮЧАЕТ В СЕБЯ ПЯТЬ КОНФЕРЕНЦИЙ, ОБЪЕДИНЕННЫХ ОДНОЙ ИДЕЕЙ:

- XXXII КОНФЕРЕНЦИЯ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ КОНСТРУКТОРА ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ Н.Н.ОСТРЯКОВА
- «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ» (ИТУ-2020)
- «МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ» (МТУИП-2020)
- «УПРАВЛЕНИЕ В АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ» (УАКС-2020) ИМЕНИ АКАДЕМИКА Е.А.МИКРИНА
- «УПРАВЛЕНИЕ В МОРСКИХ СИСТЕМАХ» (УМС-2020)

МАТЕРИАЛЫ
XXXII КОНФЕРЕНЦИИ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ КОНСТРУКТОРА ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ Н. Н. ОСТРЯКОВА, 2020 Г.

7–8 ОКТЯБРЯ

Санкт-Петербург
2020

УДК 681.51

Материалы XXXII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. 345 с.

В настоящий сборник вошли тексты докладов, состоявшихся на XXXII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова, а также представленных на приглашенной секции «Наблюдатели и фильтры» – совместном заседании XXXII конференции памяти Н. Н. Острякова и конференции «Математическая теория управления и ее приложения» (МТУиП-2020).

Тексты публикуются в авторской редакции.

ISBN 978-5-91995-072-1

© Государственный научный центр Российской Федерации
АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020

ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНАЯ ГРУППА РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ
- ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РФ АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ИНСТИТУТ ИНФОРМАТИКИ И АВТОМАТИЗАЦИИ РАН
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «ЛЭТИ» ИМЕНИ В.И.УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
- УНИВЕРСИТЕТ ИТМО
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО
- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
- ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ РАН
- ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИМ. В.А.ТРАПЕЗНИКОВА РАН
- ВОЕННЫЙ УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВМФ «ВОЕННО-МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ ИМЕНИ АДМИРАЛА ФЛОТА СОВЕТСКОГО СОЮЗА Н.Г.КУЗНЕЦОВА»
- ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ («ГОСНИИАС»)
- РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ КОРПОРАЦИЯ «ЭНЕРГИЯ» ИМЕНИ С.П.КОРОЛЁВА
- АО «НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ»

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:

- ОТДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИКИ, МАШИНОСТРОЕНИЯ, МЕХАНИКИ И ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ РАН
- МЕЖДУНАРОДНОЙ ОБЩЕСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ «АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ»
- РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ
- ЖУРНАЛА «ГИРОСКОПИЯ И НАВИГАЦИЯ»
- ЖУРНАЛА «ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ И ПРОЦЕССЫ УПРАВЛЕНИЯ»

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРЕЗИДИУМА

13-Й МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИИ ПО ПРОБЛЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ
ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР АО «КОНЦЕРН «ЦНИИ «ЭЛЕКТРОПРИБОР»
АКАДЕМИК РАН **В.Г.ПЕШЕХОНОВ**

XXXII КОНФЕРЕНЦИЯ ПАМЯТИ Н.Н.ОСТРЯКОВА

ПРЕДСЕДАТЕЛЬ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА
АКАДЕМИК РАН **В.Г. ПЕШЕХОНОВ**

ЗАМЕСТИТЕЛИ ПРЕДСЕДАТЕЛЯ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **О.А. СТЕПАНОВ**
К.Т.Н. **А.В. СОКОЛОВ**

КОНФЕРЕНЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ» (МТУиП-2020)

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **Д.А. НОВИКОВ**
Д.Ф.-М.Н., ПРОФ. **Н.В. КУЗНЕЦОВ**

КОНФЕРЕНЦИЯ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В УПРАВЛЕНИИ» (ИТУ-2020)

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **В.Н. ВАСИЛЬЕВ**
Д.Т.Н., ПРОФ. **В.Н. ШЕЛУДЬКО**
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **Р.М. ЮСУПОВ**

КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ В АЭРОКОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ» (УАКС–2020)

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:
АКАДЕМИК РАН **С.Ю. ЖЕЛТОВ**
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **В.А. СОЛОВЬЕВ**
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **М.В. СИЛЬНИКОВ**

КОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ В МОРСКИХ СИСТЕМАХ» (УМС-2020)

СОПРЕДСЕДАТЕЛИ ПРОГРАММНОГО КОМИТЕТА:
АКАДЕМИК РАН **Е.И. ЯКУШЕНКО**
АКАДЕМИК РАН **С.Н. ВАСИЛЬЕВ**
ЧЛЕН-КОРРЕСПОНДЕНТ РАН **А.Ф. ЩЕРБАТЮК**

СОДЕРЖАНИЕ

XXXII КОНФЕРЕНЦИЯ ПАМЯТИ ВЫДАЮЩЕГОСЯ КОНСТРУКТОРА ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ Н.Н.ОСТРЯКОВА

Секция 1
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

С.В. Егоров, С.И. Шепилов
Датчик угловых скоростей на базе волнового твердотельного гироскопа 10

Б.П. Бодунов, С.Б. Бодунов, К.Б. Сагдеев, В.Ф. Журавлев, С.Е. Переляев
Принципиальная теория управления обобщенным маятником Фуко и прикладные аспекты ее реализации в современных волновых твердотельных гироскопах 13

Б.Е. Ландау, А.А. Белаш, С.Л. Левин, А.А. Медведков, С.Г. Романенко
Бескарданный злектростатический гироскоп с автокомпенсацией и без 18

Д.А. Никифоровский, Д.С. Смирнов, И.Г. Дейнека, А.Н. Никитенко, А.В. Рупасов
Исследование зависимости показаний волоконно-оптического гироскопа от температуры окружающей среды при высоких скоростях изменения температуры 21

М.В. Чиркин, В.В. Климаков, В.Ю. Мишин, А.Е. Серебряков, С.В. Устинов
Неустойчивость газового разряда в кольцевом лазере и эксплуатационная надежность лазерного гироскопа 26

В.М. Медведев, С.Г. Штек, М.А. Жеглов, В.И. Бусурин, К.А. Коробков
Разработка микрооптоэлектромеханических чувствительных элементов для систем навигации и управления 30

М.В. Салогуб
Исследование параметров математической модели микроэлектромеханического преобразователя угловой скорости 33

И.В. Папкова, О.А. Афонин, А.В. Крысько
Математическое моделирование физически нелинейных нанорезонаторов в виде балок в температурном поле с учетом нейтронного облучения 37

А.С. Митькин, В.А. Погорелов, В.П. Сизов
Двухосевой твердотельный микрогироскоп на поверхностных акустических волнах повышенной точности 41

Д.А. Михайленко, С.Ю. Шевченко
Сравнение мембран из AlN и Sio_2/$LiNbO_3$ как чувствительных элементов для измерения ускорения на поверхностных акустических волнах 45

Г.В. Безмен, А.Н. Шевченко
Выбор критериев и методов оценки качества работы подсистем ядерного магнитного гироскопа 49

А.С. Анохин, А.Д. Ворона, К.С. Кузьмин, В.М. Никифоров
Методика синтеза корректирующего контура акселерометра с чувствительным элементом на кремниевом подвесе и оценка его динамических параметров 52

С.А. Волобуев, П.А. Чесноков
Малогабаритный цифровой угломер на основе поплавковых маятниковых акселерометров 62

Д.А. Буров
Контроль параметров блока чувствительных элементов бесплатформенной инерциальной навигационной системы при воздействии вибрации и ударов 65

Секция 2
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Е.Г. Харин, И.А. Копылов, В.А. Копелович, А.Ю. Макарова
Результаты летных испытаний отечественных инерциальных навигационных систем 73

Д.В. Волынский, А.А. Павлов, Р.Я. Волкинд, Е.И. Кондратенко
Результаты испытаний малогабаритной бесплатформенной инерциальной навигационной системы на волоконно-оптических гироскопах 76

И.А. Шипов, Е.В. Ветошкин, А.В. Морозов
Интегрированные инерциально-спутниковые системы наземных робототехнических комплексов 79

А.В. Чернодаров, С.А. Иванов
Контроль и защита инерциально-спутниковых навигационных систем от имитационных помех 82

А.А. Голован, В.М. Железнов, Д.И. Смольянов, А.Ю. Мишин, Д.М. Фомин, Р.В. Белов
Задача выставки бескарданной инерциальной навигационной системы на подвижном основании в условиях информационных неопределенностей 85

Г.О. Баранцев, А.А. Голован, П.Ю. Кузнецов, А.В. Некрасов, И.Х. Шаймарданов, Е.Н. Тенюшев
Исследование точностных характеристик алгоритмов начальной выставки БИНС. Результаты натурных испытаний навигационной системы 89

А.А. Голован, В.М. Железнов, Д.И. Смольянов
Инерциальное счисление в приполярных районах: использование квазикоординат и квазиуглов ориентации 93

С.Б. Беркович, Н.И. Котов, А.В. Шолохов
Повышение точности автономного счисления координат наземных объектов путем оптимальной ориентации датчиков угловой скорости 97

С.В. Кривошеев, К.О. Лукин
Гироскопическая система для измерения взаимного положения рельсовых нитей по уровню 101

А.В. Большакова, А.М. Боронахин, Д.Ю. Ларионов, Л.Н. Подгорная, А.Н. Ткаченко, Р.В. Шалымов
Особенности испытаний и выбора микромеханических акселерометров для задачи диагностики рельсового пути 105

А.М. Боронахин, А.В. Вейнмейстер, П.А. Иванов, Е.С. Солянко, А.Н. Ткаченко
Метод оценки динамических погрешностей испытательных стендов, предназначенных для калибровки инерциальных датчиков 108

Ю.Г. Егоров, Г.Ю. Киряченко, Е.А. Попов
Субоптимальный алгоритм синтеза программы калибровки блока акселерометров 111

Д.О. Тарановский
Краткий анализ журнальных публикаций по инерциальной технике на основе данных международных баз научного цитирования 118

Д.Г. Грязин, Т.В. Падерина, И.В. Сергачев
О возможности использования судовых магнитных компасов в высоких широтах 122

Секция 3
Памяти заслуженного деятеля науки РФ И.Б. Челпанова

ОБРАБОТКА НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ
И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ

О.А. Степанов, М.И. Евстифеев, Ю.А. Литвиненко, О.М. Яшникова
Памяти заслуженного деятеля науки и техники РФ профессора И.Б. Челпанова 126

К.В. Дунаевская, В.Б. Костоусов, А.Е. Тарханов
Исследование метода оценки информативности геофизических полей 130

Д.В. Фуртас, Л.И. Августов, А.В. Некрасов, А.А. Дзуев
Алгоритм коррекции автономной наземной навигационной системы с использованием контуров местности 136

О.А. Степанов, А.С. Носов, А.Б. Торопов
Анализ эффективности уточнения координат подвижного объекта при одновременном использовании данных о нескольких геофизических полях 140

Е.А. Рыбаков, Р.У. Титов
Алгоритм решения задачи навигации по данным о геофизических полях с использованием ортогональных разложений 147

А.В. Моторин, Д.А. Кошаев, О.А. Степанов, О.М. Яшникова
Идентификация модели и сглаживание горизонтальных компонент возмущения силы тяжести для решения задачи векторной гравиметрии 149

Д.А. Кошаев
Рекуррентное построение сглаживающих сплайнов для аппроксимации данных гравиметрической съемки 153

О.С. Амосов, С.Г. Амосова
Оптимальное оценивание с использованием глубоких нейронных сетей применительно к навигации и управлению движением 160

Я.О. Анисимов, Д.А. Кацай
Глубокое обучение с подкреплением как парадигма автономного управления подвижным объектом 164

В.А. Галкин, А.В. Макаренко
Нейросетевой подход к распознаванию видимых созвездий по фотоизображению неба 166

Р.Ю. Порцев, А.В. Макаренко
Сравнительный анализ 3D-сверточных и LSTM-рекуррентных нейросетей в задаче распознавания действий на видео 170

О.Ю. Лукомская, Я.А. Селиверстов
О применении нейросетевых технологий для задач управления в когнитивных транспортных системах 174

А.В. Брагин, А.А. Голован, И.А. Папуша, А.А. Авиев
Об определении моментов начала и окончания движения объекта по информации инерциальной навигационной системы 178

А.Б. Шаповалов, В.В. Костюков, В.Л. Солунин, В.В. Щербинин, А.И. Новиков
Особенности редукции вектора оцениваемых параметров в инерциально-спутниковой навигационной системе беспилотных летательных аппаратов наземного базирования 181

В.А. Тупысев, Ю.А. Литвиненко, А.В. Лопарев
Использование метода особых преобразований при нелинейностях в уравнениях динамики и измерений 191

К.Д. Во, А.А. Бобцов, А.А. Пыркин
Наблюдатель переменных состояния линейной нестационарной системы при аддитивном синусоидальном возмущении выхода 194

А. Е. Пелевин
Идентификация параметров модели катера по экспериментальным данным 197

М.С. Финкельштейн, М.Б. Розенгауз, О.В. Зайцев
О некоторых подходах к оптимальному профилактическому обслуживанию навигационных систем 201

Т.Н. Сирая
Аттестация алгоритмов и программ обработки данных как оценивание качества обработки данных при измерениях 204

С.М. Тарасов
Исследование влияния инструментальной погрешности автоматизированного астроуниверсала в задаче определения азимута наземного ориентира 210

К.Д. Копылова, О.Н. Граничин
Минимизация погрешности радиоастрономического телескопа с помощью рандомизированного алгоритма стохастической оптимизации 216

Секция 4

ЭЛЕКТРОНИКА, ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Ю.В. Гречушкин, О.К. Епифанов
Особенности управления бесконтактными моментными электродвигателями с большой индуктивностью фаз в составе безредукторного электропривода гироприборов 219

Ю.В. Гречушкин, О.К. Епифанов
Особенности синтеза электромеханотронного модуля безредукторной следящей системы для задач высокоточного управления движением нагруженной оси 224

Н.А. Лукин, Л.С. Рубин
Маршрут проектирования высокочувствительного широкодиапазонного преобразователя «ток–код» 228

А.М. Грузликов, Н.В. Колесов, М.В. Толмачева
Высокоуровневое тестирование распределенных систем на основе модели из звеньев без потери информации 231

А.М. Грузликов, Н.В. Колесов, М.В. Толмачева
Использование разрешимых классов систем реального времени для планирования вычислений с минимизацией джиттера 234

Г.М. Тригубович, С.О. Шевчук, А.С. Сверкунов, Н.С. Косарев, В.Н. Никитин
Разработка совмещенной навигационно-измерительной системы для пилотируемой аэрогеофизической съемки 237

Секция 5

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

А.В. Соколов, А.А. Краснов, А.Б. Коновалов
Автоматизация технологии изготовления кварцевой упругой системы мобильного гравиметра 241

А.Ю. Филиппов, С.Н. Федорович, А.Г. Щербак
Комплексный подход к технологии изготовления роторов электростатических гироскопов 245

А.Ю. Филиппов, С.Н. Федорович, А.Г. Щербак
Моделирование термомеханического цикла при диффузионной сварке тонкостенных полусфер ротора электростатического гироскопа 249

М.В. Павлова, М.А. Тит, О.С. Юльметова
Управление технологическим процессом формирования оптических параметров ротора шарового гироскопа 253

Н.С. Каранин, М.А. Тит, С.Н. Беляев
Влияние стехиометрии на свойства бинарных функциональных покрытий на узлах гироприборов 257

Н.С. Каранин, С.Н. Беляев
Формирование покрытий на основе углеродных нанокластеров и фтора на узлах двухстепенного поплавкового гироскопа 261

С.А. Носков, Е.Е. Татаринов
Разработка технологии формирования продольных пазов в кварцевых преформах, предназначенных для изготовления оптического волокна с сохранением поляризации 265

Д.Р. Деветьяров, М.А. Ероньян
Радиационно стойкий одномодовый световод с сердцевиной из кварцевого стекла, обедненного кислородом 269

Д.П. Елисеев, К.С. Малашенков, Р.Г. Конаков
Применение 3D-печати металлами при проектировании виброударозащитных устройств для гироскопических приборов 273

А.Н. Шевченко
Технологические аспекты формирования и контроля газовой среды в полости ячейки квантового датчика 277

Приглашенная секция

НАБЛЮДАТЕЛИ И ФИЛЬТРЫ

Совместное заседание XXXII конференции памяти
выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Острякова
и конференции «Математическая теория управления и ее приложения» (МТУиП-2020)

И.Б. Фуртат, Б.Р. Андриевский
Наблюдатели возмущений и их приложения 281

О.А. Степанов, А.В. Моторин
Модели и методы в задачах оценивания при обработке навигационной информации 285

Д.В. Ефимов
Об оценивании вектора состояния с ускоренными темпами сходимости 289

М.В. Хлебников, Б.Т. Поляк
Фильтрация при произвольных ограниченных внешних возмущениях: техника линейных матричных неравенств 291

Е.А. Руденко
Сопоставление алгоритмов стохастической фильтрации 295

К.Д. Во, А.А. Бобцов
Наблюдатель переменных состояния для линейных нестационарных систем с неточно заданными параметрами 300

В.И. Ширяев, Е.О. Подивилова, Д.В. Хаданович
Алгоритмы гарантированного оценивания в условиях неполноты информации 304

О.Н. Граничин
Наблюдатели и фильтры: рандомизация как альтернатива для стохастических и детерминированных подходов 308

Ю.Г. Кокунько, А.С. Антипов, С.А. Краснова
Наблюдатели состояния как средство оценивания производных детерминированных сигналов 312

М.В. Басин, **О.А. Степанов, Ю.А. Литвиненко**, **В.А. Васильев, В.А. Тупысев**
Алгоритм полиномиальной фильтрации при наличии нелинейностей в уравнениях для измерений и вектора состояний 316

К.А. Рыбаков
Применение ортогональных разложений случайных процессов в непрерывном фильтре частиц 322

И.Б. Фуртат, **П.А. Гущин**
Наблюдатели возмущений и помех измерения для динамических систем с секторной нелинейностью 325

Д.Т. Хоанг, А.А. Пыркин
Адаптивный наблюдатель координат подвижного объекта 329

А.Б. Торопов, **А.В. Лопарев, А.Е. Пелевин**
Сравнение алгоритмов оценивания местоположения подводного аппарата при одномаяковой навигации 332

А.А. Ведяков, А.А. Пыркин, В.В. Беспалов, В.А. Антипов, Д.А. Чергинец
Адаптивный наблюдатель магнитного потока, угла поворота и угловой скорости вращения ротора синхронного двигателя с постоянными магнитами 336

Д.В. Краснов, А.В. Уткин
Наблюдатели состояний и внешних воздействий для электромеханического объекта управления с бездатчиковым манипулятором 341

Секция 1

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

С. В. ЕГОРОВ, С. И. ШЕПИЛОВ
(АО «Мичуринский завод «Прогресс», Мичуринск Тамбовской области)

ДАТЧИК УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ НА БАЗЕ ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА

В данной работе рассмотрен датчик угловых скоростей на базе волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором (ДУС ВТГ), подготовленный к опытному производству серийным заводом АО «Мичуринский завод «Прогресс» (АО «МЗП»).

Введение. АО «Мичуринский завод «Прогресс» (АО «МЗП») является серийным производителем элементов для гироскопической техники (гиромоторы, гироскопы, гиростабилизаторы), совместно с кафедрой «Приборы управления» Тульского государственного университета выполнил разработку конструкторской документации на ВТГ и изготовил макеты датчиков с электронным блоком управления.

С учетом имеющейся технологической базы АО «МЗП» была выбрана конструкция ВТГ с резонатором (чувствительным элементом), изготовленным из металла.

Конструкция ДУС ВТГ. Конструктивно ДУС ВТГ состоит из ВТГ и электронного блока [1]. На рис. 1 показано устройство ВТГ.

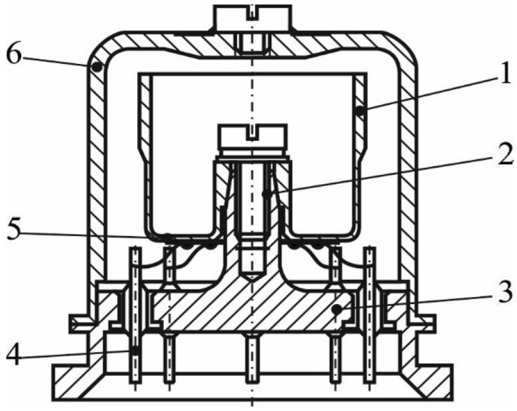


Рис. 1. Конструкция ВТГ: 1 – резонатор; 2 – винт, 3 – основание; 4 - гермовывод; 5 –пьезоэлемент; 6 – кожух

Выбор материала с заданными свойствами. Для изготовления резонатора ВТГ был выбран сплав 21 НКМТ-ВИ, имеющий минимальную температурную зависимость и высокую механическую добротность (Q) [2].

Собственная резонансная частота чувствительного элемента ВТГ зависит от геометрических размеров рабочего тела резонатора. Изменения геометрии рабочего тела, вызываемые из-

менением температуры в процессе работы, приводит к температурному дрейфу рабочей частоты резонатора и, следовательно, влияет на сигнал, получаемый от гироскопа.

На АО «МЗП» отработана технология термической обработки сплава 21 НКМТ-ВИ. В результате сплав заготовки получает однородную структуру с заданным размером зерна, оптимальное соотношение температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) и температурного коэффициента модуля упругости (ТКМУ) и высокую механическую добротность. Получение заданных и повторяемых свойств материала заготовки является важнейшим фактором, обеспечивающим постоянство параметров ВТГ [3–11].

Балансировка резонатора ВТГ. В рабочем режиме предполагается, что при идеальной геометрии и физико-механических свойствах резонатора форма механических колебаний соответствует второй форме собственных изгибных колебаний.

На АО «МЗП» разработана методика балансировки резонатора ВТГ. Схема подключения ВТГ при балансировке показана на рис. 2. При возбуждении резонатора по оси X, по оси X1 формируется сигнал «пучности» со сдвигом 90° по отношению к сигналу возбуждения, а по осям У, У1 формируются сигналы «узлов», деформация по этим осям минимальна.

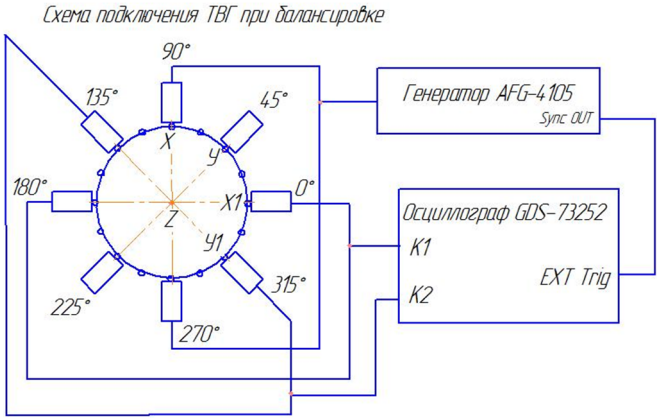


Рис. 2. Схема подключения ВТГ при балансировке

Из-за погрешностей сборки ВТГ, погрешностей изготовления резонатора резонатор имеет разночастотность по осям до 2 Гц, деформации узлов, сопоставимые с деформацией пучностей. После балансировки резонатора достигается разночастотность менее 0,05 Гц, соотношение сигналов «пучность–узел» – более 10, что повышает чувствительность ВТГ к измеряемой угловой скорости.

Заключение. В АО «МЗП» разработана технология получения оптимального структурно энергетического состояния и контроля физико-механических свойств резонатора ВТГ из материала 21НКМТ-ВИ, разработана технология балансировки резонатора ВТГ, обеспечивающая его высокую чувствительность к измеряемой угловой скорости.

Рассмотренная выше конструкция ДУС ВТГ при сравнительно простой конструкции и меньшей себестоимости обладает достаточной точностью для решения задач построения систем, определяющих угловые перемещения подвижного объекта, построения гироинерциальных блоков, стабилизации объекта.

ДУС ВТГ с металлическим резонатором, разработанный совместно ФГБОУ ВО «ТулГУ» и АО «Мичуринский завод «Прогресс», обладает следующими техническими характеристиками: диапазон измерения – ± 2000°/с; полоса пропускания – 50 Гц; случайный дрейф нулевого сигнала – менее 0,06 °/ч; ошибка масштабного коэффициента – 0,05%; потребляемая мощность – менее 4 Вт; время готовности – менее 3 с; диапазон рабочих температур – от –40° до +85°. В связи с отсутствие подвижных частей ресурс ВТГ достигает 500000 часов.

Работа подготовлена при консультации Владимира Яковлевича Распопова, доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля наук РФ, заведующего кафедрой «Приборы Управления» ФГБОУ ВО «ТулГУ»

ЛИТЕРАТУРА

1. **Распопов В.Я., Волчихин И.А., Волчихин А.И., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В., Матвеев В.В.** Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / под ред. В.Я. Распопова. Тула: Издательство ТулГУ, 2018. 189 с.
2. **Арзамасов Б.Н., Соловьева Т.В., Герасимов С.А.** Справочник по конструкционным материалам. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 640 с.
3. **Иванов Ю.Ф.** Влияние степени легирования материала на структуру пекетного мартенсита сплавов железа и сталей // Известия вузов. Черная металлургия. 1995.
4. **Скуднов С.В., Харитонов С.В**. Структура и физико-механические свойства элинварного сплава 44НХТЮ и технология изготовления упругого элемента цельного гироскопа из одной заготовки // Металлургия и материаловедение. Труды НГТУ им. Алексеева. 2014. №3 (105). С. 253–263.
5. **Лахтин Ю.М.** Металловедение и термическая обработка металлов. Издание 3-е, переработанное и дополненное. М.: Металлургия, 1983. 359 с.
6. **Молотилов Б.В**. Прецизионные сплавы. Справочник. М.: Металлургия, 1974. 448 с.
7. **Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г.** Специальные стали. Учебник для вузов. М.: Металлургия, 1985. 408 с.
8. **Новиков И.И.** Теория термической обработки металлов. Учебник. 4-е изд., испр. и доп. М.: Металлургия, 1986. 480 с.
9. **Иванов Ю.Ф.** Влияние степени легирования материала на структуру пекетного мартенсита сплавов железа и сталей // Известия вузов. Черная металлургия. 1995. №10. С. 52–54.
10. **Гуляев А. П.** Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 650 с.
11. **Огнезова С.А., Саенков К.Л.** Исследование влияния размера зерна на температуру фазового превращения железа при охлаждении до 4 К // Вестник ПНИПУ. 2016. Т. 18. №2. С. 187–199.

S.V. Egorov, S.I. Shepilov (JSC Michurinsk plant “Progress “, Michurinsk, Tambov region, Russia)

ANGULAR VELOCITY SENSOR BASED ON A WAVE SOLID-STATE GYROSCOPE

In this paper, we consider an angular velocity sensor based on a solid-state wave gyroscope with a metal resonator prepared for pilot production by a serial plant JSC Michurinsk Plant “Progress” (AO «MZP»).

Б. П. БОДУНОВ, С. Б. БОДУНОВ, К. Б. САГДЕЕВ
(АО «НПП «МЕДИКОН», г. Миасс, Челябинской обл.)

В. Ф. ЖУРАВЛЕВ, С. Е. ПЕРЕЛЯЕВ,
(Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, г. Москва)

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОБОБЩЕННЫМ МАЯТНИКОМ ФУКО И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПАХ

Изложены основы теории управления обобщенного маятника Фуко. Описаны принципиальные требования к законам управления, лежащие в основе функционирования приборов, входящих в рассматриваемый класс гироскопов, и сформулированы общие принципы построения законов управления их фазовым состоянием. Представлены прикладные аспекты реализации фундаментальной теории управления обобщенным маятником Фуко в высокоточных и прецизионных инерциальных датчиках, представлены инженерно-конструкторские решения в современных разработках волновых твердотельных гироскопов нового поколения на основе высокодобротных кварцевых полусферических резонаторов для низкодинамичных и высокодинамичных объектов авиационно-космического назначения.

Введение. Управляемый обобщенный маятник Фуко, свободный по углу прецессии, относится к волновым твердотельным гироскопам (ВТГ) интегрирующего типа. Это означает, что он может использоваться в навигационных системах как датчик интеграла от проекции угловой скорости на ось чувствительности. Три таких интеграла соответственно от трех проекций угловой скорости на взаимно ортогональные оси являются квазикоординатами, непосредственное использование которых для определения углового положения объекта невозможно. На практике для этой цели ограничиваются малыми приращениями квазокоординат с последующим их использованием в кинематических уравнениях Пуассона. Определенными преимуществами может обладать схема, в которой угол прецессии принудительно удерживается в малой окрестности фиксированного значения, а информация об угловой скорости получается по наблюдению управляющего сигнала. Такой гироскоп превращается в разновидность датчика угловой скорости. При этом он сохраняет преимущества интегрирующего гироскопа и освобождается от некоторых его недостатков, таких, например, как зависимость погрешностей от угла прецессии. При этом возникает ряд вопросов, связанных с формированием алгоритмов управления углом прецессии, исследованием устойчивости замкнутой системы и качества управления. Предлагаемый доклад посвящен теории управления обобщенным маятником Фуко и прикладным (инженерно-техническим) аспектам ее реализации в современных конструкциях точных ВТГ авиационно-космического назначения.

1. Принципиальная теория управления обобщенным маятником Фуко

1.1. Основные требования к системе управления парциальным осциллятором. Основной целью управления парциальным осциллятором является удержание его на фазовом многообразии $r = const, k = 0$ [1]. В фазовом пространстве переменных $(x, y, \dot{x}, \dot{y})$ двумерного осциллятора это многообразие представляет собой пересечение конуса нулевой квадратуры [2]

$$K = x\dot{y} - \dot{x}y = 0 \qquad (1.1.1)$$

со сферой постоянной амплитуды (полной энергии)

$$E = (x^2 + y^2 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2)/2 = const, \qquad (1.1.2)$$

соответствует семейству произвольно ориентированных прямолинейных отрезков одинаковой длины и симметричных относительно начала координат. От конкретно реализованного такого отрезка и осуществляется отсчет положения подвижного основания, поэтому многообразие постоянной амплитуды $(r = const)$и нулевой квадратуры $(k = 0)$ носит название отсчетного.

Законы управления обобщенным маятником Фуко, формируемые посредством введения различных обратных связей, должны удовлетворять следующим основным требованиям [2]:

1) асимптотическая устойчивость отсчетного многообразия;
2) инвариантность по отношению к группе вращения;
3) отсутствие интерференции каналов управления;
4) инвариантность к фазовому потоку невозмущенной системы;
5) инвариантность к трансляции по времени.

Первые два требования являются категорическими, от них зависит сама возможность превращения управляемого маятника Фуко в гироскоп. Три последних требования определяют качество управления. Известные первые примеры реализации законов управления, в частности в волновом твердотельном гироскопе (ВТГ/HRG) фирмы «Делко» (США), последним трем рассматриваемым требованиям не удовлетворяют. Для того чтобы законы управления были инвариантны по отношению к группе вращения, они должны быть сформированы из дифференциальных инвариантов этой группы. Группа вращений в плоскости имеет три независимых дифференциальных инварианта первого порядка:

$$I_0 = x^2, I_1 = \dot{x}^2 + \dot{y}^2, I_2 = x\dot{y} - \dot{x}y\,. \tag{1.1.3}$$

Для инвариантности управления по отношению к фазовому потоку невозмущенной системы эти инварианты должны быть ее первыми интегралами. Таких интегралов тоже три:

$$E = (I_0 - I_1)/2\,, K = I_2, L = xy + \dot{x}\dot{y}\,. \tag{1.1.4}$$

1.2. Характеристика сил, используемых для управления. Линейные по координатам и скоростям силы, прикладываемые к обобщенному маятнику Фуко с целью управления, в наиболее общей форме имеют вид [2]:

$$\left\|\begin{matrix}X\\Y\end{matrix}\right\| = (C + N + H)\left\|\begin{matrix}x\\y\end{matrix}\right\| + (D + \Gamma + G)\left\|\begin{matrix}\dot{x}\\\dot{y}\end{matrix}\right\|. \tag{1.2.1}$$

Силы, зависящие только от координат, называются позиционными силами. В матричном представлении они определяются следующими матрицами.

Симметрическая скалярная матрица потенциальных сил (силы сферического типа):

$$C = \left\|\begin{matrix}c & 0\\0 & c\end{matrix}\right\|, C = C^T. \tag{1.2.2}$$

Кососимметрическая матрица циркулярных сил:

$$N = \left\|\begin{matrix}0 & n\\-n & 0\end{matrix}\right\|, N = -N^T. \tag{1.2.3}$$

Циркулярная сила ортогональна радиусу вектору, силовые линии ее силового поля представляют собой окружности, что и объясняет ее название. В литературе встречаются и другие названия циркулярных сил: псевдогироскопические, собственно непотенциальные, силы радиальной коррекции. Симметрическая матрица потенциальных сил гиперболического типа с нулевым следом (девиатор):

$$H = h\left\|\begin{matrix}cos2\alpha & sin2\alpha\\sin2\alpha & -cos2\alpha\end{matrix}\right\|,\ \ trH = 0. \tag{1.2.4}$$

Угол α определяет положение главных осей жёсткости относительно осей (x, y).

Произвольная матрица позиционных сил раскладывается единственным образом в сумму приведенных трех матриц. Силы, линейно зависящие от скорости, в самом общем случае, также единственным способом раскладываются в сумму трех типов сил. Симметрическая скалярная матрица диссипативных сил сферического типа:

$$D = \left\|\begin{matrix}d & 0\\0 & d\end{matrix}\right\|. \tag{1.2.5}$$

Кососимметрическая матрица гироскопических сил:

$$\Gamma = \left\|\begin{matrix}0 & \gamma\\-\gamma & 0\end{matrix}\right\|, \Gamma = -\Gamma^{\mathrm{T}}. \tag{1.2.6}$$

Гироскопическая сила ортогональна вектору скорости.

Симметрическая матрица диссипативных сил гиперболического типа с равным нулю следом (девиатор диссипативных сил):

$$G = g\left\|\begin{matrix}cos2\beta & sin2\beta\\sin2\beta & -cos2\beta\end{matrix}\right\|,\ \ trG = 0. \tag{1.2.7}$$

Потенциальные и диссипативные силы гиперболического типа, определяемые девиаторами H и G, для целей управления обычно не используются. Силы такого типа в системе, как правило, возникают в результате наличия тех или иных дефектов. Для того чтобы эффективно управ-

лять колебаниями двумерного парциального осциллятора, необходимо вначале выяснить, к каким эволюциям состояния осциллятора приводят те или иные силы, определяемые матрицами $C, N, D,$ Г. Силы сферического типа (скалярная матрица C) приводят только к вариации частоты собственных колебаний осциллятора. Циркулярные силы (кососимметрическая матрица N) приводят только к вариации квадратуры. Диссипативные силы сферического типа (скалярная матрица D) приводят только к изменению амплитуды колебаний. Гироскопические силы (кососимметрическая матрица Г) приводят только к прецессии стоячей волны. Силы гиперболического типа (девиаторы H и G) для управления маятником не используются. Малые возмущения, в число которых включаются и электрические силы, необходимые для поддержания колебаний и управления ими, приводят к появлению в правой части системы уравнений осциллятора малых членов, зависящих от времени t, от пространственной переменной φ, от величины перемещения w и от производных w по времени и по φ. Кроме того, для упрощения выводов малыми будем считать все члены, содержащие входную угловую скорость ω и ее производную $\dot{\omega}$. Решение дифференциального уравнения рассматриваемого парциального осциллятора для основной формы колебаний в виде [2]:

$$w = x(t)cos2\varphi + y(t)sin2\varphi. \tag{1.2.8}$$

Заменой переменной времени можно уравнения двумерного осциллятора привести к виду, в котором собственная частота колебаний на основной форме равна единице:

$$\ddot{x} + x = \varepsilon Q_1(t, x, \dot{x}, y, \dot{y}), \ddot{y} + y = \varepsilon Q_2(t, x, \dot{x}, y, \dot{y}). \tag{1.2.9}$$

Правые части системы (1.2.9) зависят не только от переменных, определяющих фазовое состояние выбранной формы колебаний, но и от всех остальных форм.

В частном случае нулевой квадратуры ($K = 0$) силы с матрицей H не влияют на прецессию и амплитуду, а силы с матрицей G не влияют на квадратуру и частоту. Поскольку при нулевой квадратуре обнуляется не меньше половины дефектов, ее выгодно поддерживать равной нулю посредством управления. Вторая цель управления – это поддержание постоянной амплитуды колебаний. Напомним сформулированные выше пять требований, которым должны удовлетворять законы управления осциллятором с целью удержания полной энергии $E = const$ и квадратуры $K = 0$. Асимптотическая устойчивость этого многообразия и инвариантность к вращениям – это категорический императив. Без этих двух условий прибор как гироскоп просто невозможен. Требование отсутствия интерференции каналов управления является естественным. Если, например, управление по амплитуде и квадратуре вызывает прецессию формы, то это определяет погрешность в измерении вращения основания.

1.3. Уравнение идеального управляемого обобщенного маятника Фуко. В соответствии с полученной в работе [3] таблицей инфинитезимальных вариаций фазового состояния обобщенного маятника Фуко, для управления амплитудой колебаний при отсутствии интерференции каналов можно пользоваться только силами $D(\dot{x} + \dot{y})$. Стабилизированной амплитуде колебаний соответствует значение полной энергии, которое мы обозначим через E_0. Для реализации простейшей обратной связи по амплитуде достаточно коэффициент d, входящий в скалярную матрицу D, выбрать равным $d = \varepsilon(E_0 - E)$. Для управления квадратурой, не вызывая никаких других эволюций в простейшем случае, коэффициент n достаточно выбрать равным $n = \mu K$. В результате получаем следующие дифференциальные уравнения идеального управляемого обобщенного маятника Фуко [2]:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + x &= -\varepsilon(E - E_0)\dot{x} + \mu K y, \\ \ddot{y} + y &= -\varepsilon(E - E_0)\dot{y} - \mu K x, \end{aligned} \tag{1.3.1}$$

в которых $E = (1/2)(x^2 + y^2 + \dot{x}^2 + \dot{y}^2)$, $K = x\dot{y} - \dot{x}y$.

Если ввести вектор $r = (x, y)$, то уравнения (1.3.1) можно записать в короткой форме так:

$$\ddot{r} + r = \varepsilon(1 - r^2 - \dot{r}^2)r + \mu r \times \dot{r} \times r. \tag{1.3.2}$$

Уравнение (1.3.2) является двумерным аналогом известного уравнения Ван-дер-Поля с дополнительной стабилизацией квадратуры парциального осциллятора. Выписанному выше уравнению в переменной r соответствует уравнение с новой переменной $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)$:

$$2\dot{x} = -\varepsilon S e_2 - \mu K e_3 \tag{1.3.3}$$

(без ограничения общности мы здесь положили $E_0 = 1/2$).

Эта система четвертого порядка легко сводится к системе второго порядка относительно переменных S и K [2]. Действительно, имеем

$$2\dot{S} = 2\frac{dS}{dx}\dot{x} = -\varepsilon S(e_2 \cdot e_2) - \mu K(e_2 \cdot e_3). \quad (1.3.4)$$

Аналогично, дифференцируя K, получаем

$$2\dot{K} = 2\frac{dK}{dx}\dot{x} = -\varepsilon S(e_3 \cdot e_2) - \mu K(e_3 \cdot e_3). \quad (1.3.5)$$

Можно показать, что $(e_2 \cdot e_3) = 2K$ и $(e_2 \cdot e_2) = (e_3 \cdot e_3) = x^2 = 2S + 1$. В результате находим следующую систему дифференциальных уравнений управляемого маятника Фуко [2]:

$$2\dot{S} = -\varepsilon S(2S + 1) - 2\mu K^2,$$
$$2\dot{K} = -2\varepsilon SK - \mu K(2S + 1).$$

Прямолинейные колебания фиксированной амплитуды в исходной системе уравнений обобщенного маятника Фуко будут асимптотически устойчивы, если асимптотически устойчивая точка $S = K = 0$ в полученной системе уравнений удовлетворяет $\varepsilon > 0,\ \mu > 0$.

Заключение. Важнейшим свойством известного классического алгоритма управления ВТГ является алгоритмическая линеаризация закона Кулона, в котором электростатическая сила пропорциональна квадрату электрического заряда на электроде. В известной схеме такая линеаризация достигается тем, что на расположенные под углом $\pi/2$ электроды подается напряжение $V + u$ и $V - u$, где V − опорное напряжение, а u − напряжение, используемое для управления. Возникающее силовое воздействие на кварцевый резонатор имеет вид:

$$F = (V + u)^2 - (V - u)^2 = 4Vu,$$

т.е. оно стало строго линейным как относительно управляющего напряжения, так и относительно опорного напряжения. Такой прием линеаризации получил название «пуш-пул» [2].

В предлагаемом варианте m информационных и n управляющих электродов идея «пуш-пул» реализуется благодаря следующим известным тригонометрическим тождествам:

$$\sum_{i=1}^{n} cos\frac{2\pi(i-1)}{n} \equiv 0,\ \sum_{i=1}^{n} sin\frac{2\pi(i-1)}{n} \equiv 0.$$

Поскольку количество электродов произвольно, его выбор можно подчинить каким-то дополнительным целям. Например, если это число простое, то это позволяет избежать резонансных соотношений с четным числом узлов стоячей волны. А это дает возможность уменьшить влияние некоторых погрешностей конструкции. Если в схеме наблюдения и управления ВТГ использовать идеи широтно-импульсной модуляции [3], то эти функции могут быть совмещены на одной и той же системе электродов. На предприятии АО «НПП «МЕДИКОН» разработаны и изготовлены экспериментальные образцы нового поколения точных приборов на базе ВТГ (трехосный и одноосный измерители угловой скорости) для решения задач построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. Заканчивается этап конструкторско-доводочных испытаний для трехосного конструктива прибора. Данный прибор предназначен для малодинамичных объектов и прошел этап стыковочных испытаний с бортовой системой управления спутника. Продолжается этап конструкторских испытаний для одноосного интегрирующего ВТГ-30м. Гироскоп предназначен для высокодинамичных объектов авиационно-космического применения, что потребовало доработок в схемотехнике прибора. В настоящее время совместно с учеными лаборатории механики систем ИПМех им. А.Ю.Ишлинского РАН отрабатываются алгоритмы эффективного управления и цифровой обработки информации для прибора нового поколения [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Журавлев В.Ф.** Теоретические основы волнового твердотельного гироскопа. (ВТГ). Известия РАН. МТТ. 1993. № 3. С. 6–19.
2. **Климов Д.М., Журавлев В.Ф., Жбанов Ю.К.** Кварцевый полусферический резонатор (волновой твердотель-ный гироскоп). М.: Изд-во «Ким Л.А.», 2017. 197 с.
3. **Переляев С.Е., Бодунов С.Б., Журавлев В.Ф., Бодунов Б.П.** Новые гироскопы семейства «обобщенный Маятник Фуко»: некоторые фундаментальные вопросы теории и прикладные аспекты ее внедрения в инженерную практику современной гироскопии // 27-я Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам (ICINS). 2020.

B.P. Bodunov, S.B. Bodunov, K.B. Sagdeev (JSC «NPP MEDICON», Miass, Chelyabinsk region),
V.F. Zhuravlev, S.E. Perelyaev (Institute of Mechanics Problems named after A.Yu.Ishlinsky RAS, Moscow)

PRINCIPLE THEORY OF CONTROL GENERALIZED FOUCAULT PENDULUM AND APPLICATION ASPECTS OF ITS IMPLEMENTATION IN MODERN WAVE SOLID-STATE GYROSCOPES

The foundations of the theory of control of the generalized Foucault pendulum are outlined. Basic requirements to control laws underlying the functioning of devices included in the considered class of gyroscopes are described, and general principles of constructing laws for controlling their phase state are formulated. Applied aspects of implementation of fundamental control theory of generalized Foucault pendulum in high-precision and precision inertial sensors are presented, engineering and design solutions are presented in modern developments of new generation wave solid-state gyroscopes based on high-rotor quartz hemispherical resonators for low-dynamic and high-dynamic objects of aerospace purpose.

Б. Е. ЛАНДАУ, А. А. БЕЛАШ, С. Л. ЛЕВИН, А. А. МЕДВЕДКОВ, С. Г. РОМАНЕНКО
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

БЕСКАРДАННЫЙ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП С АВТОКОМПЕНСАЦИЕЙ И БЕЗ

Различные применения бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ), обусловленные типом и назначением объекта, на котором он установлен, условиями эксплуатации и т.д., предъявляют к нему существенно разные требования, в том числе и по его точности. Одним из традиционных методов обеспечения точности гироскопических приборов является метод автокомпенсационного вращения корпуса.

В работе приводится анализ точностных характеристик бескарданного ЭСГ со сплошным ротором, разработанного в ЦНИИ «Электроприбор», в том числе с использованием методов автокомпенсации. Рассмотрены теоретические аспекты такой работы прибора с учетом разработанной модели дрейфа, а также их экспериментальное подтверждение на основе анализа результатов «полярных» пусков гироскопов.

Введение. Различные применения БЭСГ требуют разной точности, что часто приводит к необходимости применения одноосного или двухосного автокомпенсационного вращения корпуса относительно ротора [1, 2]. Это обусловливает необходимость обоснования и анализа эффективности различных схем автокомпенсации.

Предлагаемый доклад посвящен теоретическим аспектам этих процессов, результатам экспериментального подтверждения на основе анализа «полярных» пусков гироскопа.

Конструкция и модель дрейфа БЭСГ. В конструкции бескарданного ЭСГ сплошной 10-миллиметровый бериллиевый сферический ротор взвешивался в электрическом поле, создаваемом тремя парами ортогонально расположенных электродов [3, 4]. Напряжение на электродах подвеса в наземных условиях составляет 200 В.

Вращение ротора с частотой 3000 Гц и демпфирование его нутационных колебаний в любой из ориентаций обеспечивается с помощью шести симметрично расположенных катушек с током. Привод используется только для разгона ротора до рабочей скорости, после чего он отключается. Стабилизация частоты вращения ротора осуществляется электрическими силами подвеса и достигается формированием его передаточной функции.

Обеспечение и поддержание вакуума в приборе обеспечивает магниторазрядный насос, который создает в рабочем зазоре вакуума порядка $10^{-6}\ldots10^{-7}$ мм рт. ст.

С целью снижения уровня уводящих моментов магнитной природы чувствительный элемент гироскопа помещен в систему магнитных экранов. Списывание информации об угловом положении ротора в неограниченном диапазоне углов осуществляется с помощью шести ортогонально расположенных оптических датчиков по нанесенному на роторе растровому рисунку.

Для данного гироскопа при произвольной ориентации ротора была разработана детерминированная модель ухода БЭСГ, которая представляется в виде аналитических функций, связывающих геометрические параметры несферичного и несбалансированного ротора с параметрами физических полей – источников уводящих моментов.

Так, скорость дрейфа ω в проекции на одну из осей корпуса гироскопа имеет вид [4]:

$$\begin{aligned}\omega_x = {} & k_0\gamma_1\left[-\left(1-\gamma_1^2\right)\gamma_1^2+\gamma_2^4+\gamma_3^4\right]+k_1\left[-\left(1-\gamma_1^2\right)V_1+\gamma_1\gamma_2V_2+\gamma_1\gamma_3V_3\right]+\\ & +k_2\gamma_1\left[-\left(1-\gamma_1^2\right)V_1^2+\gamma_2^2V_2^2+\gamma_3^2V_3^2\right]+k_3\gamma_1\left[-\left(1-\gamma_1^2\right)\gamma_1V_1+\gamma_2^3V_2+\gamma_3^3V_3\right]+\\ & +k_4\gamma_1\left[-\left(1-\gamma_1^2\right)\gamma_1^2V_1^2+\gamma_2^4V_2^2+\gamma_3^4V_3^2\right]+\gamma_1\left(\mu_{12}\gamma_2^2-\mu_{31}\gamma_3^2\right)+\gamma_2\gamma_3\nu_{23},\end{aligned} \tag{1}$$

где γ_i – направляющие косинусы, V_i – относительные управляющие напряжения на электродах подвеса (отношение управляющих напряжений к опорному V_0), μ_{ij} – коэффициенты, ха-

рактеризующие консервативную часть момента от взаимодействия неравножесткого подвеса с радиально несбалансированным ротором, а коэффициенты ν_{ij} – диссипативную часть данного момента, k_i – коэффициенты модели ухода, H – модуль вектора кинетического момента гироскопа.

БЭСГ при отсутствии автокомпенсации. Безусловно, повышенная надежность, снижение массогабаритных характеристик обеспечивается в случае установки БЭСГ непосредственно на «палубу» подвижного объекта. Однако при этом необходимо исследовать возможности обеспечения заданной точности. В докладе приводятся графики реальных движений роторов «полярного» гироскопа при наземных стендовых испытаниях, а также их аналитическое описание, полученное на основе аналитических решений уравнений движения гироскопа с использованием детерминированной модели дрейфа (1). Приведены точностные характеристики гироскопа.

Такой вариант конструкции БЭСГ был использован в условиях космической эксплуатации. В связи с этим показано влияние на движение ротора динамики орбиты и космического аппарата.

БЭСГ с одноосным автокомпенсационным вращением. На основе экспериментальных и аналитических исследований показано, что одноосное автокомпенсационное вращение корпуса ЭСГ обеспечивает:

- наблюдаемость погрешностей ориентации измерительных осей гироскопа на фоне его дрейфа, обусловленного, в частности, осевым дебалансом ротора, что приводит к существенному повышению точности калибровки коэффициентов модели погрешностей гироскопа;
- снижение уровня моментов от четных гармоник формы ротора;
- минимизацию моментов диссипативной природы;
- минимизацию влияния на уход гироскопа погрешностей калибровки и нестабильности КМУ.

Приводятся точностные характеристики гироскопа.

Такой вариант исполнения первоначально предназначался для подводных БИНС, в настоящее время применяется в наземной системе хранения азимутального направления.

БЭСГ с двухосным автокомпенсационным вращением. Приведены результаты экспериментальных исследований. С учетом модели дрейфа (1) приведены аналитические выражения для параметров видимого движения гироскопа в осях экваториальной системы координат. Показано, что двойное автокомпенсационное вращение минимизирует уводящие моменты от всех гармоник формы ротора за исключением момента от осевого дисбаланса.

Такой вариант разрабатывался для применения внутри нефтегазовых труб и испытывался в условиях стенда.

Гироскоп БЭСГ в режиме обратной связи. Приводятся результаты испытаний прибора БЭСГ-М в режиме двухосного гиростабилизатора с одноосной автокомпенсацией и без. Объектом испытаний являлся БЭСГ с возможностью одноосного автокомпенсационного вращения корпуса, установленный на двухосный поворотный стенд, который имитировал работу карданных колец, изменяя свое положение по данным о направляющих косинусах, полученных от гироскопа, т.е. работал в режиме следящей системы.

Обратная связь обеспечивает совпадение оси симметрии ротора с одной из осей симметрии электродов подвеса. В результате уводящие моменты от четных гармоник формы ротора обращаются в нуль [6], что способствует повышению точностных характеристик гироскопа.

Заключение. В заключении приведено сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований бескарданного электростатического гироскопа при отсутствии и наличии автокомпенсационного вращения. В табл. 1 приведены аналитические оценки точностных характеристик гироскопа.

Таблица 1

Точностные характеристики гироскопа БЭСГ

Гироскоп БЭСГ	Нестабильность дрейфа от пуска к пуску, °/час	Нестабильность дрейфа в пуске, °/час	Непрогнозируемый дрейф, °/час	Условия испытаний
Без автокомпенсационного вращения	0,01	0,001	0,01–0,03	В условиях динамичного объекта
С одноосным автокомпенсационным вращением	0,001	0,0001	0,001–0,0001	Неподвижное основание
С двухосным автокомпенсационным вращением	0,0002	0,0001	0,003	Неподвижное основание
С обратной связью (в режиме следящей системы)	–	<0,0001	0,00005	Неподвижное основание

Это подтверждено в том числе и результатами испытаний конкретного БЭСГ разработки ЦНИИ ЭП на различных объектах и стенде в приведенных выше режимах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Зельдович С.М., Малтинский М.И., Окон И.М., Остроумов Я.Г. Автокомпенсация инструментальных погрешностей гиросистем.** Л.: Издательство «Судостроение», 1976.
2. **Гусинский В.З., Лесючевский В.М., Падерина Т.В.** Автокомпенсация уходов электростатических гироскопов в корабельных бесплатформенных инерциальных навигационных системах // Гироскопия и навигация. 1998. №1 (20). С. 7–12.
3. **Гусинский В.З., Ландау Б.Е., Пешехонов В.Г.** Electrostatic gyro in spacecraft strapdown inertial orientation system, Second Int. Symp. On Inert. Tech., China, Beijing, Oct. 1998, pp. 104–113.
4. **Буравлев 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. 2002. №1 (13).
5. **Мартыненко Ю.Г.** Движение твердого тела в электрических и магнитных полях. М.: «Наука», 1988.

B.E. Landau, A.A. Belash, S.L. Levin, A.A. Medvedkov, S.G. Romanenko (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg)

THE STRAPDOWN ELECTROSTATIC GYROSCOPE WITH AND WITHOUT AUTOCOMPENSATION

Various applications of the strapdown electrostatic gyroscope (ESG) impose different requirements on it, including accuracy characteristics, depending on the type and purpose of the vehicle on which it is installed, operating conditions, etc. One of the traditional methods aimed to ensure the accuracy of gyroscopes is self-compensation by rotation of the ESG housing.

Accuracy characteristics of strapdown solid-rotor ESGs with and without autocompensation developed at the CSRI Elektropribor are analyzed. The theoretical aspects of their operation are considered taking into account their drift models. The results of the experimental verification based on the analysis of ESG operation in “polar” orientation are discussed.

Д. А. НИКИФОРОВСКИЙ, Д. С. СМИРНОВ, И. Г. ДЕЙНЕКА, А. Н. НИКИТЕНКО
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

А. В. РУПАСОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ПОКАЗАНИЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Развитие волоконно-оптических и электронных компонентов привело к существенному расширению сферы их применения, в частности при построении бортовых навигационных систем наземного транспорта. Зачастую спецификой использования таких систем являются особые требования к работоспособности в сложных температурных условиях: скорость изменения температуры окружающей среды в отдельных случаях может достигать единиц °С/мин. Одним из ключевых элементов навигационной системы является волоконно-оптический гироскоп (ВОГ). Усложнение условий эксплуатации повышает требования к технологии производства ВОГ, а также к выбору материалов конструкции, компоновке и форме деталей и т.д., однако для снижения влияния температурных воздействий на выходной сигнал прибора необходимо применение специальных алгоритмических методов компенсации. Применение алгоритмической компенсации требует тщательной подготовки исходных данных, что сопряжено с обширной экспериментальной работой. В настоящей статье анализируются особенности температурной зависимости гироскопа в свете проведения обозначенной экспериментальной подготовки к алгоритмической компенсации.

Введение. Предлагаемый доклад посвящен проблеме зависимости показаний волоконно-оптического гироскопа от температуры окружающей среды, в частности реакции сигнала ВОГ на изменение внешней температуры с высокой скоростью (единицы °С/мин). Несмотря на достижения в области производства ВОГ за последние 20 лет, проблема зависимости показаний волоконно-оптических гироскопов продолжает волновать исследователей. При этом с развитием материально-технической базы увеличивается число сфер применения ВОГ: системы на основе ВОГ устанавливают и на наземный транспорт, и в воздушные суда. В таких применениях требования к массогабаритным характеристикам возрастают, поэтому решить проблему температурного воздействия за счет элементов термостатирования или установки соответствующих нагревательных элементов не всегда представляется целесообразным. Альтернативой является исследование эффекта температурного воздействия на ВОГ и его компенсация программным методом. В рамках доклада рассматривается исследование воздействия температурных градиентов на чувствительный элемент ВОГ – волоконно-оптический контур (ВОК).

Описание проводимых исследований. В рамках доклада рассматриваются результаты исследования макета ВОГ. В рамках исследования ВОК был размещен в климатической камере, остальные компоненты находились вне термокамеры и не были подвержены температурному воздействию. Для достижения максимальных температурных градиентов в разных направлениях ВОК макет разворачивали под разными углами и переворачивали на 180 градусов. Температуры регистрировались в восьми разных точках контура. Пример результатов, полученных в процессе исследований, представлен на рис. 1.

Анализ результатов исследования. В ранних работах, посвященных алгоритмической термокомпенсации ошибки показаний ВОГ [1], встречается метод компенсации, основанный на вычислении ошибки показаний угловой скорости по абсолютной величине температуры окружающей среды и ее производной по времени.

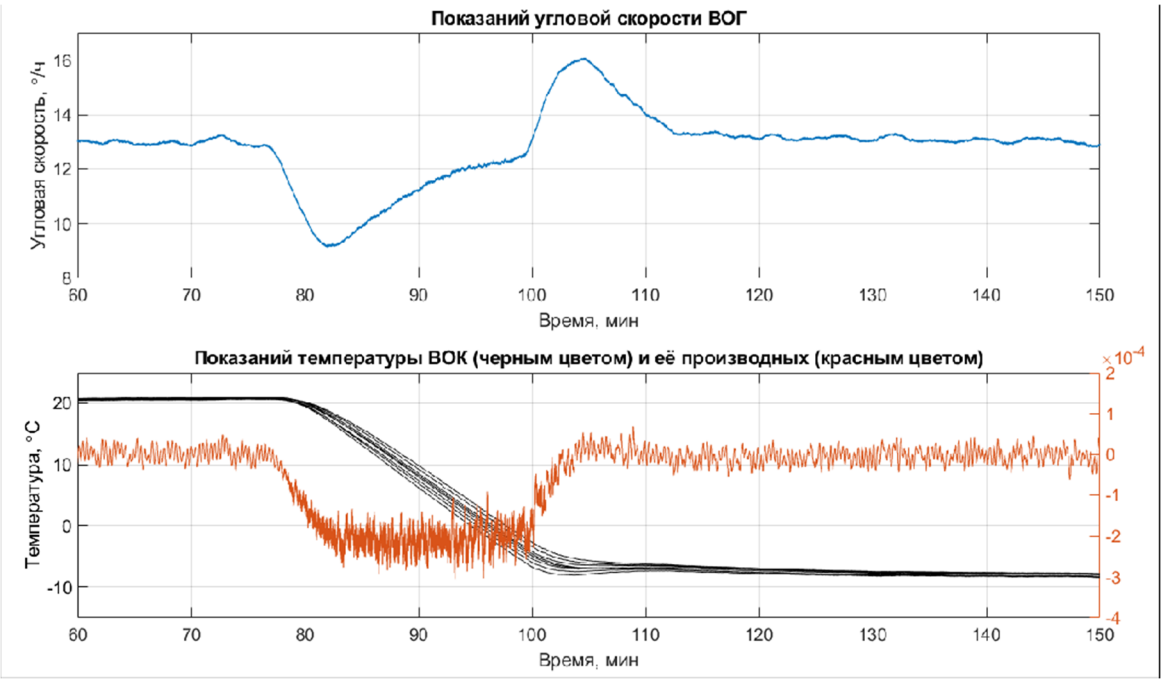


Рис. 1. Исследование ВОГ при температурном воздействии со скоростью охлаждения 2ºС/мин

В общем случае данная зависимость выглядит следующим образом:

$$\Omega_{err} = k_1 T + k_2 \Delta T,$$

где T – температура, ΔT – производная температуры по времени, k_1, k_2 – коэффициенты.

В статье [2] описан метод компенсации ошибки угловой скорости, где уже рассматривается необходимость добавления информации о пространственном градиенте температуры, однако авторы используют только три датчика температуры, что не позволяет оценить качественно распространение температуры в катушке.

В статье [3] расширяется применение пространственного градиента с использованием алгоритма, в который также добавлены значения температур с задержкой по времени для повышения точности работы алгоритма. Тем не менее в системе использовался один датчик, а компенсация дрейфа выполнялась по первой и второй производным температуры.

Однако, как видно из рис. 1, тренд угловой скорости существенно отличается как от абсолютной температуры, так и от ее производной. Максимальный достигнутый коэффициент корреляции данных угловой скорости и производной температуры при этом 0,6426.

Следует отметить, что в измерительных системах, чувствительный элемент которых по своим конструкционным принципам является распределенным, дополнительную важность приобретает пространственный градиент значений влияющих величин. Вообще говоря, для алгоритмической компенсации суммарный сигнал ошибки такой измерительной системы должен учитывать вклад ошибок, вызванных влиянием внешних факторов, оказанным на чувствительный элемент в разных его частях. В отдельных случаях, если известна ориентация относительно доминирующего направления распространения влияющего фактора и характер распространения влияющего фактора можно считать линейным, становится возможным вычисление значения влияющей величины в любой точке чувствительного элемента. При соблюдении этих условий возможна компенсация, учитывающая значение величины, измеренной в одной точке и темпы ее изменения (производную по времени).

С другой стороны, в том случае, когда одно из этих условий не соблюдается, необходимо учитывать ошибки, вызванные внешними факторами в различных частях чувствительного элемента. Так, например, единственный датчик температуры, расположенный на ВОК, не может предоставить информацию о направлении распространения теплового воздействия.

Стоит также учесть, что в реальных условиях эксплуатации ВОГ направление распространения теплового воздействия относительно точки измерения не является постоянным и не может быть заведомо известным. Для эффективной компенсации теплового воздействия при исполь-

зовании единственного датчика необходимо дополнительное устройство теплоизолирующих и теплопроводящих элементов для перенаправления теплового потока в заведомо известное направление, а также разработка моделей распространения теплового воздействия для определения значений температуры в частях ВОК, не оборудованных датчиками температуры.

Вышеуказанные меры связаны с затратами времени и сопровождаются технологическими вызовами. Гораздо более эффективным является установка на ВОК массива датчиков температуры, что позволяет фиксировать значения температуры в разных фрагментах ВОК с большей степенью достоверности и использовать для компенсации теплового воздействия информацию о пространственном градиенте.

С учетом вышесказанного нами были рассмотрены градиенты температуры на ВОК. Волоконно-оптический контур был установлен в климатическую камеру таким образом, чтобы создать максимальный перепад температур между разными точками ВОК, при этом минимизировав неравномерность градиента температуры, что позволило анализировать градиенты температуры по разницам показаний пар термодатчиков.

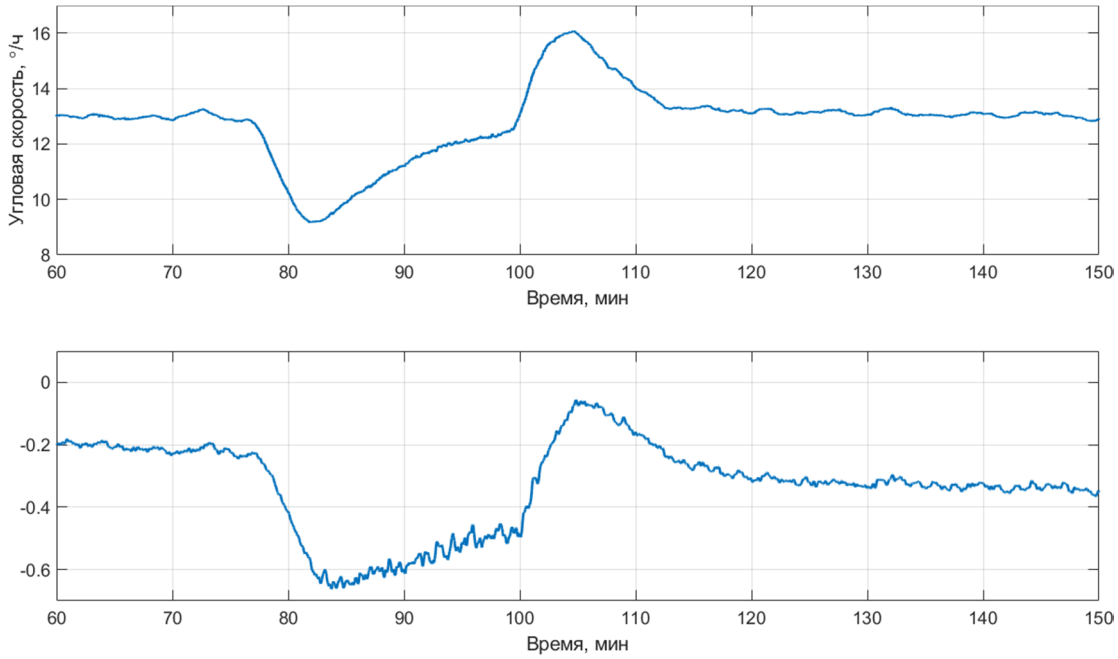


Рис. 2. Пример разницы температур в различных точках ВОК (нижний график) в сравнении с угловой скоростью (верхний график)

На рис. 2 визуализированы показания угловой скорости (верхний график) и разница показаний некоторой пары термодатчиков (нижний график). Визуальная схожесть представленных данных подтверждается высоким коэффициентом корреляции – 0,8057.

По соответствующим данным была построена линейная модель следующего вида:

$$\Omega_{err} = \sum_{i=1}^{n} w_i t_i + b \,, \tag{2}$$

где Ω_{err} – ошибка угловой скорости, t – температуры в разных точках ВОК, w – коэффициенты, b – смещение.

Результат термокомпенсации с использованием данной модели на основе показаний двух термодатчиков в сравнении с алгоритмом на основе уравнения (1) представлен на рис. 3.

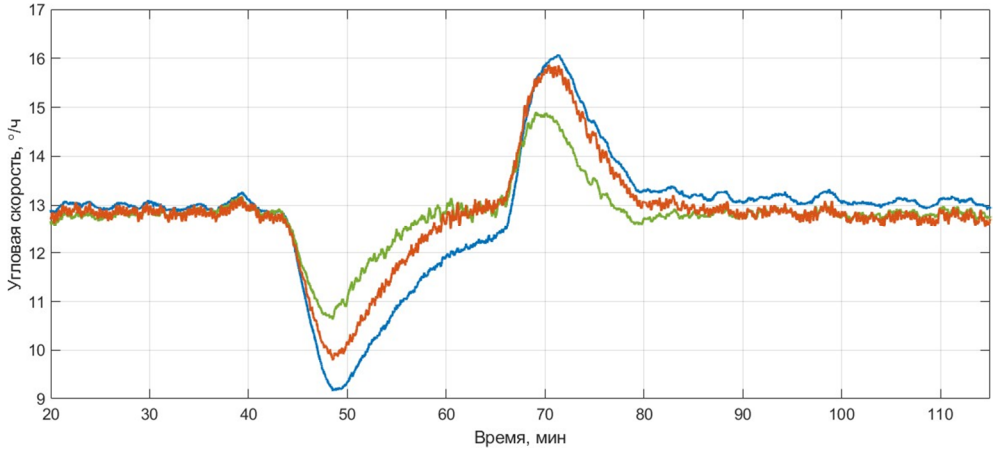


Рис. 3. Сравнение показаний угловой скорости ВОГ до компенсации (синий), после компенсации на основе временного градиента (красный) и пространственного (зеленый)

Качество работы алгоритмов оценивалось по среднеквадратическому отклонению (СКО), результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Точность показаний ВОГ до компенсаций и после

Вид компенсации	Значение СКО, град/ч
Без компенсации	1,268
Компенсация на основе производной температуры по времени	1,02
Компенсация на основе пространственного градиента	0,661

Заключение. В рамках данной работы была продемонстрирована целесообразность использования массива датчиков температуры с целью отслеживания температурных градиентов. Также было установлено, что в сравнении с выходным сигналом гироскопа большей корреляцией обладают пространственные производные нежели временные. Построение модели компенсации с использованием суперпозиции пространственных температур, являющейся аналогичной модели, образованной различными взвешенными сочетаниями температурных градиентов, и ее последующее применение продемонстрировало целесообразность подобного подхода в сравнении со способами температурной компенсации за счет применения только временных производных.

Работа выполнена в Университете ИТМО при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, название проекта – «Создание производства волоконно-оптических гироскопов для контрольно-измерительных устройств и наземных транспортных систем», Соглашение №075-11-2019-026 от 27.11.2019

ЛИТЕРАТУРА

1. **Guochen Wang, Qiuying Wang, Bo Zhao, and Zhenpeng Wang,** Compensation method for temperature error of fiber optical gyroscope based on relevance vector machine, Appl. Opt., 2016, 55, 1061–1066.
2. **F. Yu, S. Fan, Y. Zhang, P. Wu and J. Chang,** Compensation method for temperature error of fiber optic gyroscope based on support vector machine, 2017 Forum on Cooperative Positioning and Service (CPGPS), Harbin, 2017, pp. 16–21. DOI: 10.1109/CPGPS.2017.8075090.
3. **Вахрамеев Е.И., Галягин К.С., Ошивалов М.А., Савин М.А.** Методика численного прогнозирования и коррекции теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Приборостроение. 2017. №1.

D.A. Nikiforovskii, D.S. Smirnov, I.G. Deyneka, A.N. Nikitenko (ITMO University, Saint-Petersburg), A.V. Rupasov (CSRI Electropribor, Saint-Petersburg)

THE INVESTIGATION OF FOG OUTPUT SIGNAL DEPENDENCY ON ENVIRONMENT TEMPERATURE AT HIGH RATES OF TEMPERATURE CHANGE

The development of fiber-optic and electronic components has led to a significant widening of their application scope, specifically in the construction of navigation transportation systems. Often, such systems have the special performance requirements under difficult temperature conditions: the environment temperature changing rate in some cases may reach several °C/min. One of the key elements of a navigation system is a fiber-optic gyroscope (FOG). The harsh environmental conditions increase the demands on production technology of the FOG, on the choice of materials of construction, on the arrangement and shape of the parts, etc., however, in order to decrease temperature effects influence on the output signal of the device, the use of special algorithmic compensation methods is required. Algorithmic compensation requires careful preparation of input data, which is associated with extensive experimental work. This article analyses the FOG temperature dependence characteristics in the light of the designated experimental preparation for algorithmic compensation.

М. В. ЧИРКИН, В. В. КЛИМАКОВ, В. Ю. МИШИН, А. Е. СЕРЕБРЯКОВ
(Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина)

С. В. УСТИНОВ
(РВВДКУ (ВИ) «Рязанское высшее воздушно-десантное командное училище»)

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА В КОЛЬЦЕВОМ ЛАЗЕРЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ НАДЕЖНОСТЬ ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА

Разработан метод определения порога для развития неустойчивости газового разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере, учитывающий распределенную емкость «положительный столб – заземленный экран». Найдена граница неустойчивого состояния двухплечевого газового разряда в пространстве параметров: сопротивление балластных резисторов, температура, монтажная емкость. Полученные результаты позволяют обеспечить поддержание двухплечевого разряда постоянного тока в заданном диапазоне изменения температуры.

Введение. Диапазон применения гироскопов на основе кольцевых гелий-неоновых лазеров в качестве приборов инерциальной навигации достаточно широк, что обеспечивается ресурсом и надежностью этих приборов. Возбуждение активной среды лазера осуществляется с помощью симметричного двухплечевого разряда постоянного тока [1]. Устойчивость разряда в кольцевых лазерах (КЛ) является необходимым условием эксплуатационной надежности и должна быть обеспечена в условиях длительного функционирования (до 100 тысяч часов) при минимально возможном токе в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды. Кроме того, необходимо создать условия, позволяющие уменьшить рабочее значение тока разряда, чтобы обеспечить требуемый ресурс работы лазера.

Практической реализации перечисленных требований препятствует неустойчивость стационарного состояния электрической цепи, которая включает два протяженных участка положительного столба с падающими вольт-амперными характеристиками. Отрицательное динамическое сопротивление газоразрядной плазмы является предпосылкой для самовозбуждения реактивных колебаний. Порог развития неустойчивости зависит от различных параметров: тока разряда, состава и давления газовой смеси, температуры окружающей среды. Температура в процессе эксплуатации кольцевого гелий-неонового лазера изменяется в широком диапазоне [1–3], что влияет на характеристики газового разряда. Влияние температуры газа на динамические свойства плазмы, определяющие порог развития неустойчивости, до настоящего времени исследовано не в полной мере. Для анализа устойчивости необходимо знать комплексное сопротивление положительного столба [4–7]. Известен подход, при котором двухплечевой положительный столб разряда в кольцевом лазере заменяется эквивалентной схемой, содержащей последовательное соединение отрицательного динамического сопротивления ρ и параллельных *RL*-цепочек. Для поиска параметров эквивалентной схемы экспериментально регистрируется частотная зависимость комплексного сопротивления положительного столба и реализуется процедура оптимизации.

Кольцевые лазеры в блоке чувствительных элементов БИНС работают в «ванночках», сделанных из пермаллоя. В таких условиях малые возмущения в разряде необходимо рассматривать как процесс в активной длинной линии «положительный столб – заземленный корпус», которая состоит из комплексных сопротивлений z и проводимостей y [4]. Комплексное сопротивление единицы длины положительного столба z соответствует синтезированной эквивалентной схеме. Проводимость y отражает распределенную емкость, существующую между положительным столбом разряда и внешним экраном.

Цель работы. Увеличение эксплуатационной надежности лазерного гироскопа на основе подавления неустойчивости стационарного состояния двухплечевого газового разряда в кольцевом лазере в широком диапазоне температур.

Экспериментальная установка и методика измерений температурной зависимости комплексного сопротивления. В качестве основы для экспериментальных исследований использована описанная в [7] установка для измерения линейной реакции газового разряда на

слабое возмущение. Установка позволяет выполнять измерения комплексных сопротивлений положительного столба $Z(\omega)$ и катодной области $Z_c(\omega)$ газового разряда в температурном диапазоне от –30 до +85°С. В экспериментах использован кольцевой лазер, описанный в работе [2]. Прибор изготовлен на основе ситаллового моноблока и наполнен смесью гелия и неона в соотношении 16:1 до давления 720 Па. Разрядные промежутки ограничены медными анодами и холодным катодом из алюминия. Длина каждого плеча разряда l составляет 6,3 см, диаметр разрядных каналов – 2,7 мм.

Частотные зависимости комплексного сопротивления положительного столба разряда $Z(\omega)$ зарегистрированы для различных температур. Показано, что комплексное сопротивление Z положительного столба разряда для частот модуляции от 10 кГц до 200 кГц имитирует эквивалентная схема, содержащая последовательно соединенные отрицательное динамическое сопротивление и два инерционных элемента – RL-цепочки [6]:

$$Z_T(\omega)=\rho+\frac{i\cdot\omega\cdot\tau_1}{1+i\cdot\omega\cdot\tau_1}\cdot R_1+\frac{i\cdot\omega\cdot\tau_2}{1+i\cdot\omega\cdot\tau_2}\cdot R_2,\ \tau_k=\frac{L_k}{R_k},\ k=1,2,\ i=\sqrt{-1}. \qquad (1)$$

RL-цепочки отражают инерционные процессы в положительном столбе разряда, ω – циклическая частота. Цепочка R_1L_1 связана с установлением концентрации метастабильных атомов и характеризуется постоянной времени τ_1 =13 мкс, а цепочка R_2L_2 с постоянной времени τ_2 = 0,3 мкс отражает релаксацию концентрации электронов в разрядном канале. Результаты экспериментов продемонстрировали отсутствие температурных зависимостей для постоянных времени обеих цепочек, сопротивления R_2 и отрицательного динамического сопротивления ρ = –73 кОм. Обнаружено монотонное уменьшение сопротивления R_1 с ростом температуры (рис. 1). Этот эффект способен привести к тому, что второе слагаемое в правой части (1) перестанет компенсировать отрицательное сопротивление ρ в диапазоне частот 100–200 кГц, что содержит предпосылку развития неустойчивости разряда при увеличении температуры.

Распределенная модель. Для выполнения анализа устойчивости электрической цепи экранированный положительный столб разряда в кольцевом лазере рассматривался как длинная линия, содержащая элементы $z = Z_T/l$ и y. Проводимость y отражает наличие распределенной емкости cr «положительный столб – экран». Диэлектрическая проницаемость ситалла является функцией как температуры T, так и частоты. С помощью установки и методики, описанных в [8], выполнены измерения действительной ε' и мнимой ε" частей диэлектрической проницаемости в диапазоне температур T от –100ºС до 150ºС и диапазоне частот от 70 кГц до 200 кГц, в котором мнимая часть диэлектрической проницаемости ситалла на два порядка меньше действительной части. Выполнена аппроксимация зарегистрированных зависимостей распределенной емкости cr от частоты для значений температуры в диапазоне от –10 до +90ºС.

Для рассматриваемой электрической цепи, содержащей схему замещения положительного столба – «одномерную длинную линию» и внешние элементы, подключаемые к кольцевому лазеру, балластные сопротивления $R_б$ и паразитные монтажные емкости $C_{вх}$, фазовое (2) и амплитудное (3) условия возбуждения автоколебаний имеют вид:

$$2\arg K(i\cdot\omega_0)-2\cdot l\cdot\sqrt{2\cdot\omega_0\cdot cr\cdot\left(\operatorname{Im}z(i\cdot\omega_0)+|z(i\cdot\omega_0)|\right)}=0, \qquad (2)$$

$$|K(i\cdot\omega_0)|\cdot\exp(-2\cdot l\cdot\operatorname{Re}\gamma(i\cdot\omega_0))\ge 1, \qquad (3)$$

где $K(i\omega)=1-\dfrac{2\cdot\gamma\cdot(1+i\cdot\omega\cdot R_б\cdot C_{вх})}{\gamma\cdot(1+i\cdot\omega\cdot R_б\cdot C_{вх})+i\cdot\omega\cdot R_б\cdot cr}$ – коэффициент отражения волны от нагрузок,

$\gamma(i\omega)=\operatorname{Re}z\cdot\sqrt{\dfrac{2\cdot\omega\cdot cr}{\operatorname{Im}z+|z|}}+i\cdot\sqrt{\dfrac{\omega\cdot cr\cdot(\operatorname{Im}z+|z|)}{2}}$ – комплексная постоянная распространения волны, $z=z(i\cdot\omega_0,T)$, $cr=cr(i\cdot\omega_0,T)$.

Анализ устойчивости выполнен с учетом зависимости распределенной емкости cr от частоты и температуры. По результатам расчетов были построены зависимости критических значений балластных сопротивлений $R_{бкр}$ от температуры T, разделяющие область устойчивого и не-

устойчивого разряда (рис. 2); ниже критической кривой разряд устойчив. Обнаружено, что с увеличением температуры область неустойчивости стационарного состояния разряда расширяется. Критические кривые на рис. 2 позволяют выбрать величину балластного сопротивления $R_б$, чтобы обеспечить устойчивость стационарного состояния двухплечевого разряда.

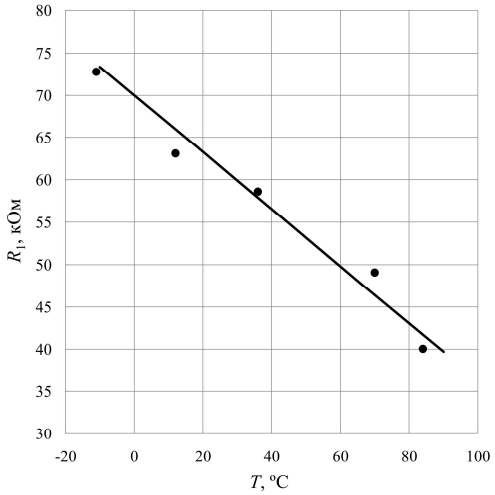


Рис. 1. Температурная зависимость сопротивления R_1 в эквивалентной схеме положительного столба

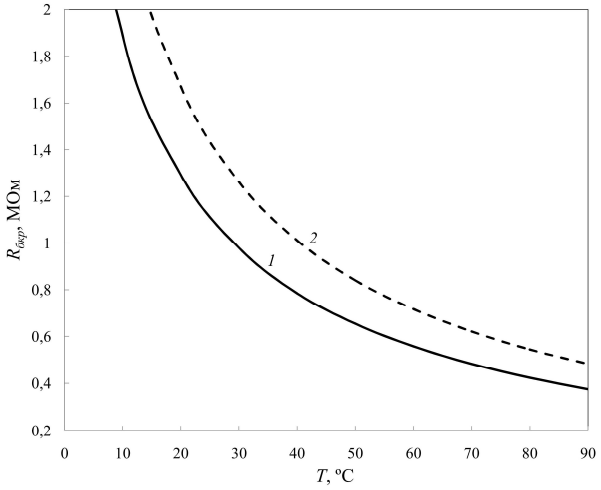


Рис. 2. Зависимости критических значений балластного сопротивления от температуры. Монтажная емкость $C_{вх}$, пФ: 1 – 3,0, 2 – 1,5

Заключение

1. Разработан метод определения границы неустойчивости газового разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере, учитывающий распределенную емкость «положительный столб – заземленный экран», в рабочем диапазоне температур. Метод основан на регистрации серии частотных зависимостей импенданса положительного столба газового разряда $Z(\omega)$ в симметричном кольцевом лазере при нескольких температурах и синтезе схем замещения положительного столба.

2. С помощью разработанного метода найдена граница неустойчивости двухплечевого газового разряда в кольцевом гелий-неоновом лазере в пространстве таким параметров, как величина сопротивления балластных резисторов, температура, паразитная монтажная емкость, с учетом зависимости распределенной емкости «положительный столб – заземленный экран» от температуры и частоты.

3. Полученные результаты позволяют поддерживать двухплечевой разряд постоянного тока в заданном диапазоне изменения температуры и повысить эксплуатационную надежность лазерного гироскопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Chirkin, M.V., Klimakov, V.V., Melekhin, V.N., Molchanov, A.V., Ulitenko, A.I.**, Passive heat removal elements integrated into the design of the strapdown inertial navigation system, Proceedings of 19th S-Petersburg International conference of integrated navigation system, S-Pb 28-30 May, 2012, pp. 99–101.
2. **Molchanov, A.V., Chirkin, M.V., Serebryakov, A.E., Klimakov, V.V., Dao, H.N., Mishin, V.Yu.,** The effect of slow fluctuation processes in the ring laser gyroscope on its bias instability, Proceedings of 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS), St. Petersburg, 28–30 May 2018, pp. 1–4.
3. **Колбас Ю.Ю., Грушин М.Е., Горшков В.Н.** Немагнитная составляющая смещения нуля зеемановского лазерного гироскопа // Квантовая электроника. 2018. Т. 48. № 3. С. 283–289.
4. **Морозов Д.А., Степанов В.А., Чиркин М.В.** Распространение возмущений в экранированном канале ионизированного газа // Известия академии наук. Серия физическая. 2000. Т. 64. № 7. С. 1423–1430.
5. **Александров Л.С., Перебякин В.А., Степанов В.А., Чиркин М.В.** Динамика пространственно однородной плазмы разряда в инертных газах // Физика плазмы. 1989. Т. 15. № 4. С. 467–4734.
6. **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.
7. **Молчанов А.В., Морозов Д.А., Устинов С.В., Чиркин М. В.** Модуляционные исследования газоразрядной плазмы в гелий-неоновом лазере // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2015. № 54. Ч. 2. С. 115–120.
8. **Ермачихин А.В., Литвинов В.Г.** Автоматизированный измерительный комплекс токовой релаксационной спектроскопии глубоких уровней // Приборы и техника эксперимента. 2018. С. 118–123.

M.V. Chirkin, V.V. Klimakov, V.YU. Mishin, A.E. Serebryakov (Ryzan State Radioengineering University), S.V. Ustinov (Ryazan higher airborn command school (Military Institute))

GAS DISCHARGE INSTABILITY IN A RING LASER AND THE FIELD RELIABILITY OF A LASER GYRO

A method has been developed for determining the threshold for the development of instability of a gas discharge in a ring helium-neon laser, taking into account the distributed capacitance "positive pole - grounded shield". The boundary of the unstable state of a two-arm gas discharge in the space of parameters is found: resistance of ballast resistors, temperature, mounting capacitance. The results obtained make it possible to maintain a two-arm DC discharge in a given range of temperature variation.

В. М. МЕДВЕДЕВ, С. Г. ШТЕК, М. А. ЖЕГЛОВ
(АО «Государственный научно-исследовательский институт приборостроения», Москва)

В. И. БУСУРИН, К. А. КОРОБКОВ
(ФГБОУВО «Московский авиационный институт (НИУ)», Москва)

РАЗРАБОТКА МИКРООПТОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ СИСТЕМ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ

В работе рассматривается вопрос повышения точности чувствительных элементов на основе микроэлектромеханических систем за счет применения оптического способа измерения положения чувствительного элемента. Рассмотрен принцип действия микрооптоэлектромеханического акселерометра. Показана зависимость выходного сигнала оптического датчика положения на основе оптического туннельного эффекта от величины зазора. Приведены примеры построения на основе технологии микрооптоэлектромеханических систем датчика линейного ускорения и твердотельного волнового гироскопа с кольцевым резонатором.

Введение. В настоящее время основу построения системы управления беспилотными летательными аппаратами (БПЛА) с малым временем автономного полета (без радиокоррекции, без коррекции с помощью систем спутниковой навигации, без коррекции по рельефу местности) составляют бесплатформенные инерциальные навигационные системы низкой точности на базе динамически настраиваемых гироскопов производства ПАО ПНППК (г. Пермь), АО «АПЗ» (г. Арзамас), волновых твердотельных гироскопов АО «ИЭМЗ «Купол» (г. Ижевск), ЗАО «ИТТ» (г. Раменское), волоконно-оптических гироскопов ПАО ПНППК (г. Пермь), маятниковых акселерометров АО «Темп-Авиа» (г. Арзамас). Применение указанных датчиков позволяет обеспечить выполнение существующих требований по точности к БПЛА указанного класса, но применение их в перспективных изделиях затруднено, т.к. они не обеспечивают требований по снижению стоимости, обеспечению резервирования, улучшению массогабаритных характеристик.

Альтернативой указанным типам датчиков могли бы послужить датчики на основе технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС) производства АО «Гирооптика» (г. Санкт-Петербург), НТЦ НМСТ МИЭТ (г. Зеленоград), ЗАО «ИТТ» (г. Раменское), они удовлетворяют требованиям по массогабаритным характеристикам и стоимости, но не в полной мере удовлетворяют требованиям по точности.

При разработке систем управления перспективных БПЛА указанного класса, разработчик сталкивается с отсутствием чувствительных элементов, подходящих по совокупности характеристик.

Новым направлением в области разработки чувствительных элементов является интеграция механических способов превращения линейного ускорения или угловой скорости в перемещение массы и оптических методов измерения этого перемещения. Разработка чувствительных элементов, сочетающих в себе технологии МЭМС и интегральной оптики, получила название микрооптоэлектромеханические системы (МОЭМС). Предлагаемый доклад посвящен разработке МОЭМС чувствительных элементов для систем навигации и управления перспективными БПЛА.

Принцип действия МОЭМС чувствительного элемента. Несмотря на различия в конструкции, выходным сигналом практически всех типов гироскопов и акселерометров за исключением лазерных и волоконно-оптических гироскопов является перемещение чувствительного элемента. Для определения перемещения чаще всего используются датчики положения, основанные на емкостном методе измерения (одна обкладка конденсатора закреплена неподвижно, другая связана с подвижным чувствительным элементом). В литературе [1] показано, что для некоторых типов датчиков изменение емкости составляет 10^{-15} Ф. Очевидно, что для определения таких емкостей нужны сложные дифференциальные схемы измерения.

В качестве альтернативы емкостным датчикам предлагается применение оптических датчиков положения на основе оптического туннельного эффекта. К достоинствам оптических датчиков можно отнести высокую чувствительность и устойчивость к электромагнитным помехам, создаваемым схемой управления датчика.

На основе предложенного подхода проведены теоретическая и экспериментальная проработка вопросов создания МОЭМС чувствительных элементов для измерения угловой скорости, ускорения, температуры, давления. Результаты работ опубликованы как в отечественных, так и в иностранных рецензируемых журналах, оформлено 9 патентов на изобретения.

Применение оптического датчика положения на основе туннельного эффекта показано на примере функциональной схемы МОЭМС акселерометра (рис. 1).

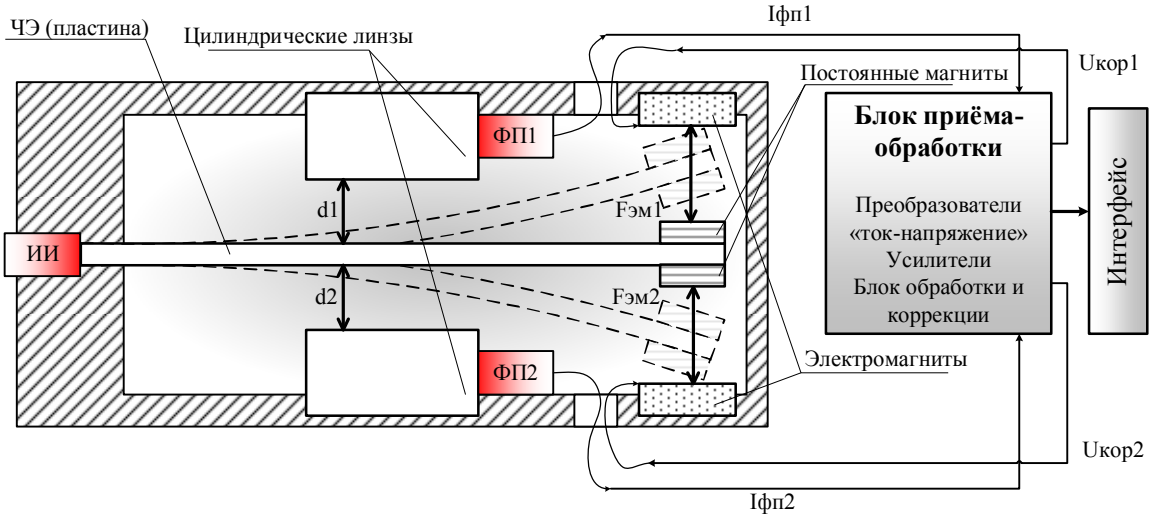


Рис. 1. МОЭМС акселерометр: ИИ – источник излучения, ФП – фотоприемник, Fэм – электромагнитная сила

Принцип действия МОЭМС акселерометра следующий. Источник оптического излучения генерирует оптическое излучение заданной мощности, которое вводится в маятник, выполненный из кварцевого стекла. Напротив маятника расположены линзы, к которым подключены фотоприемники. В зависимости от зазора между маятником и линзами за счет оптического туннельного эффекта оптическое излучение перераспределится между двумя фотоприемниками. Зазор может меняться под действием силы, действующей на маятник.

В результате исследований была определена зависимость выходного сигнала оптического датчика к изменению зазора (рис. 2.) Сплошной линией показана чувствительность преобразователя к изменению зазора, а пунктирной – зависимость выходной оптической мощности преобразователя от величины зазора. Максимальное значение чувствительности S=284 нВт/мкм наблюдается при d=0,4 мкм. В этой области изменению величины зазора на 0,1 мкм соответствует изменение выходного сигнала на 20%.

Ожидается, что чувствительность оптического датчика положения по сравнению с емкостным датчиком положения будет существенно выше, что позволит повысить точность чувствительных элементов в целом.

На основе уже разработанных и освоенных промышленностью МЭМС маятниковых акселерометров и МЭМС твердотельных волновых гироскопов с кольцевым резонатором проведена их интеграция с датчиками положения на основе оптического туннельного эффекта, разработаны структурные схемы и математические модели целого семейства преобразователей, в том числе датчик линейного ускорения [2], датчик угловой скорости на основе волнового твердотельного гироскопа с кольцевым резонатором [3].

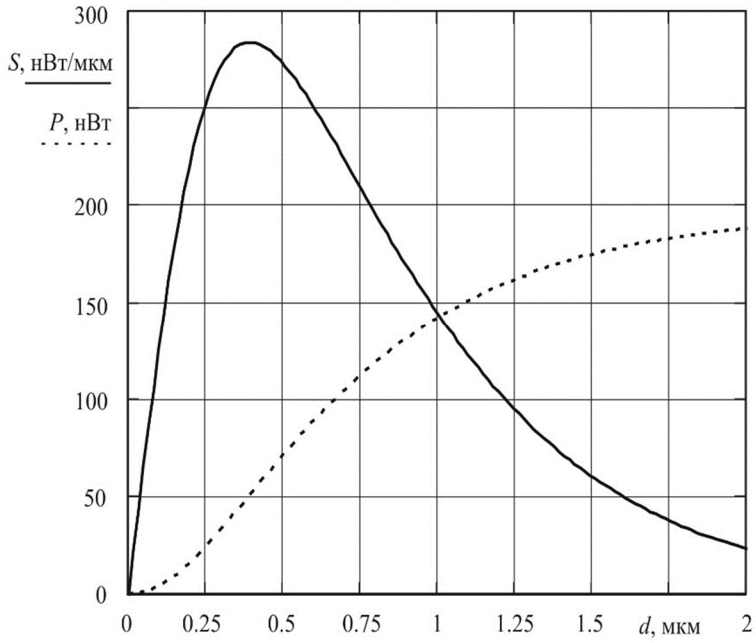


Рис. 2. Зависимость чувствительности и выходной оптической мощности от величины зазора

Заключение. На протяжении нескольких лет нашим коллективом осуществлялась теоретическая проработка вопросов интеграции датчиков положения на основе оптического туннельного эффекта в конструкцию акселерометров и гироскопов. В настоящий момент проводится изготовление нескольких макетов, демонстрирующих принцип действия оптического туннельного эффекта, компенсационного акселерометра с датчиком положения на основе оптического туннельного эффекта, твердотельного волнового гироскопа с кольцевым резонатором с датчиком положения на основе оптического туннельного эффекта.

Практическая реализация МОЭМС чувствительных элементов для систем навигации и управления позволит разработать технологии изготовления новых миниатюрных датчиков, на основе которых будут спроектированы системы управления для БПЛА различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Люкшонков Р.Г., Моисеев Н.В.** Дифференциальный емкостной датчик перемещений с дополнительной информацией о зазоре // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. 2011. №4 (74). С. 69–73.
2. **Бусурин В.И., Жеглов М.А., Казарьян А.В., Коробков В.В.** Волоконно-оптический преобразователь линейного ускорения на основе оптического туннельного эффекта. Патент на изобретение № RU 2 539 681 C1 от 26.07.13.
3. **Бусурин В.И., Медведев В.М., Жеглов М.А., Казарьян А.В., Коробков В.В.** Микрооптоэлектромеханический датчик угловой скорости на основе волнового твердотельного гироскопа с кольцевым резонатором и оптического туннельного эффекта. Патент на изобретение № RU 2 641 507 C1 от 17.01.18.

V.M. Medvedev, S.G. Shtek, M.A. Zheglov (JSC «State research Institute of instrument engineering», Moscow), V.I. Busurin, K.A. Korobkov (Moscow aviation Institute (NIU), Moscow)

DEVELOPMENT OF MICRO-OPTO-ELECTROMECHANICAL TRANSDUCERS FOR NAVIGATION AND CONTROL SYSTEMS

The paper considers the issue of improving the accuracy of transducers based on microelectromechanical systems by using an optical method for measuring the position of the sensor element. The principle of operation of a micro-opto-electromechanical accelerometer is considered. The dependence of the output signal of the optical position sensor based on the optical tunnel effect on the gap value is shown. Examples of building a linear acceleration sensor and a solid-state wave gyroscope with an annular resonator based on the technology of micro-opto-electromechanical systems are given.

М. В. САЛОГУБ
(АО «ГИРООПТИКА», СПБ ГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

В статье представлены результаты исследования математической модели микромеханического преобразователя угловой скорости. Основой математического описания работы чувствительного элемента является система дифференциальных уравнений и цифровая обработка сигналов, имитирующая работу микроэлектромеханического преобразователя угловой скорости. Проводится оценка времени установившегося режима первичных колебаний инерционной массы (скорости выхода на режим) и изменение амплитуды вторичных колебаний при различных величинах инерционных масс.

Приводится краткий вывод на основе возможной реализации математической модели показаний и погрешностей блока инерциальных микромеханических чувствительных элементов, состоящий из триады микроэлектромханических преобразователей угловой скорости.

Введение. В настоящее время растет потребность применения микроэлектромеханических преобразователей угловой скорости (МПУС) в различных задачах, например, в составе блока инерциальных чувствительных элементов (БИЧЭ). Возникает необходимость в создании функциональных алгоритмов, по которым на этапе разработки чувствительного элемента можно быстро производить оценку правильности работы МПУС на основе выходных параметров математической модели МПУС при заданных конструктивных и электрических параметрах МПУС [1-2]. Важно также иметь возможность задавать показания и погрешности БИЧЭ в соответствии с реальными показаниями инерциальных блоков.

Целью статьи является моделирование алгоритма функционирования МПУС в пакете Matlab (Simulink), в состав которого входят чувствительный элемент микромеханического гироскопа (ММГ) LL-типа с заданными конструктивными и электрическими параметрами и алгоритм цифровой обработки сигналов, проанализировать следующие выходные данные МПУС, а также встраивание алгоритма МПУС в состав математической модели алгоритма погрешностей БИЧЭ:

- время установившегося режима первичных колебаний (скорость выхода на режим) в зависимости от величины инерционной массы (ИМ);
- установившееся значение амплитуды вторичных колебаний в зависимости от величины ИМ;
- на основе полученных вариаций Аллана (ВА) произвести проверку адекватности полученных погрешностей МПУС в БИЧЭ в соответствии с реальными данными.

Математическая модель. Задана система уравнений, описывающая движение чувствительного элемента четырехмассового ММГ LL-типа по осям первичных и вторичных колебаний. Система дифференциальных уравнений, описывающая первичные колебания (1), представлена ниже [3–5]:

$$\begin{cases} m_1\ddot{y}_1 + \mu_{y1}\dot{y}_1 + C_{y1}y_1 + C_{y1x3}(y_1 - x_3) + C_{y1x4}(y_1 + x_4) + m_1\dot{V}_{oy} = Q_{y1} \\ m_2\ddot{y}_2 + \mu_{y2}\dot{y}_2 + C_{y2}y_2 + C_{y2x3}(y_2 + x_3) + C_{y2x4}(y_2 - x_4) + m_2\dot{V}_{oy} = Q_{y2} \\ m_3\ddot{x}_3 + \mu_{x3}\dot{x}_3 + C_{x3}x_3 + C_{x3y1}(x_3 - y_1) + C_{x3y2}(x_3 + y_2) + m_3\dot{V}_{ox} = Q_{x3} \\ m_4\ddot{x}_4 + \mu_{x4}\dot{x}_4 + C_{x4}x_4 + C_{x4y1}(x_4 + y_1) + C_{x4y2}(x_4 - y_2) + m_4\dot{V}_{ox} = Q_{x4} \end{cases}, \quad (1)$$

где μ_{yxi} – коэффициент сил вязкого трения; C_{xyi} – коэффициент жесткости; $C_{xyik}(y_i \pm x_i)$ – коэффициент связи осей ММГ; Q_{xyi} – электростатическая сила (привод); m – величина ИМ; x_i, y_i – оси движения ИМ (первичные колебания), i=1,2,3,4 – индексы (номера) ИМ [1–3].

Научный руководитель – заместитель генерального директора к.т.н. М.В. Федоров.

Система дифференциальных уравнений вторичных колебаний (2) представлена ниже:

$$\begin{cases} m_1\ddot{z_1} + \mu_{z1}\dot{z_1} + C_{z1}z_1 = -2m_1\dot{y_1}\Omega_x + Q_{z1} \\ m_2\ddot{z_2} + \mu_{z2}\dot{z_2} + C_{z2}z_2 = -2m_2\dot{y_2}\Omega_x + Q_{z2} \\ m_3\ddot{z_3} + \mu_{z3}\dot{z_3} + C_{z3}z_3 = -2m_3\dot{x_3}\Omega_y + Q_{z3}, \\ m_4\ddot{z_4} + \mu_{z4}\dot{z_4} + C_{z4}z_4 = -2m_4\dot{x_4}\Omega_y + Q_{z4} \end{cases} \quad (2)$$

где μ_{zi} – коэффициент сил вязкого трения; C_{zi} – коэффициент жесткости; k_{zi} – коэффициент связи осей ММГ; $2m_i\,\dot{y}_i\,\Omega_{xy}$ – сила Кориолиса; z_i – оси движения ИМ (вторичные колебания); Q_{zi} – электростатическая сила (съем) [1–3].

Исходные конструктивные и электрические параметры для проведения моделирования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры математической модели

Обозначение	Название	Значение
Ω, °/с	Входная угловая скорость, внешнее воздействие	300
$C_{x,y}$, Н/м	Жесткость подвеса	10461
C_z, Н/м	Жесткость подвеса	10063
m, мкг	Инерционная масса	0.392; 0.25; 0.15; 0.09; 0.08; 0.07; 0.06
U_0, В	Основное напряжение электростатического привода	24, 27
$U_{оп}$, В	Опорное напряжение	1.6
$D_ш$, $Гц^2$	Дисперсия шума	$3{,}6\cdot10^{-8}$
d_2,м	Торцевые зазоры (первичные колебания)	$15\cdot10^{-6}$
d_3,м	Боковые зазор (для вторичных колебаний)	$2\cdot10^{-6}$

Модель МПУС позволяет смоделировать и оценить амплитуду установившегося режима вторичных колебаний рис. 1 в зависимости от величины ИМ, с учетом данных табл. 1.

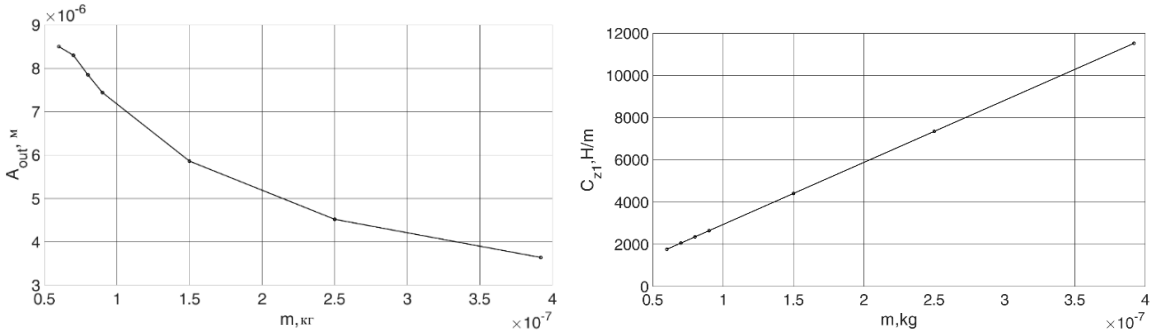


Рис. 1. Зависимость амплитуды вторичных колебаний от величин ИМ и зависимость жесткостей выходной измерительной оси от величин ИМ

Модель МПУС позволяет смоделировать и оценить время установившегося режима первичных колебаний (скорость выхода на режим) в зависимости от величины ИМ рис. 2.

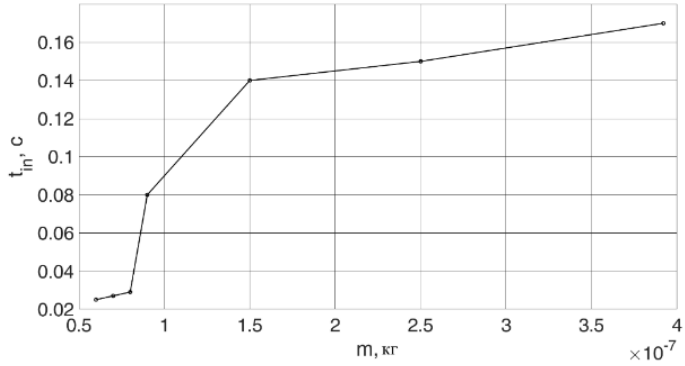


Рис. 2. Зависимость времени выхода на режим от величины ИМ

По результатам моделирования рис. 1 и 2 можно сделать выводы о сокращении времени установившихся колебаний при уменьшении величины ИМ, при этом с ростом величины ИМ массы наблюдается уменьшение амплитуды выходных колебаний ИМ. В модели МПУС реализована система автоматической регулировки и управления (АРУ) амплитуды первичных колебаний по обратной связи, которая представляет из себя звено, состоящее из аналого-цифровых и цыфро-аналоговых преобразователей, а также пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора (ПИД-регулятора). При правильной настройки система АРУ позволяет уменьшить время установившегося режима и получить оптимальные выходные данные (например первичные и вторичные колебания ИМ) с требуемой точностью.

Адекватность полученных погрешностей продемонстрирована на рис. 3. Задание погрешностей производилось в сравнении с реальными данными (теория), параметры ВА берутся исходя из технических характеристик датчиков, для проверки правильности полученных данных построены ВА по случайной составляющей (моделирование) и реальной ВА (теория), данные отображены с логарифмическим шагом, рассчитанное отклонение характеристики по реальным данным от характеристики по смоделированным составило 21% [6–7].

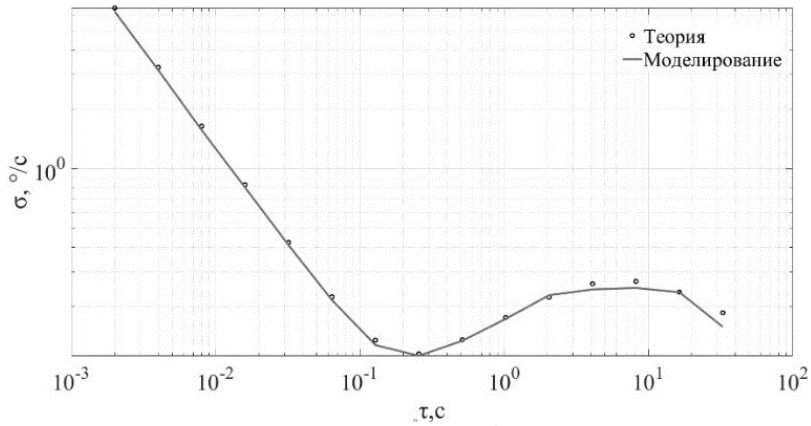


Рис. 3. Вариация Аллана с логарифмическим шагом

Получение зависимости ВА (рис. 3) позволило определить оптимальность заданных погрешностей в выходных показаниях реальных датчиков и полученных погрешностей на выходе модели.

Заключение. В ходе работы проведено исследование математической модели микромеханического преобразователя угловой скорости, составлены системы дифференциальных уравнений для описания движения ИМ, синтезирован алгоритм цифровой обработки сигналов, автоматической регулировки и управления амплитудой. Оценено время установившегося режима первичных колебаний (скорость выхода на режим) в зависимости от величины инерционной массы, а также установившееся значение амплитуды вторичных колебаний в зависимости от величины инерционной массы.

По результатам математического моделирования получены зависимости установившихся значений амплитуд вторичных колебаний от величин инерционных масс и зависимость времени выхода на режим от величин инерционных масс. Анализ полученных зависимостей позволил определить возможность уменьшения времени установившегося режима первичных колебаний за счет уменьшения величины инерционной массы.

Результаты моделирования погрешностей ПМЛУ соответствуют реальным погрешностям показаний БИЧЭ, алгоритм БИЧЭ позволяет отлаживать показания и погрешности в соответствии с реальными данными для уточнения математической модели.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Распопов В.Я.** Микромеханические приборы: учебное пособие. М.: Машиностроение, 2007. С. 215–315.
2. **Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В.** Прикладная теория гироскопов. Санкт-Петербург, 2015. С. 171–174.

3. **Боронахин А.М., Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В.** Оптические и микромеханические инерциальные приборы. СПб.: Изд-во «Элмор», 2007. 400 с.
4. **Пешехонов В.Г., Несеннюк Л.П., Грязин Д.Г. и др.** Микромеханический гироскоп, разрабатываемый в ЦНИИ «Электроприбор» // Мехатроника, автоматизация и управление. 2008. №2. С. 29–31.
5. **Пешехонов В.Г.** Гироскопы начала XXI века // Гироскопия и навигация. 2003. №4. С. 5–18.
6. **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.
7. **IEEE Std. 952-1997**. IEEE Standard Specifications Format Guide and Test procedure for Single-Axis Interferometric Fiber Optic Gyros, pp. 52–71.

M.V. Salogub (JSC GYROOPTICS, SPB «LETU», Saint-Petersburg)

RESEARCH RESEARCH OF THE PARAMETERS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF A MICROELECTROMECHANICAL CONVERTER OF ANGULAR VELOCITY

The article presents the results of the study of a mathematical model of a micromechanical angular velocity transducer. The basis of the mathematical description of the operation of the sensitive element is a system of differential equations and digital signal processing that simulates the operation of a microelectromechanical angular velocity transducer. The time of the steady-state mode of primary oscillations of the inertial mass (speed of reaching the mode) and the change in the amplitude of secondary oscillations at various values of inertial masses are estimated.

И. В. ПАПКОВА, О. А. АФОНИН, А. В КРЫСЬКО
(СГТУ имени Гагарина Ю.А., Саратов)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИ НЕЛИНЕЙНЫХ НАНОРЕЗОНАТОРОВ В ВИДЕ БАЛОК В ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ С УЧЕТОМ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

В работе построена математическая модель динамики нанорезонаторов в виде балок, находящихся под действием температурного поля и нейтронного облучения, разработано программное обеспечение, позволяющее использовать его для проектирования ММДИИ/НМДИИ. Математическая модель нанорезонаторов получена из энергетического принципа Гамильтона–Остроградского на основе модифицированной моментной теории с учетом гипотезы Пелеха–Шереметьева и деформационной теории пластичности. Приводятся примеры расчета.

Введение. В настоящее время актуальным является совершенствование ММДИИ/НМДИИ, работающих длительное время одновременно под действием температурного и шумовых полей, нейтронного облучения, различных динамических и статических нагрузок. Требуется создание таких математических моделей, которые наиболее близко описывают работу прибора, т.е. следует учитывать большие деформации и изменение свойств материала в процессе эксплуатации и создание математического обеспечение их расчета. В настоящей работе впервые построена математическая модель и создан программный продукт для исследования наноструктур механических систем в температурном поле с учетом деформации и физической нелинейности. Данная работа является продолжением исследований авторов [1].

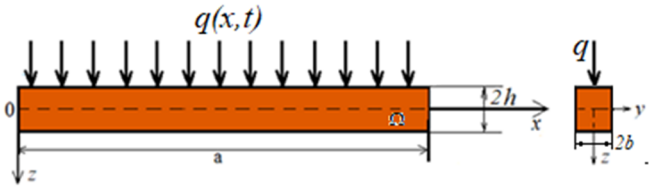


Рис. 1. Расчетная схема балки

Постановка задачи. Рассмотрим нанорезонатор в виде балки длиной a, постоянной толщиной, занимающая область $\Omega=\{0\le x\le a;\ -b\le y\le b;-h\le z\le h\}$. В основу предложенной теории положены следующие гипотезы: кинематическая гипотеза Пелеха–Шереметьева $u_x = z\gamma_x - \frac{z^3}{3h^2}\left(\frac{\partial w}{\partial x}+\gamma_x\right)$, где $w(x,t)$ – прогиб в срединной поверхности, γ_x – углы поворота отрезка нормали в срединной линии в плоскости. Из гипотез Пелеха–Шереметьева вытекают гипотеза С.П. Тимошенко и гипотеза Эйлера–Бернулли; материал балки изотропный, но неоднородный, и его свойства зависят от температуры $E = E(x,z,e_i,T(x,z),\alpha(T))$, $\nu = \nu(x,z,e_i,T(x,z),\alpha(T))$ и деформированного состояния в точке, где $T(x, z)$ – температурное поле, α – коэффициент линейного расширения, e_i – интенсивность деформаций; принят закон Дюамеля-Неймана $\varepsilon_{xx}^{z} = \varepsilon_{xx} + \alpha T(x,z) + \varepsilon_{xx}^{1p}$, где ε_{xx}^{1p} – остаточные упруго-пластические деформации при разгрузке; используется деформационная теория пластичности и критерий текучести Мизеса; диаграмма деформирования $\sigma_i(e_i,T,\alpha)$ зависит от температуры, напряженно-деформированного состояния и нейтронного облучения; температурное поле определяется из решения двумерного уравнения теплопроводности; для описания наноэффектов принята модифицированная моментная теория упругости [2].

Математическая модель получена из вариационного принципа Гамильтона-Остроградского

$$\int_{t_1}^{t_2}(\delta K - \delta\Pi + \delta' W)dt = 0,$$

потенциальная энергия $\Pi = \frac{1}{2}\int_{-b}^{b}\int_{\Omega}\left(\sigma_{xx}\varepsilon_{xx} + 2\sigma_{xz}\varepsilon_{xz} + 2m_{xy}\chi_{xy} + 2m_{yz}\chi_{yz}\right)d\Omega dy$, $\sigma_{xx}, \varepsilon_{xx}$, m_{xy} и χ_{xy} – соответственно напряжение, деформация изгиба, момент высшего порядка и кривизна [2] и работа внешних сил $\delta' W = \int_0^a q\delta w dx$, кинетическая энергия $K = \frac{1}{2}\rho\int_{-b}^{b}\int_{\Omega}\left[\left(\frac{\partial w}{\partial t}\right)^2 + z^2\left(\frac{\partial \gamma_x}{\partial t}\right)^2\right]d\Omega dy$.

Выпишем основные соотношения: $\chi_{xy} = -\frac{1}{4}\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{\partial \gamma_x}{\partial x}\right) - \frac{z^2}{h^2}\left(\frac{\partial \gamma_x}{\partial x} + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)$, $\chi_{yz} = \frac{2z}{h^2}\left(\gamma_x + \frac{\partial w}{\partial x}\right)$, $m_{xy} = \frac{El^2}{1+\nu}\chi_{xy}$, $m_{yz} = \frac{El^2}{1+\nu}\chi_{yz}$, где χ_{xy}, χ_{yz} – отличные от нуля компоненты симметричного тензора градиента кривизны (вращения) и m_{xy}, m_{yz} – компоненты тензора моментов высшего порядка. $\sigma_{xx} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}\left(z\frac{\partial \gamma_x}{\partial x} - \frac{z^3}{3h^2}\left(\gamma_x + \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) - \alpha T - \varepsilon_{xx}^{1p}\right)$, $\sigma_{xz} = \frac{E}{2(1+\nu)}\left(\gamma_x + \frac{\partial w}{\partial x}\right)k_s$, где σ_{xx}, σ_{xz} – компоненты тензора напряжений с учетом принятых гипотез. Параметр l представляет собой дополнительный независимый материальный параметр длины, связанный с симметричным тензором градиента вращения. [2], коэффициент k_s показывает распределение касательных напряжений по толщине балки.

Из функционала Гамильтона–Остроградского, получаем вариационное уравнения нанорезонатора, а также дифференциальные уравнения и начальные, граничные условия:

$$\frac{\partial M_{xx}}{\partial x} - Q_{xz} + \frac{\partial Y_{xy}}{\partial x} - \frac{4}{3h^2}\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{4}{h^2}P_{xz} - \frac{2}{h^2}\frac{\partial R_{xy}}{\partial x} - \frac{4}{h^2}J_{yz} = \frac{34h^3\rho}{315}\frac{\partial^2 \gamma_x}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(N_{xx}\frac{\partial w}{\partial x}\right) + \frac{\partial Q_{xz}}{\partial x} + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 Y_{xy}}{\partial x^2} + 2q + \frac{4}{3h^2}\frac{\partial^2 S_{xx}}{\partial x^2} - \frac{4}{h^2}\frac{\partial P_{xz}}{\partial x} - \frac{2}{h^2}\frac{\partial^2 R_{xy}}{\partial x^2} + \frac{4}{h^2}\frac{\partial J_{yz}}{\partial x} = 2\rho h\varepsilon\frac{\partial w}{\partial t} + 2h\rho\frac{\partial^2 w}{\partial t^2}.$$

Граничные условия:

$$\delta\gamma_x = 0 \quad или \quad \left\{-M_{xx} - Y_{xy} + \frac{4}{3h^2}S_{xx} + \frac{2}{h^2}R_{xy}\right\}_{n_x} = 0; \quad \frac{\partial \delta w}{\partial x} = 0 \quad или \quad \left\{\frac{4S_{xx}}{3h^2}\right\}_{n_x} = 0;$$

$$\delta w = 0 \quad или \quad \left\{-N_{xx}\frac{\partial w}{\partial x} - Q_{xz} - \frac{1}{2}\frac{\partial Y_{xy}}{\partial x} - \frac{4}{3h^2}\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{4}{h^2}P_{xz} - \frac{2}{h^2}\frac{\partial R_{xy}}{\partial x} - \frac{4}{h^2}J_{yz}\right\}_{n_x} = 0.$$

Начальные условия: $w = \frac{\partial w}{\partial t} = 0$, $\gamma_x = \frac{\partial \gamma_x}{\partial t} = 0$,

где $N_{xx} = \int_{-h}^{h}\sigma_{xx}dz$, $M_{xx} = \int_{-h}^{h}\sigma_{xx}zdz$, . $S_{xx} = \int_{-h}^{h}\sigma_{xx}z^3dz$, $Q_{xz} = \int_{-h}^{h}\sigma_{xz}k_s dz$, $P_{xz} = \int_{-h}^{h}\sigma_{xz}k_s z^2 dz$, $Y_{xy} = \int_{-h}^{h}m_{xy}dz$,

$Y_{yz} = \int_{-h}^{h}m_{yz}dz$, $R_{xy} = \int_{-h}^{h}m_{xy}z^2dz$, $J_{yz} = \int_{-h}^{h}m_{yz}zdz$, $I_{yz} = \int_{-h}^{h}m_{yz}z^3dz$.

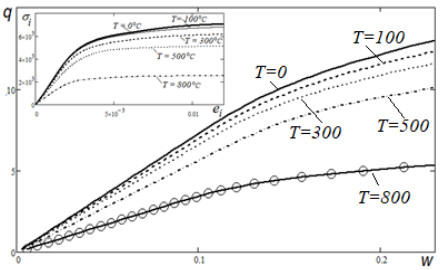


Рис. 2. Зависимость «нагрузка–прогиб»

Согласно методу переменных параметров упругости [3] $E = \frac{9KG}{3K+G}$, $\nu = \frac{1}{2}\frac{3K-2G}{3K+G}$. Здесь мы считаем $K = K_0 = const$. В теории малых упругопластических деформаций модуль сдвига определяется по формуле $G = 1/3\cdot\sigma_i(e_i)/e_i$, где σ_i – интенсивность напряжения, а e_i – интенсивность деформаций. Связь между интенсивностью деформаций и интенсивностью напряжений $\sigma_i(e_i)$ дана на рис. 2 [4].

Для кремнеуглеродистой стали Ф-212В функциональная зависимость σ_s от суммарного потока (которая является нелинейной) приведена в работе А.А. Ильюшина и П.М. Огибалова [5]. Если поток направлен перпендикулярно к плоскости поверхности материала конструкции, то зависимость суммарного потока от аппликаты можно принять в виде [6] $N = N_0 e^{2h(1\pm z)}$, $-1 \le z \le 1$. Полагая $2h = 2$, $N_0 = 4 \cdot 10^{19} nvt$, $\left(\frac{a}{2h}\right)^2 = 1000$, $G_0 = 0.8 \cdot 10^6$ бар, $\nu = 0.3$, $G_1 = 0$, получим, что предел текучести описывается формулой $\sigma_{is}(z) = (5000 \pm 1800z)$ бар. А приведенная интенсивность деформаций в момент наступления пластичности $e_s(z) = 2.08 \pm 0.75z)$. Здесь знаки «–» и «+» относятся к случаю облучения балки со стороны выпуклости и вогнутости соответственно. Необлученный материал имеет $\sigma_{is} = 3375$ бар, а $e_s = 1.405$. В такой постановке задача о влиянии облучения потоком быстрых нейтронов сведена к расчету пластически неоднородной по толщине балки, выполненной из идеального упругопластического материала. Следует подчеркнуть, что для предлагаемого алгоритма зависимость $\sigma_{is}(z)$ может быть любой.

Исследования проводились для балки из стали с отношением длины к ширине $a/(2h) = 30$, $l = 0$. Статические задачи в теории балок, пластин и оболочек традиционно решались с применением различных приближенных методов, которые позволяют свести систему уравнений в частных производных к системе нелинейных алгебраических уравнений. На рис. 2 представлена зависимость статической нагрузки от прогиба при различных температурах. В зависимости от увеличения температуры падает несущая способность балки.

Заключение. С помощью предложенного математического и алгоритмического обеспечения появляется возможность разработки и проектирования микромеханических датчиков инерциальной информации (ММДИИ) и наномеханических датчиков инерциальной информации (НМДИИ)с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Это может служить базой для создания технологий изготовления и сборки, методик настройки, балансировки и проведения испытаний готового изделия за счет более полного учета сложности протекающих в них физических процессов при наличии внешних динамических воздействий, а также температурного, шумового полей и нейтронного облучение. В работе впервые построена теория исследования НДС нанорезонаторов, когда свойства материала структуры зависят от температуры и нейтронного облучения.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00354.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Krysko, A.V., Awrejcewicz, J., Papkova, I.V., Krysko, V.A.,** Stability improvement of flexible shallow shells using neutron radiation, *Materials*, 2020, vol. 13(14), p. 3187.
2. **Yang, A.C.M., Chong, D., Lam, C.C., and Tong, P.,** Couple stress-based strain gradient theory for elasticity, *Int. J. Solids Struct*, 2002, 39, pp. 2731–2743.
3. **Биргер И.А.** Некоторые общие методы решения задач теории пластичности. ПММ. 1951. Т. 15. Вып. 6. С. 766–770.
4. **Шевченко Ю.Н., Прохоренко И.В.** Теория упругопластических оболочек при неизотермических процессах нагружения. Киев: Наук. Думка, 1981. 296 с.
5. **Ильюшин А.А., Огибалов П.М.** О прочности оболочек толстостенного цилиндра и полого шара, подверженных облучению // Инж. Сб. 1960. С. 28.
6. **Балашевич Ю.И., Новожилов В.В.** Теория пластичности, учитывающая остаточные микронапряжения // ПММ. 1958. № 22. С. 1.

I.V. Papkova, O.A. Afonin, A.V. Krysko (Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov)

MATHEMATICAL MODELING OF NONLINEAR DYNAMICS OF ELEMENTS OF MEMS / NEMS DEVICES IN THE FORM OF RECTANGULAR SHELLS IN PLAN, TAKING INTO ACCOUNT THE INTERRELATION OF TEMPERATURE AND DEFORMATION FIELDS AT A FINITE RATE OF HEAT PROPAGATION

In this work, a mathematical model of the dynamics of nanoresonators in the form of beams under the influence of a temperature field and neutron irradiation has been built, software has been developed that allows it to be used for designing MMDII / NMDII. The mathematical model of nanoresonators is obtained from the Hamilton-Ostrogradsky energy principle based on a modified moment theory taking into account the Pelekh-Sheremetyev hypothesis and the deformation theory of plasticity. Calculation examples are given.

А. С. МИТЬКИН, В. А. ПОГОРЕЛОВ, В. П. СИЗОВ
(ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-исследовательский институт радиосвязи»)

ДВУХОСЕВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ МИКРОГИРОСКОП НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Предложена структурная схема и описан принцип действия твердотельного двухосевого микромеханического гироскопа повышенной точности на поверхностных акустических волнах (ТМГ на ПАВ). Разработанный ТМГ на ПАВ отличается от традиционных гироскопов на ПАВ возможностью измерять угловую скорость вращения несущего основания относительно двух осей и наличием схемы компенсации помех в измерительном тракте. Описанное устройство может найти применение в системах навигации, ориентации и управления подвижными объектами. Предлагаемое техническое решение защищено патентом Российской Федерации на изобретение.

Введение. Интенсивное развитие автомобильного транспорта, робототехники, авиационной и ракетно-космической техники приводят к необходимости совершенствования ТМГ на ПАВ. Актуальность этой задачи заключается в постоянно возрастающих требованиях к повышению точности и надежности новых типов гироскопов [1–5]. Недостатками технических решений существующих ТМГ на ПАВ [6–13] являются ограниченные функциональные возможности и низкий уровень полезного сигнала по сравнению с уровнем шумовых помех. Ограничение функциональных возможностей обусловлено тем, что отмеченные технические решения обеспечивают регистрацию угловой скорости вращения несущего основания только относительно одного направления его вращения [6–13]. А низкий уровень полезного сигнала по сравнению с уровнем шумовых помех приводит к необходимости применения регистрирующей аппаратуры с высокой чувствительностью, что значительно увеличивает стоимость ТМГ [10].

Цель работы – расширение функциональных возможностей ТМГ на ПАВ за счет преобразования угловых скоростей вращения несущего основания в электрические сигналы одновременно относительно двух осей его вращения и повышения уровня полезного сигнала по сравнению с уровнем шумовых помех.

Описание ТМГ на ПАВ. Для достижения поставленной цели предлагается ТМГ на ПАВ, который содержит несущее основание 1, выполненное из изотропного материала, на внешней поверхности 2 и внутренней поверхности 3 которого выполнены трапецеидальные выступы 4 и 5 соответственно, совпадающие по форме и размерам и размещенные зеркально друг относительно друга (рис. 1) [11]. Трапецеидальный выступ 4 имеет малое основание 6, большее основание 7 и боковые поверхности 8, при этом большее основание 7 обращено в сторону внутренней поверхности 3 несущего основания 1. Трапецеидальный выступ 5 имеет малое основание 9, большее основание 10 и боковые поверхности 11, при этом большее основание 10 обращено в сторону внешней поверхности 2 несущего основания 1.

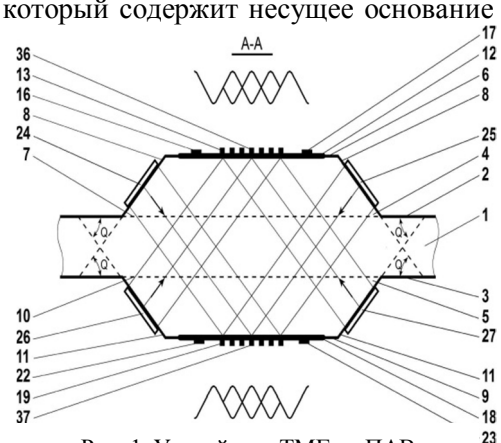


Рис. 1. Устройство ТМГ на ПАВ

На поверхности малого основания 6 трапецеидального выступа 4 нанесена тонкая пленка 12 из пьезоэлектрика с установленными на ней регулярной структурой инерционных масс 13 и измерительными встречно-штыревыми преобразователями (ВШП) 14, 15 (вдоль оси *X*) и 16, 17 (вдоль оси *Y*) (рис. 2) суммарного поля ПАВ от регулярной структуры инерционных масс 13, состоящего из дифракционных и сигнальных полей ПАВ от сил Кориолиса.

На поверхности малого основания 9 трапецеидального выступа 5 (рис. 1) нанесена тонкая пленка 18 из пьезоэлектрика с установленными на ней регулярной структурой инерционных масс 19 и измерительными ВШП 20, 21 (вдоль оси *X*) и 22, 23 (вдоль оси *Y*) (рис. 2) суммарного поля ПАВ от регулярной структуры инерционных масс 19, состоящего из дифракционных и сигнальных полей ПАВ от сил Кориолиса. Боковые поверхности 8 трапецеидального выступа 4 и боковые поверхности 11 трапецеидального выступа 5 (рис. 1) образуют соответственно с внутренней поверхностью 3 и внешней поверхностью 2 несущего основания 1 угол *Q*, который выбирается из условия оптимального возбуждения волн Релея на внутренней поверхности 3 и внешней поверхности 2 несущего основания 1.

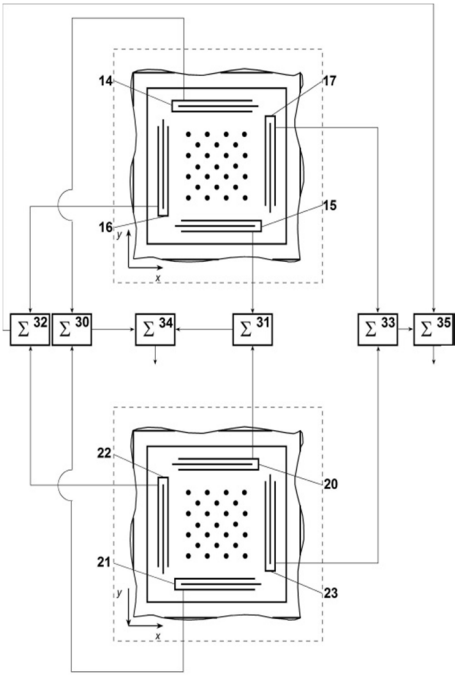


Рис. 2. Схема электрических соединений измерительных ВШП

Угол *Q* задан положением боковых поверхностей 8 и 11 соответственно трапецеидальных выступов 4 и 5 относительно внутренней поверхности 3 и внешней поверхности 2 несущего основания 1. На боковых поверхностях 8 трапецеидального выступа 4 симметрично друг другу установлены активные пьезоэлектрические преобразователи 24 и 25, а на боковых поверхностях 11 трапецеидального выступа 5 симметрично друг другу установлены активные пьезоэлектрические преобразователи 26 и 27, которые обеспечивают возбуждение продольных акустических волн в материале несущего основания в направлениях, определяемых углом *Q*.

Активные пьезоэлектрические преобразователи 26 и 27 (рис. 3) электрически соединены с генератором Г28, а активные пьезоэлектрические преобразователи 24 и 25 электрически соединены с генератором Г28 и инвертором И29. При этом активные пьезоэлектрические преобразователи 24 и 25 обеспечивают возбуждение в противофазе по отношению к активным пьезоэлектрическим преобразователям 26 и 27. Измерительные ВШП 14, 15, размещенные на поверхности малого основания 6 трапецеидального выступа 4 (вдоль оси *X*), и измерительные ВШП 16, 17 (вдоль оси *Y*) установлены на тонкой пленке 12 симметрично относительно положения регулярной структуры инерционных масс 13 и перпендикулярно осям вращения несущего основания 1. Измерительные ВШП 20, 21, размещенные на поверхности малого основания 9 трапецеидального выступа 5 (рис.2) (вдоль оси *X*), и измерительные ВШП 22, 23 (вдоль оси *Y*) установлены на тонкой пленке 18 симметрично относительно положения регулярной структуры инерционных масс 19 и перпендикулярно осям вращения несущего основания 1 (рис. 2). Выходы измерительных ВШП 14 и 20, 15 и 21, 16 и 22, 17 и 23 попарно электрически соединены с входами сумматоров соответственно 30, 31, 32 и 33 (рис. 2). Выходы сумматоров 30 и 31, 32 и 33 соединены соответственно со входами сумматоров 34 и 35. Регулярные структуры инерционных масс 13 и 19 размещены в шахматном порядке с расстояниями между ними, обеспечивающими преимущественное излучение в направлениях к измерительным ВШП. Выходы сумматоров 34 и 35 соединены с системой регистрации.

Принцип действия ТМГ на ПАВ. При помощи генератора Г28 и инвертора И29 (рис. 3) активные пьезоэлектрические преобразователи 26, 27 и 24, 25 возбуждают в несущем основании 1 продольные волны, которые при взаимодействии с боковой поверхностью 8 малого основания 6 трапецеидального выступа 4 и боковой поверхностью 11 малого основания 9 трапецеидального выступа 5 возбуждают волны Релея, бегущие в разные стороны по оси X, при этом активные пьезоэлектрические преобразователи 24 и 25 обеспечивают возбуждение в противофазе по отношению к активным пьезоэлектрическим преобразователям 26 и 27. В областях 36 и 37 интерференции пучков продольных волн соответственно на боковой поверхности 8 малого основания 6 трапецеидального выступа 4 и боковой поверхности 11 малого основания 9 трапецеидального выступа 5 образуются стоячие волны.

В этих областях размещены регулярные структуры инерционных масс 13 и 19, которые позволяют увеличить силу Кориолиса, возникающую при вращении гироскопа. Под воздействием стоячих волн регулярные структуры инерционных масс 13 и 19 совершают вертикальные (вдоль оси *Z*) колебания. Колеблющиеся массы в свою очередь являются источниками ПАВ, которые распространяются вдоль осей *X* и *Y*. Таким образом, из областей 36 и 37 интерференции пучков продольных волн, где расположены регулярные структуры инерционных масс 13 и 19, в сторону измерительных ВШП 14, 15, 16, 17, 20, 21, 22, 23 распространяются бегущие волны, которые этими ВШП детектируются. В результате на выходах измерительных ВШП возникают соответствующие сигналы.

При вращении гироскопа вокруг оси *X* на движущиеся вдоль оси *Z* структуры инерционных масс 13 и 19 воздействует сила Кориолиса, направленная вдоль оси *Y*. Под воздействием этой силы генерируется дополнительная ПАВ, которая изменяет электрический сигнал на выходе измерительных ВШП 16, 17 и 22, 23. Это изменение пропорционально угловой скорости Ω, направленной вдоль оси *X*. На выходе измерительных ВШП 14, 15 и 20, 21 сигнал остается практически неизменным. При вращении гироскопа вокруг оси *Y* происходят аналогичные явления, а полезный сигнал возникает на выходе измерительных ВШП 14, 15 и 20, 21. При одновременном вращении гироскопа вокруг осей *X* и *Y* полезный сигнал возникает на всех измерительных ВШП, причем уровень сигналов на выходах ВШП 16, 17 и 22, 23 соответствует скорости вращения вокруг оси *X*, а уровень сигналов на выходах 14, 15 и 20, 21 соответствует скорости вращения вокруг оси *Y*. Таким образом, возникают сигналы, позволяющие судить о вращении несущего основания 1 относительно двух осей. Сигналы с выходов измерительных ВШП 14 и 21 поступают на входы сумматора 30, с выходов измерительных ВШП 15 и 20 поступают на входы сумматора 31, с выходов измерительных ВШП 16 и 22 поступают на входы сумматора 32, а с выходов измерительных ВШП 17 и 23 поступают на входы сумматора 33, где производится суммирование с выходов соответствующих ВШП, при этом сигналы, возникающие под действием ПАВ (возбуждаемых соответствующими волнами, которые излучаются активными пьезоэлектрическими преобразователями 24, 25 и 26, 27), на выходе каждого из сумматоров 30, 31 и 32, 33 уменьшаются, т.к. преобразователи 24, 25 и 26, 27 соответственно возбуждают волны в противофазе, а сигналы, возникающие под действием дополнительных ПАВ при вращении несущего основания 1, находятся в фазе (т.к. Кориолисово ускорение всех масс имеет одинаковое направление) и на выходах этих сумматоров увеличиваются. Сигналы с выходов сумматоров 30 и 31 поступают на входы сумматора 34, а сигналы с выходов сумматоров 32 и 33 поступают на входы сумматора 35, где также производится суммирование сигналов со всех измерительных ВШП, соответствующих осям вращения несущего основания 1.Сигналы с выходов сумматоров 34 и 35 поступают в систему регистрации. При этом достигается существенное увеличение уровня полезного сигнала по сравнению с уровнем шумовых помех.

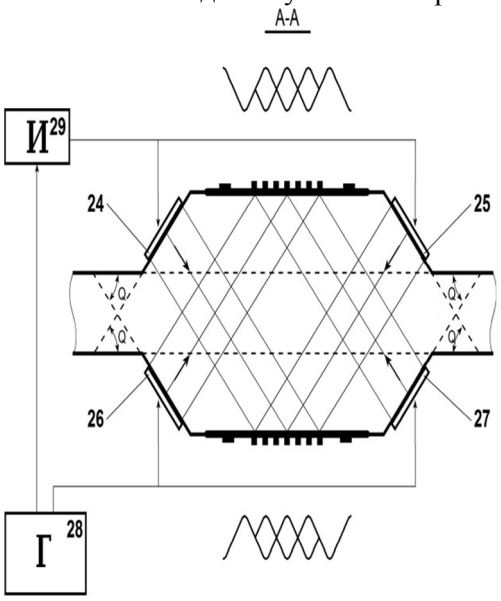


Рис. 3. Схема электрических соединений активных пьезоэлектрических преобразователей

Заключение. На основе разработанного в работе метода преобразования поверхностных акустических волн в электрические сигналы предложена структура и описан принцип действия ТМГ на ПАВ повышенной точности, который преобразует угловую скорость вращения несущего основания в электрические сигналы одновременно относительно двух осей вращения. Предлагаемый гироскоп защищен патентом Российской Федерации на изобретение [14] и может быть применен в системах навигации и ориентации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Соколов С.В., Погорелов В.А**. Стохастическая оценка, управление и идентификация в высокоточных навигационных системах. М.: Физматлит, 2016. 264 с.
2. **Соколов С.В., Погорелов В.А**. Основы синтеза многоструктурных бесплатформенных навигационных систем. М.: Физматлит, 2009. 190 с.
3. **Розенберг И.Н., Соколов С.В., Уманский В.И., Погорелов В.А.** Теоретические основы тесной интеграции инерциально-спутниковых навигационных систем. М.: Физматлит, 2018. 312 с.
4. **Лукьянов Д.П., Филатов Ю.В., Шевченко С.Ю.** Современное состояние и перспективы развития твердотельных микрогироскопов на поверхностных акустических волнах // Гироскопия и навигация. 2011. №3(74). С. 75–87.
5. **Калинин В.А., Лавров Ю.В., Мельников В.А., Шубарев В.А.** Математическое моделирование гироскопа на ПАВ // Электроника: Наука, технология, бизнес. Спецвыпуск. 2008. С. 47–51.
6. **Вахтин Ю.В., Погорелов В.А., Сизов В.П.** Применение метода скаляризации в гироскопах на поверхностных акустических волнах // Радиотехника. 2019. Т.№7(9). С. 209–214.
7. **Вахтин Ю.В., Погорелов В.А., Сизов В.П.** Двухосевой твердотельный микрогироскоп на поверхностных акустических волнах // Мехатроника. Автоматизация. Управление. №5. 2019. С.299–307.
8. **Varadan, V.K. Varadan V.V.,** Microsensors, microelectromechanical systems (MEMS), and electronics for smart structures and systems, Smart Mater. Struct., 2009, no. 9, pp. 953–972.
9. **Патент 2387951 РФ**. Пьезоэлектрический гироскоп / В.А. Калинин, В.Д. Лукьянов, В.А. Шубарев, В.А. Мельников. №2009109735/28, заявл. 17.03.2009; опубл. 27.04.2010. Бюл. № 12.
10. **Патент 2390727 РФ**. Гироскоп на поверхностных акустических волнах / В.А. Калинин, В.Д. Лукьянов, В.А. Шубарев, В.А. Мельников. №2009109734/28, заявл. 17.03.2009; опубл. 27.05.2010. Бюл. № 15.
11. **Patent 7895892 B2 US**. Apparatus and method for detecting a rotation / R. Aigner. 01.03.2011.
12. **Patent 6984332 B2 US**. Micro-Electromechanical Gyroscope / V.K. Varadan, P.B. Xavier, W.D. Suh, J.A. Kollakompil, V.V. Varadan. - 10.01.2006.
13. **Патент 2543706 РФ**, МПК G 01 C 19/56, H 03 H 9/25. Микроакустомеханический гироскоп / Ю.В. Вахтин, И.П. Мирошниченко, В.П. Сизов, В.А. Погорелов. № 2013143420/28, заявл. 25.09.2013; опубл. 10.03.2015. Бюл. № 7.
14. **Патент 2582483 РФ**, МПК G 01 C 19/56. Модифицированный микроакустомеханический гироскоп / И.П. Мирошниченко, А.С. Митькин, В.А. Погорелов, В.П. Сизов. №2015104242/28, заявл. 09.02.2015; опубл. 27.04.2016. Бюл. 12

A.S. Mit'kin, V. A. Pogorelov, V.P. Sizov (Federal research and production center "Research Institute of Radio Communication" Rostov-on-Don)

TWO-AXIS SOLID-STATE MICRO-GYROSCOPE BASED HIGH-PRECISION ON SURFACE ACOUSTIC WAVES

A block diagram is proposed and the principle of operation of a solid-state two-axis micromechanical gyroscope of high accuracy on surface acoustic waves (MG on SAW) is described. The developed MG on SAW differs from traditional gyroscopes on SAW by the ability to measure angular velocity relative to two axes and the presence of a noise compensation scheme in the measuring path. The proposed device can be used in navigation, orientation and control systems for moving objects.

Д. А. МИХАЙЛЕНКО, С. Ю. ШЕВЧЕНКО
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург)

СРАВНЕНИЕ МЕМБРАН ИЗ AlN И $SiO_2/LiNbO_3$ КАК ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Работа посвящена сравнению пьезоэлектрических материалов, используемых как чувствительные элементы акселерометров. Сама конструкция чувствительного элемента представлена в виде кольцевого волнового резонатора на поверхностных акустических волнах. В работе оцениваются частотные характеристики, полученные в ходе моделирования, а также влияние внешних факторов на используемые пьезоэлектрические материалы.

Введение. Датчики на основе поверхностных акустических волн (ПАВ) имеют множество преимуществ перед своими аналогами с чувствительными элементами (ЧЭ) различных типов. Основными недостатками ПАВ-датчиков являются форма чувствительного элемента (прямоугольная или треугольная) и крепление чувствительного элемента к корпусу конструкции, в результате чего датчики не могут выдерживать сверхвысокие ускорения. Мы предлагаем конструкцию датчика в виде кольца, лишенного описанных выше недостатков.

Доклад посвящен определению при помощи компьютерного моделирования наилучшего материала для использования его как чувствительного элемента кольцевого волнового резонатора на поверхностных акустически волнах.

Датчики на ПАВ. Датчики на основе поверхностных акустических волн (ПАВ) менее развиты на сегодняшний день, но являются достаточно перспективным направлением и многообещающей альтернативой классическим системам. Последние разработки на основе монолитных твердотельных конструкций характеризуются относительно высокой стабильностью параметров и низким энергопотреблением (0,5-1 Вт) [1]. Хотя микромеханические акселерометры на основе ПАВ (ММА) в настоящее время все еще находятся в стадии разработки, на рынке доступны датчики ПАВ, которые широко используются в других областях [2–4].

Одним из ключевых требований для дальнейшего развития ММА на основе ПАВ и подобных устройств является поиск новых пьезоэлектрических материалов для консоли чувствительного элемента (ЧЭ), которые могли бы преодолеть типичные ограничения существующих прототипов [5].

Недавно нами [6] была предложена конструкция ММА на основе ПАВ, основанного на кольцевом ЧЭ для более равномерного распределения нагрузки по поверхности ЧЭ, чтобы преодолеть недостатки прямоугольных [7] и треугольных ЧЭ [8].

Конструкция чувствительного элемента. Общий вид мембранного чувствительного элемента представлен на рис. 1. Модель выполнялась в программном пакете AutoCAD 2019 с последующим импортом модели в COMSOL Multiphysics вследствие ограниченных возможностей CAD редактора последнего. Резонатор состоит из двух встречно-штыревых преобразователей (ВШП) в форме кольца (1) и пьезоэлектрического кристалла, расположенного между преобразователями (2). Вся конструкция ограничена по глубине и по радиусу демпфирующей средой для подавления паразитных отражений волн от внешних границ. Конструкция ВШП представлена на рис. 2.

Компьютерное моделирование. Характеристики используемых материалов представлены в табл. 1. Диапазон задаваемых значений – 0-40000g. Ускорение действует перпендикулярно плоскости консоли (рис. 1).

Ниобат лития и кварц являются анизотропными материалами, а нитрид алюминия – изотропным. На рис. 3 показано, что смещения материала были неравномерными из-за анизотропии, когда кварц использовался в качестве материала подложки. Однако в случае нитрида алюминия такой эффект не наблюдался, и смещения материала были однородными.

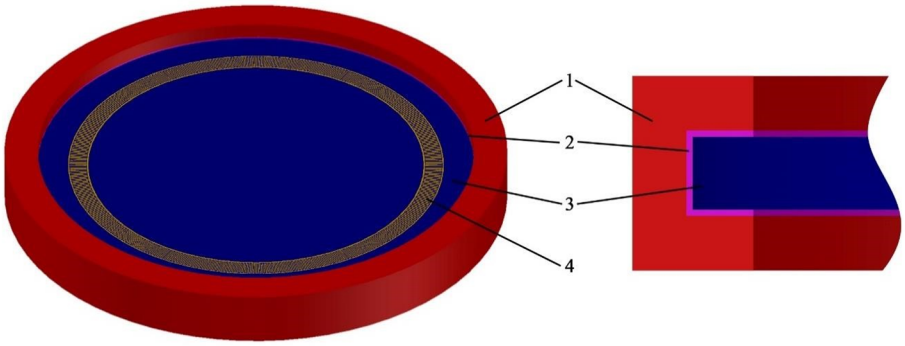


Рис. 1. Мембранный чувствительный элемент: 1 – корпус; 2 – демпфирующий материал; 3 – консоль; 4 – встречно-штыревой преобразователь

Таблица 1

Характеристики пьезоэлектрических материалов и силиконового клея

Характеристика	ST-срез SiO_2	YX-128°-срез $LiNbO_3$	AlN	Силиконовый клей
Скорость распространения волны, *м/с*	3158	3961	5705	-
Плотность, *кг/м*^{3}	2650	4640	3300	1700
Модуль Юнга, *Па*	$76{,}5\times10^9$	170×10^9	310×10^9	25×10^6
Коэффициент Пуассона	0,08	0,25	0,24	0,48
Предел прочности, *Па*	48×10^6	110×10^6	250×10^6	–
Коэффициент теплового расширения, *К*$^{-1}$	$13{,}37\times10^{-6}$	$14{,}8\times10^{-6}$	$5{,}6\times10^{-6}$	275×10^{-6}
Теплопроводность, *Вт/м·К*	6,5	4,6	170	1,375
Удельная теплоемкость, *Дж/кг ·К*	744	630	780	1175

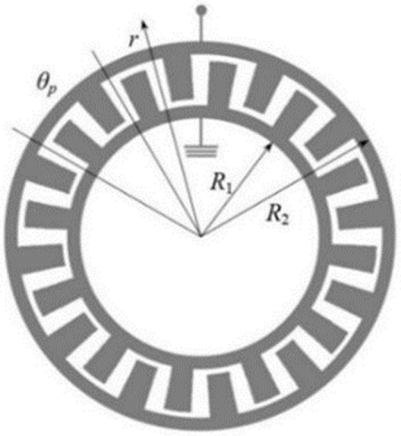


Рис. 2. Встречно-штыревой преобразователь

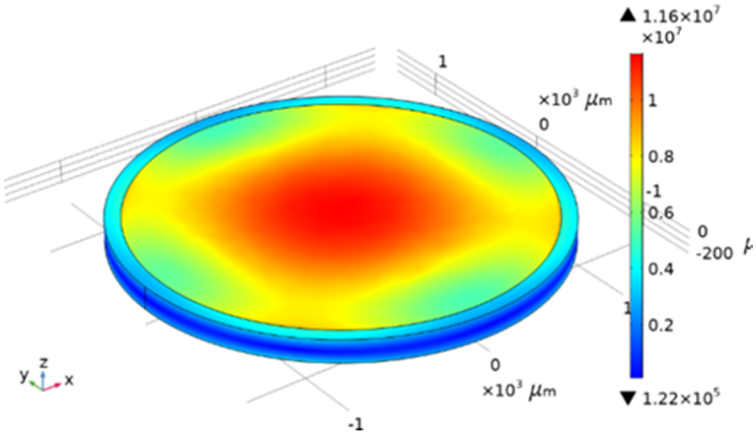


Рис. 3. Распределение нагрузки по консоли из кварца

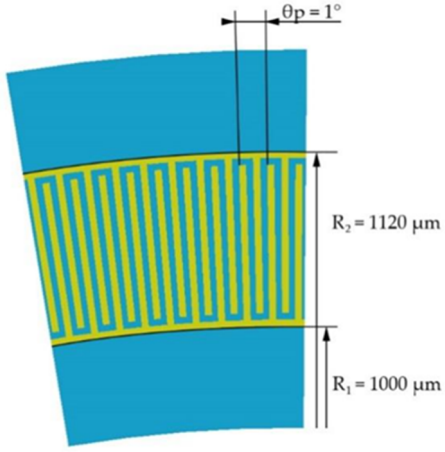


Рис. 4. Геометрия встречно-штыревого преобразователя

Оптимальным расстоянием для размещения структуры ВШП является 1090 мкм от центра консоли. Моделирование было проведено для трех материалов, и выборка из четырех значений для демонстрации эффекта представлена в табл. 2.

Таблица 2

Смещения консоли при использовании силиконового клея (мкм)

Ускорение, g	SiO_2	$LiNbO_3$	AlN
50	0,00130	0,00131	0,00048
1000	0,02611	0,02626	0,00940
40000	0,98475	1,05050	0,38802

Частотные характеристики. Для определения резонансной моды для каждого материала мы принимаем длину одного периода ВШП в 18,5 мкм согласно габаритным характеристикам ЧЭ (рис. 4). Для свободной поверхности резонансная частота для SiO_2 составила 168,21 МГц, $LiNbO_3$ – 212,38 МГц, AlN – 316,49 МГц. Необходимо принимать во внимание, что частично металлизированная или полностью металлизированная поверхность уменьшит скорость распространения волны по поверхности материала, что приведет к уменьшению резонансной частоты.

Особенностью кольцевого волнового резонатора на ПАВ является то, что первая гармоника и, следовательно, максимальное значение реальной составляющей комплексной проводимости располагается на внешней части апертуры ВШП, а вторая – в центральной. По результатам моделирования наибольшее значение реальной составляющей комплексной проводимости для SiO_2 составляет 0,168 мСм, для $LiNbO_3$ – 88,5 мСм, для AlN – 0,887 мСм.

Возможна оценка элемента чувствительности. На рис. 5 показан график изменения частоты при ускорении при изготовлении консоли из различных материалов.

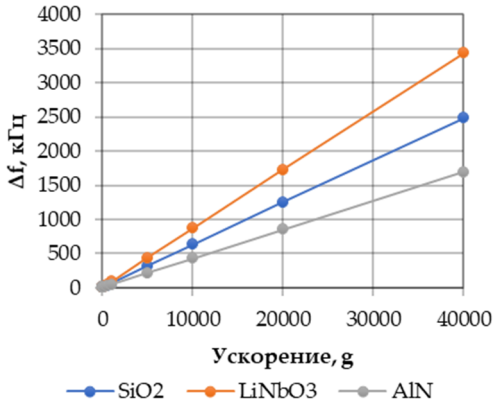


Рис. 5. График изменения частоты от ускорения

Влияние внешних воздействий на ЧЭ. Температура оказывает значительное влияние на пьезоэлектрические материалы. При помощи датчиков на ПАВ возможно измерение температуры среды. В нашем случае температура будет вносить погрешность в измерении ускорения. Для оценки ее влияния и определения диапазона рабочих температур мы проводим моделирование по значениям в диапазоне от –40°C до +60°C с шагом в 5°C для трех материалов. В табл. 3 представлена выборка значений моделирования. Материалом, наименее подверженным воздействию температуры, является кварц. Материалом, наиболее подверженным воздействию температуры, – ниобат лития. Чувствительность к воздействию температуры при использовании SiO□ – ~43 Гц/°C, LiNbO□ – ~107 Гц/°C, AlN – ~77 Гц/°C в диапазоне от –40°C до 60°C

Таблица 3

Деформация консоли при нагреве и охлаждении (мкм)

Температура, °C	SiO_2	$LiNbO_3$	AlN
–40	−0,0610	−0,0780	−0,0278
–20	−0,0409	−0,0525	−0,0185
0	−0,0204	−0,0275	−0,0097
+20	0	0	0
+40	0,0203	0,0275	0,0095
+60	0,0408	0,0521	0,0186

Заключение. По результатам работы сделан вывод о том, что кварц и ниобат лития обладают выраженными анизотропными свойствами в отличие от нитрида алюминия, который является изотропным материалом. С помощью компьютерного моделирования в показано, что чувствительные элементы на основе изотропной консоли AlN преодолевают как низкую чувствительность SiO_2, так и низкотемпературную стабильность $LiNbO_3$. Также удалось определить максимальное ускорение, которое могут выдержать чувствительные элементы и их чувствительность. Эти значения составляют до 20000g для кварца и 40000g для нитрида алюминия и ниобита лития.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Днепровский В.Г., Карапетьян, Г.Я.** Устройства на поверхностных акустических волнах. Р. н/Д.: Южный федеральный университет, 2014. 186 с.
2. **Thiele, J.A., Da Cunha, M.P.,** High temperature LGS SAW gas sensor, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, vol. 113, no. 2, pp. 816–822.

3. **Кронидов Т.В., Калинин В.А.** Беспроводной пассивный датчик температуры на ПАВ-метке // Вопросы радиоэлектроники. 2012. Т. 1. №. 1. С. 115–123.
4. **Müller, A. et al.,** GaN membrane supported SAW pressure sensors with embedded temperature sensing capability, *IEEE Sensors Journal*, 2017, vol. 17, no. 22, pp. 7383–7393.
5. **Ji, J. et al.,** A high sensitive SH-SAW biosensor based 36° YX black $LiTaO_3$ for label-free detection of Pseudomonas Aeruginosa, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2019, vol. 281, pp. 757–764.
6. **Shevchenko, S.Y., Khivrich, M.A., Markelov, M.A.,** Ring-Shaped Sensitive Element Design for Acceleration Measurements: Overcoming the Limitations of Angular-Shaped Sensors, *Electronics*, 2019, 8, 141.
7. **Lukyanov, D., Shevchenko, S., Kukaev, A., Filippova, E., Safronov, D.,** Micromechanical accelerometers based on surface acoustic waves, Proceedings of the NORCHIP 2014–32nd NORCHIP Conference: The Nordic Microelectronics Event, Tampere, Finland, 7–28 October 2014, pp. 1–4.
8. **Shevchenko, S., Kukaev, A., Khivrich, M., Lukyanov, D.,** Surface-acoustic-wave sensor design for acceleration measurement, *Sensors*, 2018, 18, 2301.

D.A. Mikhailenko, S.Yu. Shevchenko (Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg)

COMPARISON OF AlN AND $SiO_2/LiNbO_3$ MEMBRANES AS SENSITIVE ELEMENTS FOR MEASURING ACCELERATION AT SURFACE ACOUSTIC WAVES

The report is devoted to the comparison of piezoelectric materials used as sensitive elements of accelerometers. The design of the sensitive element is presented in the form of a ring wave resonator based on surface acoustic waves. The work evaluates the frequency characteristics obtained during the simulation, as well as the influence of external factors on the used piezoelectric materials.

Г. В. БЕЗМЕН, А. Н. ШЕВЧЕНКО
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ВЫБОР КРИТЕРИЕВ И МЕТОДОВ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ ПОДСИСТЕМ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО ГИРОСКОПА

В докладе рассматривается вопрос оценки качества работы различных подсистем ядерного магнитного гироскопа, приводится обоснование критериев выбора параметров цепей обратной связи и анализируется их влияния на точность гироскопа на основе экспериментальных данных.

Введение. В настоящее время достаточно актуальной является задача разработки гироскопических датчиков для инерциальных систем, которые должны функционировать в условиях высоких ударных и вибрационных воздействий (при высокой динамике объекта) и при этом обладать малыми габаритными размерами и иметь малое энергопотребление. Одним из вариантов таких датчиков является ядерный магниторезонансный гироскоп [1], далее по тексту – ЯМГ.

Описание работы. Принцип работы ЯМГ, использующего эффекты ядерного магнитного резонанса в изотопах ксенона и электронного парамагнитного резонанса в атомах цезия, поясняется схемой на рис. 1 [2, 3]. В рассматриваем варианте ЯМГ электронные спины цезия ориентируются циркулярно-поляризованным резонансным излучением накачки и передают свою поляризацию ядрам ксенона через спин-обменное взаимодействие, при этом формируется макроскопический вектор намагниченности **M**. Частота прецессии вектора **M** (вектора намагниченности ядерных спинов ксенона) определяется напряженностью постоянного магнитного поля $\mathbf{B_0}$ и величиной гиромагнитного отношения соответствующего изотопа. Детектирование скорости прецессии вектора **M** производится оптическим магнитометром на цезии, для реализации которого электронный парамагнитный резонанс в цезии возбуждается сильным продольным резонансным полем B_{AC}. При этом поперечная составляющая вектора **M** преобразуется в амплитудную модуляцию быстро прецессирующей поперечной компоненты намагниченности цезия.

Детектирование поперечной намагниченности цезия производится по повороту поляризации линейно-поляризованного лазерного излучения детектирования, частота которого отстроена от оптического резонанса цезия на оптимальную величину, имеющую порядок ширины атомной оптической линии поглощения. Поворот плоскости поляризации детектируется с использованием балансной схемы из двух фотоприемников и поляризационного светоделительного куба.

Из сигнала от фотоприемников выделяются два сигнала с частотами, соответствующими прецессии двух изотопов ксенона ^{129}Xe и ^{131}Xe. Эти сигналы используются для формирования резонансного переменного вынуждающего магнитного поля B_{1Xe}, которое задает фазы макроскопической прецессии ядерных спинов изотопов ксенона. Разность фаз сигналов на частоте прецессии одного из изотопов ксенона и стабильного по частоте и фазе соответствующего опорного сигнала несет информацию о повороте макета ЯМГ вокруг оси Z.

На рис. 1 отражена также структура системы двухчастотной генерации. На вход системы подаются сигналы от двух фотоприемников, настроенных на прием двух ортогональных составляющих линейно-поляризованного излучения канала детектирования, прошедшего через газовую ячейку [4, 5]. Полученные на выходах фазовых фильтров сигналы усиливаются до требуемого значения в блоках автоматического регулирования усиления АРУ1 и АРУ2, суммируются друг с другом и подаются на соленоид X для формирования поля B_{1Xe} [2]. В результате мы получаем систему, которую можно представить в виде двух автогенераторных систем, которые вырабатывают гармонические сигналы, поддерживающиеся путем подачи по цепи положительной обратной связи части вырабатываемого сигнала с выхода макета ЯМГ на его вход.

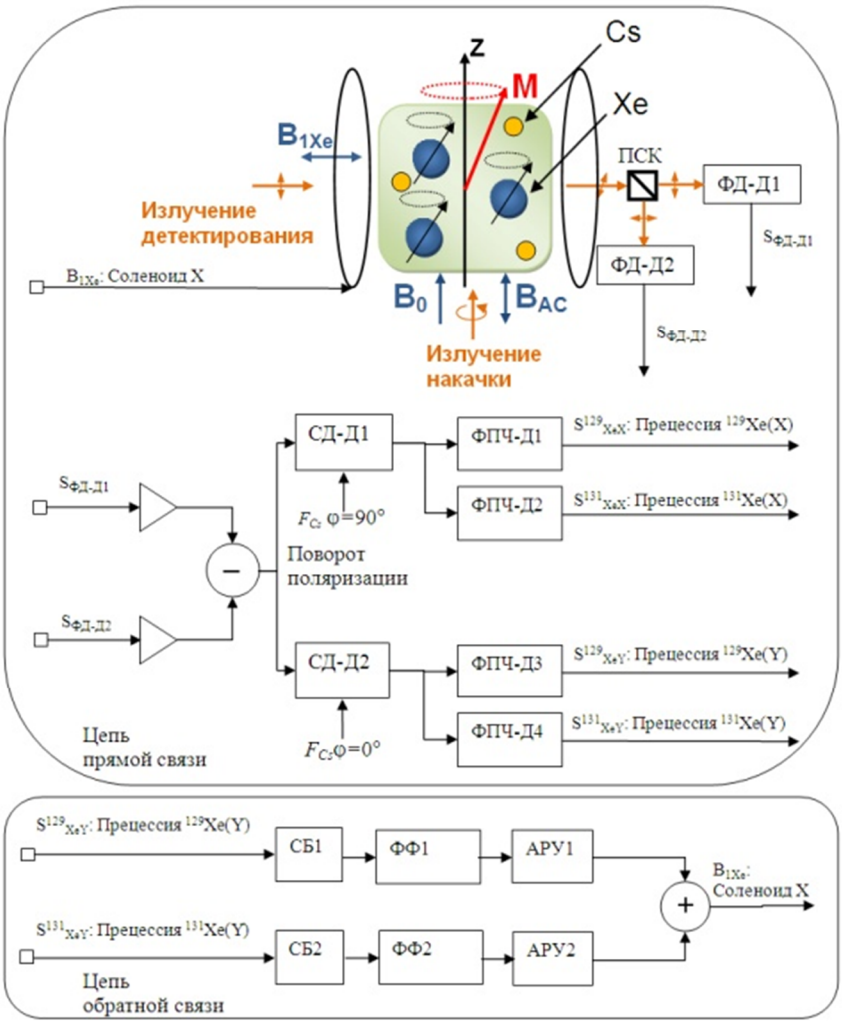


Рис. 1. Схема системы двухчастотной генерации: Xe – изотопы ксенона; Cs – пары цезия; B_0 – постоянное магнитное поле, вдоль которого направлена ось Z; ВАС – продольное переменное поле на частоте прецессии атомов цезия; M – макроскопический магнитный момент ансамбля атомов ксенона; B_{1Xe} – вынуждающее магнитное поле, создаваемое соленоидом X на частоте прецессии магнитного момента M; ПСК – поляризационный светоделительный куб; ФД – фотодиоды; СД – синхронные детекторы; ФПЧ – полосовые фильтры; СБ – кольцевые сдвиговые буферы; ФФ – фазовые фильтры; АРУ – блоки автоматического регулирования усиления

Систему двухчастотной генерации можно представить в виде двух автогенераторных систем, состоящих из цепей прямой и обратной связи. Каждую из таких систем можно представить в следующем виде (см. рис. 2).

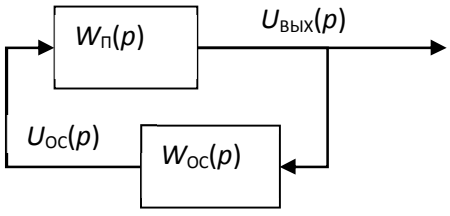


Рис. 2. Схема автогенераторной системы, $U_{ОС}(p)$ – сигнал цепи обратной связи, являющийся входным сигналом; UВЫХ(p) – выходной сигнал; $W_П(p)$ – передаточная функция цепи прямой связи; $W_{ОС}(p)$ – передаточная функция цепи обратной связи

Выходной сигнал ЯМГ описывается выражением

$$U_{вых}(p)=W_П(p)U_{ОС}(p)=W_П(p)W_{ОС}(p)U_{вых}(p). \quad (1)$$

Сокращая обе части равенства (1) на $U_{вых}(p)$ и произведя замену $p=j\omega_Г$, получим

$$K_{П}(\omega_{Г})K_{ОС}(\omega_{Г})e^{j\left[\phi_{П}(\omega_{Г})+\phi_{ОС}(\omega_{Г})\right]}=1, \quad (2)$$

где $K_{П}(\omega_{Г})$ и $K_{ОС}(\omega_{Г})$ – коэффициенты усиления (передачи) цепей прямой и обратной связи на частоте $\omega_{Г}$, а $\phi_{П}(\omega_{Г})$ и $\phi_{ОС}(\omega_{Г})$ – соответствующие фазовые сдвиги.

Условие (2) выполняется при балансе амплитуд и балансе фаз (3):

$$\begin{aligned} K_{П}(\omega_{Г})K_{ОС}(\omega_{Г})&=1,\\ \phi_{П}(\omega_{Г})+\phi_{ОС}(\omega_{Г})&=2\pi l, \end{aligned} \quad (3)$$

где $l=0,\pm1,\pm2,\ldots$.

Условие баланса амплитуд означает, что в стационарном режиме работы ЯМГ на генерируемой частоте $\omega_{Г}$ полное усиление при обходе кольца обратной связи должно составлять единицу, а условие баланса фаз – что полный фазовый сдвиг при обходе кольца обратной связи должен быть равен 0 или кратен 2π. Применительно к работе ЯМГ условие баланса фаз можно представить в следующем виде:

$$\mathrm{ctan}(\varphi_{\text{прецесии}})=0, \quad (4)$$

где $\varphi_{\text{прецесии}}$ – фазовый сдвиг между сигналами прецессий изотопов ксенона ^{129}Xe или ^{131}Xe в осях X и Y. Данное условие обеспечивается только при сдвиге фаз, равном 90°, и при помощи данного критерия можно производить оценку качества работы автогенераторных систем ЯМГ. Условие баланса амплитуд обеспечивается стабильностью вырабатываемых АРУ коэффициентов усиления, при этом оценку качества работы автогенераторых систем в целом можно производить на основе следующего критерия:

$$\min(K_{\text{АРУ}})\neq0, \quad (5)$$

где $K_{\text{АРУ}}$ – коэффициент, вырабатываемый блоками АРУ.

Заключение. В докладе рассмотрен вопрос оценки качества работы цепи самогенерации ЯМГ и приведено обоснование критериев выбора ее параметров. Акцент сделан на необходимости реализации механизмов поддержания баланса амплитуд и фаз, а также на оценке качества работы автогенераторных систем в целом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №. 2. С. 3–10.
2. **Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалёв А.С., Пешехонов В.Г.** Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. №. 1. С. 55–80.
3. **Bezmen, G.V. et al.,** A Two-Frequency Spin Oscillation System for a Quantum Angular Rate Sensor, Gyroscopy and Navigation, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 115–123.
4. **Popov, E.N. et al.,** Behavior of Signal from Optical Circuit of Quantum Rotation Sensor Based on Nuclear Magnetic Resonance, Gyroscopy and Navigation, 2018, vol. 9, no.3, pp. 183–190.
5. **Popov, E.N. et al.,** Frequency line of nuclear magnetic resonance in quantum rotation sensor: Negative effect of detection circuit, Gyroscopy and Navigation, 2017, vol. 8, no.2, pp. 91–96.
6. **Белов Л. и др.** Формирование колебаний и сигналов 2-е изд., пер. и доп. Учебник для бакалавриата и магистратуры. Litres, 2018.
7. **Абубакиров Э.Б., Конюшков А.П.** О мягком и жестком режимах генерации в лампе обратной волны // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2010. Т. 53. С. 645–651.

G.V. Bezmen, A.N. Shevchenko (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

SELECTION OF CRITERIA AND METHODS FOR ASSESSING THE SUBSYSTEMS OPERATION QUALITY OF A NUCLEAR MAGNETIC RESONANCE GYROSCOPE

The report discusses the issue of assessing the performance of various subsystems of a nuclear magnetic gyroscope, substantiates the criteria for choosing the parameters of feedback circuits, and analyzes their influence on the gyroscope accuracy based on experimental data.

А. С. АНОХИН, А. Д. ВОРОНА, К. С. КУЗЬМИН, В. М. НИКИФОРОВ
(ФГУП НПЦАП имени академика Н. А. Пилюгина, г. Москва)

МЕТОДИКА СИНТЕЗА КОРРЕКТИРУЮЩЕГО КОНТУРА АКСЕЛЕРОМЕТРА С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ НА КРЕМНИЕВОМ ПОДВЕСЕ И ОЦЕНКА ЕГО ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Предложена методика синтеза корректирующего контура акселерометра с чувствительным элементом на кремниевом подвесе. Рассмотрен пример синтеза. Приведены теоретические и экспериментальные оценки динамических характеристик системы. Путем математического моделирования определены зависимости динамических параметров маятникового компенсационного акселерометра от его переходной функции. На основе этих зависимостей предложен метод оценки динамических параметров акселерометра.

Введение. В составе современных систем управления применяются перспективные акселерометры с чувствительным элементом (ЧЭ) на кремниевом подвесе, которые обладают улучшенными массогабаритными характеристиками по сравнению с традиционно используемыми акселерометрами на растяжках, что обеспечивает их широкое применение.

Особенностью акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе является то, что у них реализуется существенное аэродинамическое демпфирование. Предложенная в [1] методика синтеза корректирующего контура «сухого» акселерометра на растяжках не учитывает влияние демпфирования, поэтому она ограничено применима для акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе.

Из изложенного выше следует актуальность разработки методики синтеза корректирующего контура акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе с учетом демпфирования.

Одними из важных динамических параметров акселерометра являются его полоса пропускания и запас устойчивости по амплитуде. В свою очередь полоса пропускания определяется из амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) замкнутой системы акселерометра, для снятия которой широко применяется электрический способ либо вибростенд. При этом если АЧХ не имеет подъема, то полоса пропускания определяется частотой, при которой уровень амплитуды составляет 0,7 от ее значения при частоте 20 Гц.

Запас устойчивости по амплитуде $\Delta A_{\text{ЗАП}}$ определяется отношением

$$\Delta A_{\text{ЗАП}} = R_{\text{ОС}} / R_{\text{ОС.ГЕН}}, \qquad (1)$$

где $R_{\text{ОС.ГЕН}}$ – значение сопротивления резистора $R_{\text{ОС}}$, при котором возникает генерация (см. рис. 1, на котором показана схема корректирующего контура (КК) и его АЧХ);
$R_{\text{ОС}}$ – номинальное значение сопротивления резистора R_{OC}.

Недостатками снятия АЧХ замкнутой системы акселерометра электрическим способом и на вибростенде являются:

- достаточно плотный шаг 20 Гц в диапазоне до 200 Гц и шаг 1 Гц для выявления узких резонансных пиков, что достаточно трудоемко;
- нелинейности акселерометра могут исказить форму синусоидального сигнала тока обратной связи и, как следствие, внести погрешность при снятии АЧХ.

Оценка запаса устойчивости по амплитуде путем снижения сопротивления резистора $R_{\text{ОС}}$ сопряжена с риском выхода из строя чувствительного элемента акселерометра из-за возникновения генерации тока обратной связи и, как следствие, многократных ударов маятника о механические упоры. Поэтому на практике обычно сопротивление резистора $R_{\text{ОС}}$ увеличивают до значений, не приводящих к генерации, что приводит к неточной оценке запаса устойчивости по амплитуде.

По этим причинам актуальной является разработка метода оценки динамических параметров акселерометра, основанном на взаимном анализе семейства АЧХ и переходных функций, полученных путем математического моделирования структурной схемы замкнутой системы акселерометра и переходной характеристики акселерометра, полученной экспериментальным путем.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ЧЭ акселерометра на кремниевом подвесе без учета жесткости подвижной системы *c* имеет вид:

$$W_{ЧЭ}(p)=U_{ДУ}(p)/I_{ОС}(p)=K_{ДУ}K_{ДМ}/(Jp^2+K_Дp), \quad (2)$$

где $U_{ДУ}(p)$ – напряжение на выходе предварительного усилителя датчика угла ЧЭ;
$I_{ОС}(p)$ – ток обратной связи ЧЭ;
J – момент инерции подвижной системы;
$K_{ДУ}$ – крутизна датчика угла;
$K_{ДМ}$ – коэффициент передачи датчика момента;
$K_Д$ – коэффициент демпфирования;
p – оператор Лапласа.

Опыт работы с акселерометром с ЧЭ на кремниевом подвесе показал, что у них реализуется существенное аэродинамическое демпфирование. При значении $K_Д = 35\cdot10^{-5}$ Н·м·с и $J = 2{,}47\cdot10^{-8}$ Н·м·с^2 постоянная времени ЧЭ равна $T_{ЧЭ}=J/K_Д = 14{,}2\cdot10^{-3}$ с, что соответствует частоте $\omega_{ЧЭ}$=14256 рад·с$^{-1}$ ($f_{ЧЭ}$=2270 Гц). Верхняя граница полосы пропускания акселерометра обычно составляет от 100 до 200 Гц, что существенно ниже значения $f_{ЧЭ}$=2270 Гц, поэтому при синтезе корректирующего контура можно пользоваться упрощенной АЧХ, полученной из уравнения (2) при $Jp/K_Д<<1$:

$$W_{ЧЭ}(p)\approx K_{ДУ}K_{ДМ}/K_Дp. \quad (3)$$

Из теории автоматического управления известны несколько типовых желаемых АЧХ [2]. Для акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе примем желаемую АЧХ вида

$$W_Ж(p)= U_{ДУ}(p)/I_{ОС}(p)=K(1+T_{1Р})/p^2(1+T_2p), \quad (4)$$

где T_1 – постоянная времени дифференцирующего звена;
T_2 – постоянная времени апериодического звена;
K – коэффициент пропорциональности.

Для обеспечения устойчивости замкнутой системы акселерометра с кремниевым подвесом необходимо, чтобы желаемая АЧХ пересекала ось нулевых децибел с наклоном –20дБ/дек.

Из (3) и (4) можно найти выражение для АЧХ корректирующего контура акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе:

$$W_{КК}(p)=W_Ж(p)/W_{ЧЭ}(p)= K_1(1+T_{1Р})/p(1+T_2p), \quad (5)$$

где K_1 – коэффициент пропорциональности.

Корректирующий контур, описываемый выражением (5), можно реализовать электрической схемой, показанной на рис. 1.

На рис. 1 приняты следующие обозначения:
$R_Ф$ – сопротивление резистора фильтра на выходе предварительного усилителя (ПУ);
$C_Ф$ – емкость конденсатора фильтра на выходе ПУ;
$C_Д$ – емкость дифференцирующего конденсатора;
$R_{ВХ}$ – сопротивление резистора на входе усилителя;
$C_И$ – емкость интегрирующего конденсатора;
$R_{ОУ}$ – сопротивление резистора цепи обратной связи усилителя;
$C_{ОУ}$ – емкость конденсатора цепи обратной связи операционного усилителя;
$R_{ДМ}$ – сопротивление обмотки датчика момента ЧЭ;
$R_{ОС}$ – сопротивление резистора обратной связи ЧЭ;

$$K_1 = 1/C_И R_{ВХ} C_{ОС};\ T1= R_{ВХ} C_Д;\ T_2= R_Ф C_Ф. \quad (6)$$

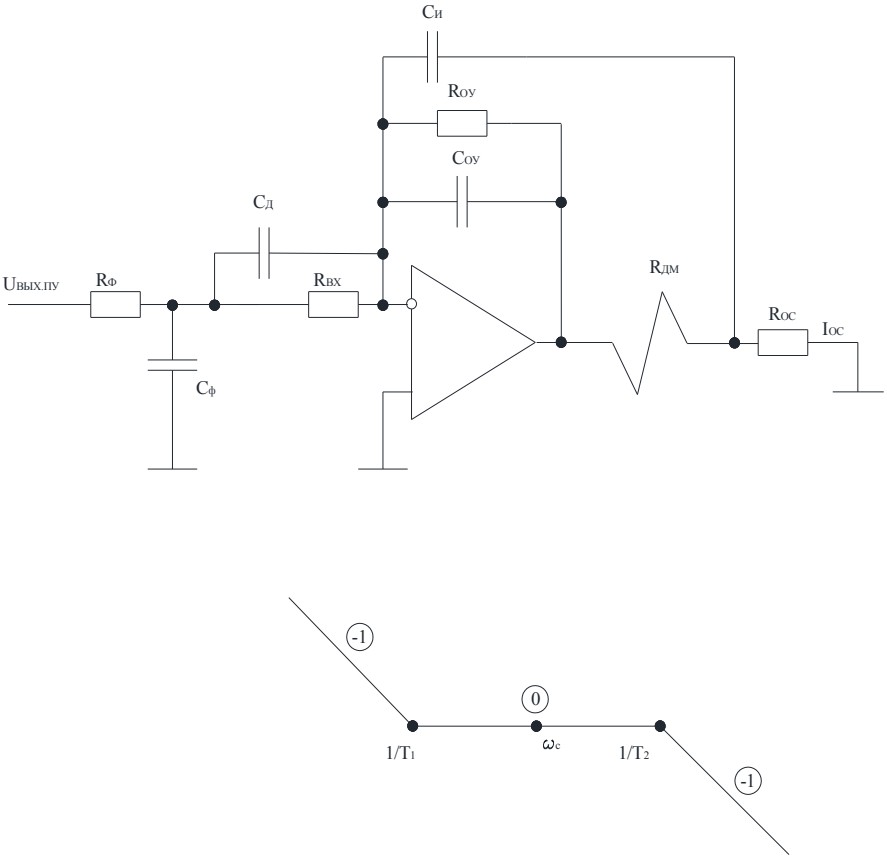


Рис. 1. Структурная схема корректирующего контура акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе и его АЧХ

Выражение (5) в зависимости от параметров элементов корректирующего контура можно записать в виде

$$W_{КК}(p)=(R_{ВХ}C_Дp+1)/pC_ИR_{ВХ}R_{ОС}(R_ФC_Фp+1). \quad (7)$$

Выражение (7) справедливо в случае $R_{ВХ}>>R_Ф$ и $C_ф>>C_Д$, что позволяет пользоваться упрощённым выражением передаточной функции фильтра на выходе ПУ.

Параметр $\lambda=T_1/T_2=R_{ВХ}C_Д/R_ФC_Ф$ определяет запасы устойчивости системы. Чем больше λ, тем больше запасы устойчивости. Обычно при синтезе корректирующего контура акселерометра принимают $\lambda=4...10$. При $\lambda=10$ частота среза ω_c определяется выражением

$$\omega_c\approx 3/T_1\approx 1/3T_2$$

или в зависимости от параметров корректирующего контура

$$\omega_c\approx 3/R_{ВХ}C_Д\approx 1/3R_ФC_Ф. \quad (8)$$

Выражение (4) в зависимости от параметров элементов корректирующего контура можно записать в виде

$$W_Ж(p)=K_{ДУ}K_{ДМ}(R_{ВХ}C_Дp+1)/p^2K_ДC_ИR_{ВХ}R_{ОС}(R_ФC_Фp+1). \quad (9)$$

Таким образом, коэффициент пропорциональности K в уравнении (4) равен:

$$K=K_{ДУ}K_{ДМ}/K_ДC_ИR_{ВХ}R_{ОС}. \quad (10)$$

Из выражения (9) можно найти значение частоты среза ω_c, При $\omega=\omega_c$ имеют место соотношения $W_Ж(\omega_c)=1$, $R_{ВХ}C_Д\,\omega_c>>1$, $R_Ф C_Ф<<1$. Откуда можно найти приближенное значение ω_c:

$$\omega_c \approx K_{ДУ}K_{ДМ}C_Д/K_Д C_И R_{ОС}. \quad (11)$$

Методика синтеза корректирующего контура акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе. Таким образом, практическая методика синтеза корректирующего контура заключается в следующем:

- параметры $K_{ДУ}$, $K_{ДМ}$, $K_Д$ задаются конструкцией ЧЭ акселерометра. Сопротивление резистора обратной связи акселерометра обычно выбирают равным $R_{ОС}$=100 Ом;
- задаем требуемое значение частоты среза ω_c;
- задавшись $R_Ф$, находим $C_Ф$ из выражения (8)

$$C_Ф=1/3\omega_c R_Ф; \quad (12)$$

- задавшись $C_Д$ с учетом $C_Ф>>C_Д$, определяем $R_{ВХ}$ из выражения (8)

$$R_{ВХ}=3/\omega_c C_Д; \quad (13)$$

- из выражения (11) находим $C_И$:

$$C_И = K_{ДУ}K_{ДМ}C_Д/K_Д R_{ОС}\omega_c. \quad (14)$$

Сопротивление резистора $R_{ОУ}$ и емкость конденсатора $C_{ОУ}$ выбираются из условия обеспечения устойчивости микросхемы операционного усилителя.

Пример синтеза корректирующего контура акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе. Заданы числовые значения параметров ЧЭ:

$m \cdot l = 2{,}88 \cdot 10^{-6}$ кг·м;
$J = 2{,}47 \cdot 10^{-8}$ Н·м·с^2;
$K_{дм} = 0{,}057$ Н·м·А$^{-1}$;
$K_{ду} = 1500$ В·рад$^{-1}$;
$K_Д = 35 \cdot 10^{-5}$ Н·м·с;
$R_{дм} = 130$ Ом.

Желаемое значение частоты среза $\omega_c = 3000$ рад·с$^{-1}$ ($f_c \approx 480$ Гц); запас устойчивости по амплитуде $K_{уст} \geq 2$.

Приняв $R_Ф$=15 кОм, находим $C_Ф=7 \cdot 10^{-9}$ Ф. Задавшись $C_Д=3{,}5 \cdot 10^{-9}$ Ф, определяем $R_{ВХ}=2{,}85 \cdot 10^5$ Ом. Определяем $C_И=3 \cdot 10^{-9}$ Ф.

Результаты математического моделирования акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе показаны на рис. 2.

При моделировании использовались следующие дополнительные параметры:

$R_{вх.оу}$ – входное сопротивление операционного усилителя;

$K_{оу}$ – коэффициент усиления операционного усилителя.

Численные значение параметров используемого операционного усилителя $R_{вх.оу} \cdot K_{оу} = 2 \cdot 10^{10}$ и его внешних элементов обратной связи $C_{ОУ}=10^{-10}$ Ф, $R_{ОУ}=\infty$.

По результатам моделирования при помощи Matlab/Simulink определяем АЧХ разомкнутой системы акселерометра (представлена на рис. 3), из которой видно, что частота среза составляет $\omega_c \approx 3265$ рад·с$^{-1}$ ($f_c \approx 520$ Гц), что хорошо согласуется с требуемым значением. На рис. 4 показана АЧХ замкнутой системы акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе.

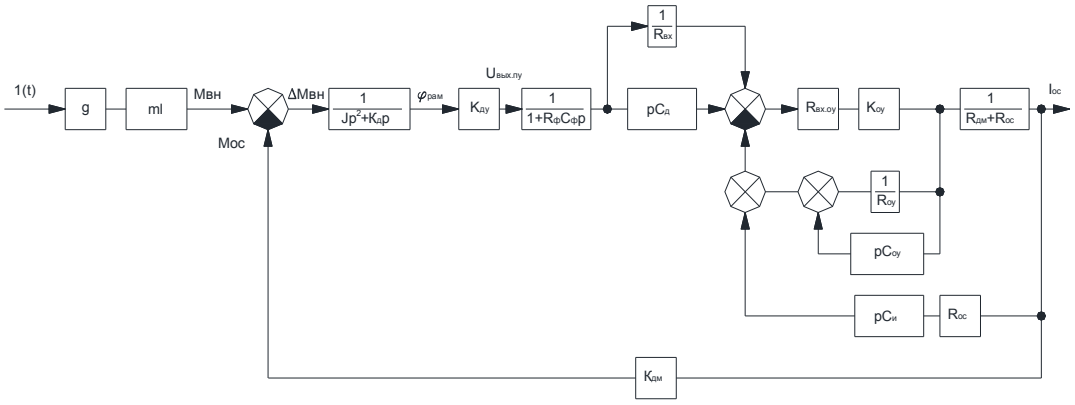


Рис. 2. Математическая модель акселерометра с кремниевым подвесом

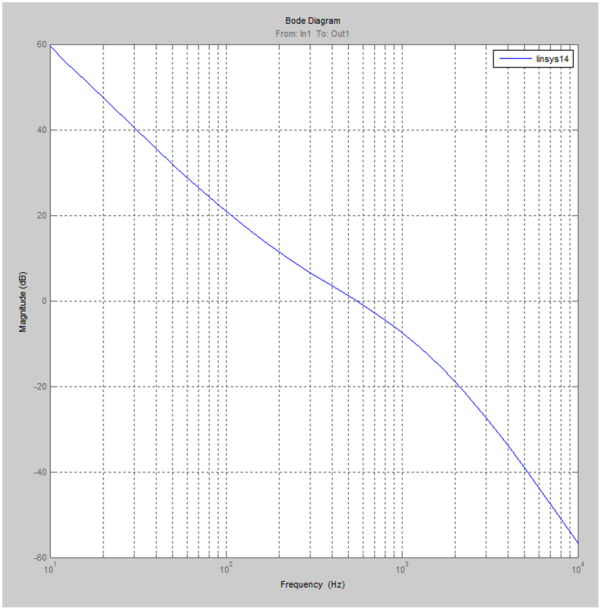


Рис. 3. АЧХ разомкнутой системы акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе по результатам моделирования

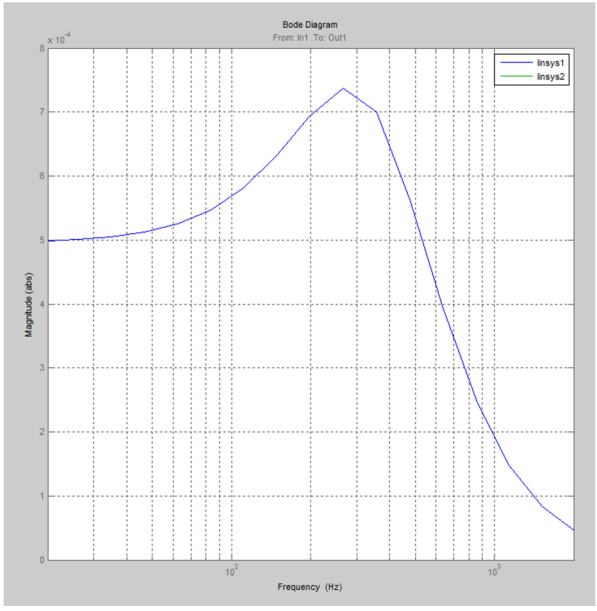


Рис. 4. АЧХ акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе по результатам моделирования

Удобно оценить запасы устойчивости по виду переходного процесса по току обратной связи при задании на вход системы воздействия вида 1(*t*). В случае затухания переходного процесса система устойчива. Переходный процесс в неустойчивой системе будет расходящимся.

На практике запас устойчивости по амплитуде удобно оценивать изменяя сопротивление R_{OC}. В таком случае, запас устойчивости по амплитуде равен:

$$K_{\text{УСТ}} = R_{\text{ОС}} / R_{\text{ОС.УСТ}}, \qquad (15)$$

где R_{OC} – выбранное значение сопротивления,
$R_{\text{ОС.УСТ.}}$ – сопротивление резистора, соответствующее границе устойчивости.

На рис. 5 показан переходный процесс по току обратной связи акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе при выбранном значении R_{OC} = 100 Ом. Видно, что переходный процесс рис. 5 соответствует системе с большим запасом устойчивости.

На рис. 6 показан переходный процесс по току обратной связи акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе при уменьшенном до 30 Ом сопротивлении R_{OC}. Видно, что переходный процесс, показанный на рис. 6, соответствует системе на границе устойчивости.

Таким образом, запас устойчивости по амплитуде равен $K_{УСТ}$>3, что вполне достаточно.

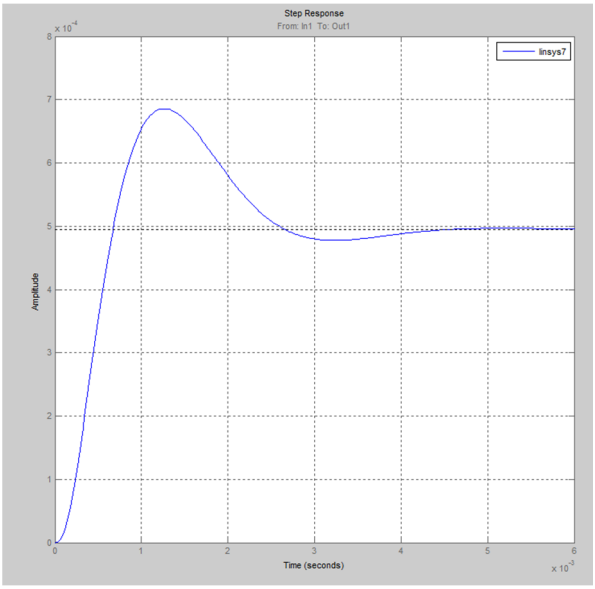


Рис. 5. Устойчивый переходный процесс по току обратной связи

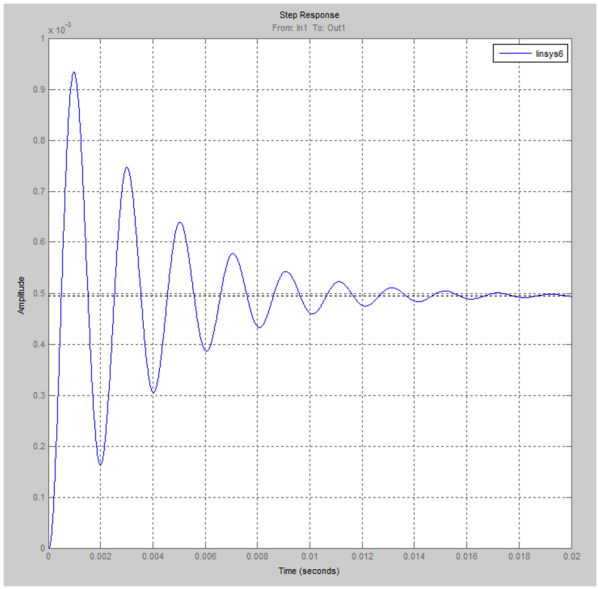


Рис. 6. Переходный процесс по току обратной связи замкнутой системы акселерометра на границе устойчивости

Экспериментальные данные синтеза КК. Реальная АЧХ замкнутой системы акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе, определенная при испытаниях на вибростенде, показана на рис. 7. Сравнивая реальную АЧХ (рис. 7) и АЧХ определенную по модели (рис. 4), видно, что они близки. Незначительные отличия обусловлены погрешностью определения КД, точная оценка которого сопряжена с практическими трудностями.

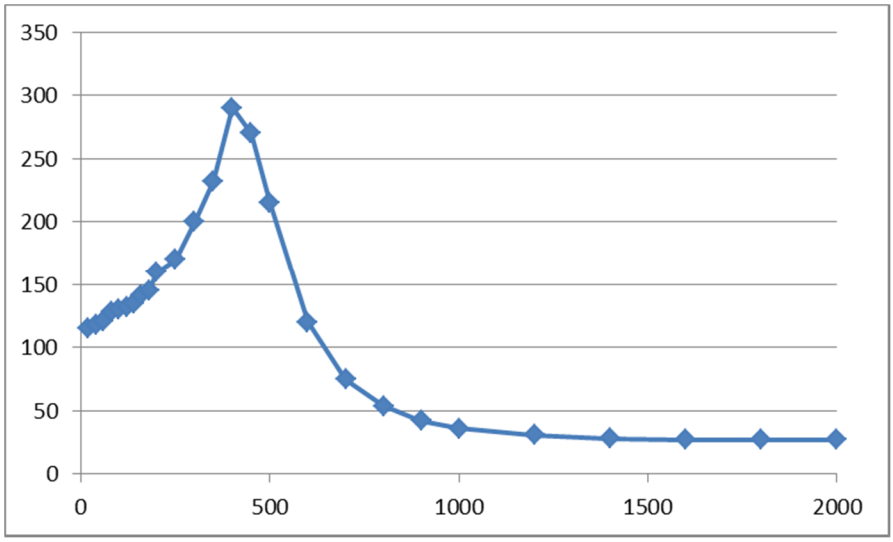


Рис. 7. АЧХ замкнутой системы акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе определенная на вибростенде

Запас устойчивости оценивается путем уменьшения сопротивления резистора R_{OC} до появления генерации. Определенный экспериментально запас устойчивости превышает расчетный и составляет $K_{УСТ} \approx 3{,}5\ldots4$.

Математическое моделирование для метода оценки динамических параметров. Для определения зависимостей динамических параметров акселерометра (полоса пропускания и запас устойчивости по амплитуде) в модуле Simulink программы Matlab было проведено математическое моделирование замкнутой системы, показанной на рис. 2, на примере акселерометра с кремниевым подвесом. Моделирование проведено для чувствительного элемента, выходной ток которого равен 0,05 мА при измерении ускорения 1g.

Моделирование проведено для 5-ти значений полосы пропускания акселерометра от 250 Гц до 2000 Гц, определяемого возможным разбросом параметров отдельных звеньев замкнутой системы акселерометра относительного номинальных значений, при которых полоса пропускания равна 650 Гц. Изменение полосы пропускания акселерометра при моделировании достигалось изменением крутизны датчика угла от 375 В/рад до 6000 В/рад относительно номинального значения 1500 В/рад. АЧХ, полученные при моделировании показаны на рис. 8. Для каждой АЧХ путем моделирования определены переходные функции, показанные на рис. 9, и запасы устойчивости по амплитуде.

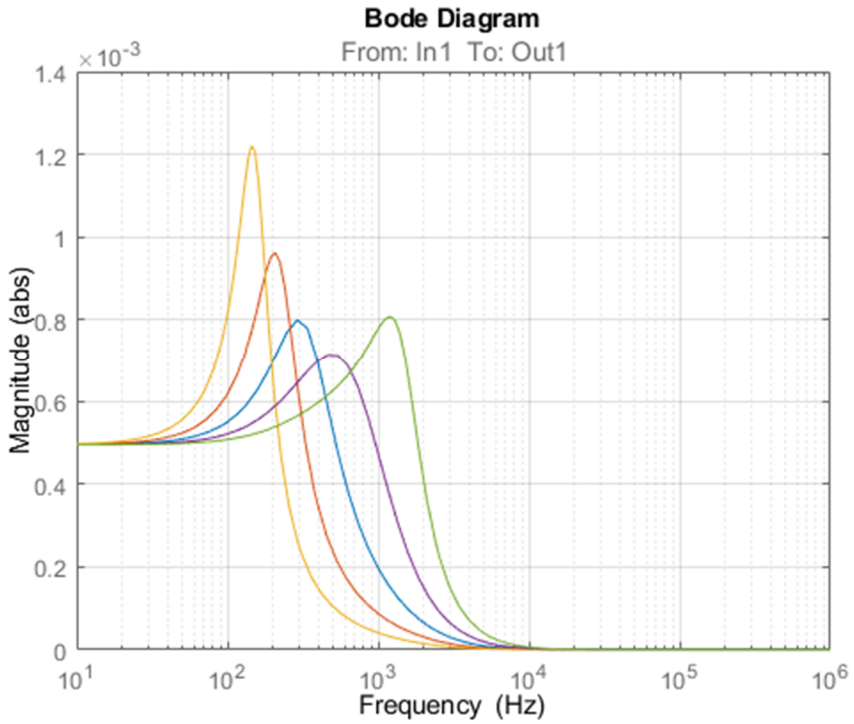


Рис. 8. АЧХ замкнутой системы акселерометра с кремниевым подвесом

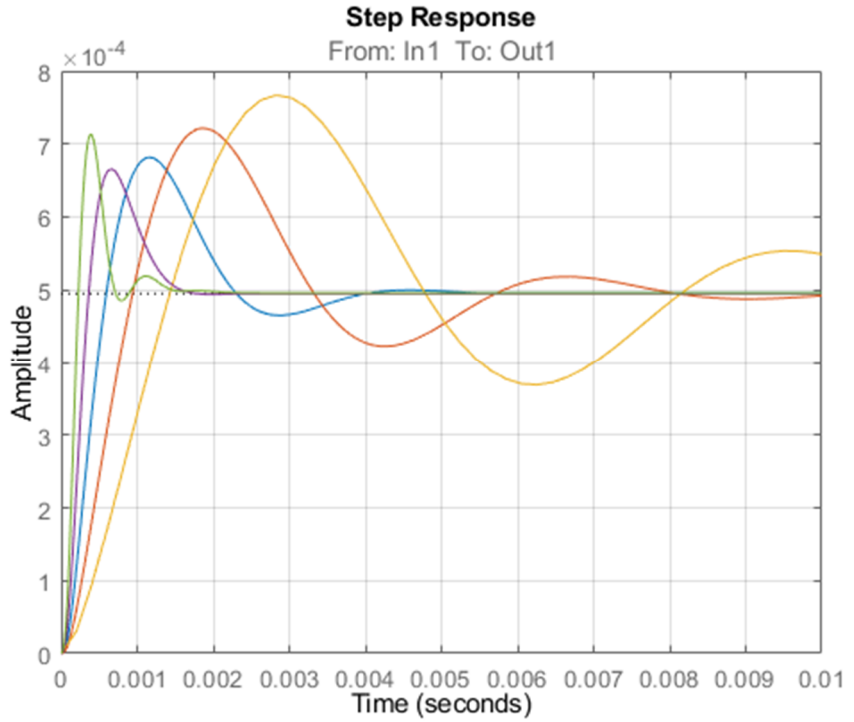


Рис. 9. Переходная функция по току акселерометра с кремниевым подвесом

Из рис. 9 видно, что по виду переходной функции на практике удобно оценивать время нарастания переднего фронта до значения, равного 0,9 от установившегося значения. Поскольку скорость нарастания переходной функции на начальном этапе наибольшая, это позволит на практике с достаточной точностью определить время нарастания.

Напротив, оценка длительности переходного процесса на уровне (3…5) τ, где τ – постоянная времени, может привести к снижению точности, т. к. скорость изменения переходной функции существенно замедляется на конечном участке переходного процесса. В этом случае точное определение длительности переходного процесса будет затруднено влиянием шумов измерения тока обратной связи.

Полученные зависимости полосы пропускания, запаса устойчивости по амплитуде и крутизны датчика угла от длительности фронта нарастания показаны соответственно на рис. 10–12, на которых по оси *X* отложена длительность фронта нарастания в мс, а по оси *Y* – полоса пропускания в Гц, запас устойчивости по амплитуде, крутизна датчика угла В/рад соответственно для каждого рисунка.

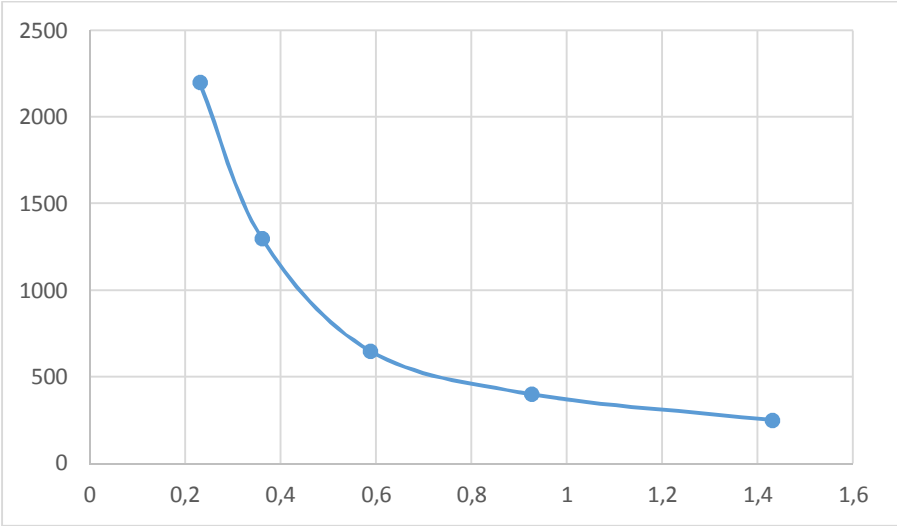


Рис. 10. Зависимость полосы пропускания от длительности фронта нарастания

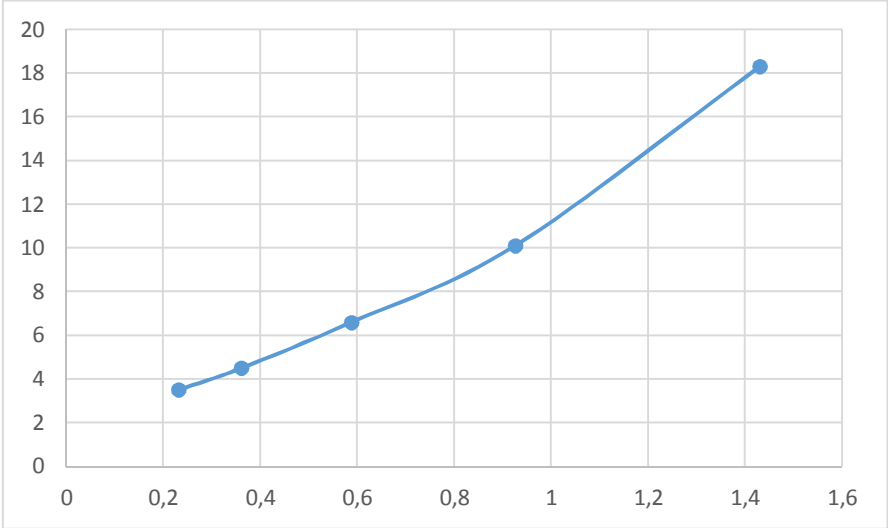


Рис. 11. Зависимость запаса устойчивости по амплитуде от длительности фронта нарастания

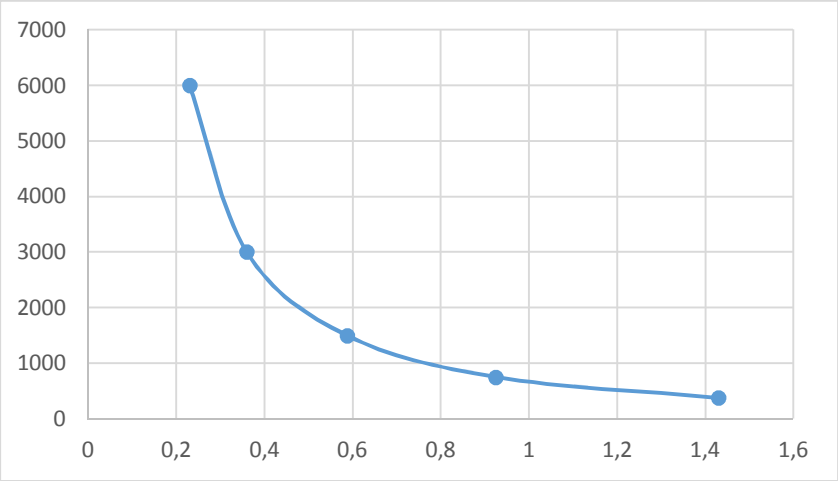


Рис. 12. Зависимость крутизны датчика угла от длительности фронта нарастания

Метод оценки динамических параметров акселерометра и экспериментальные данные. Предлагаемый метод оценки динамических параметров акселерометра по его переходной функции заключается в следующем:

- от генератора в обмотку датчика момента акселерометра при замкнутой обратной связи подается прямоугольный сигнал типа «ступенька»;
- при этом амплитуда задаваемого сигнала выбирается такой, чтобы влияние шумов измерения было мало, но выходной усилитель работал в линейной зоне;
- осциллографом регистрируется переходный процесс тока обратной связи в замкнутой системе акселерометра на ступенчатое воздействие и определяется длительность фронта нарастания.

На рис. 13, 14 и 15 приведены осциллограммы переходного процесса тока обратной связи в замкнутой системе акселерометра с кремниевым подвесом на ступенчатое воздействие при значении амплитуды питания датчика угла 12 В, 6 В и 3 В соответственно.

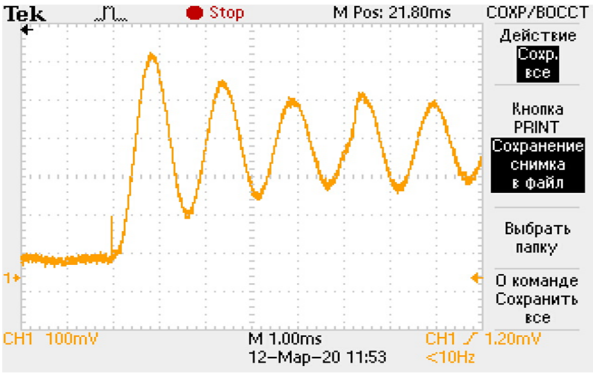


Рис. 13. Переходный процесс при амплитуде питания датчика угла 12 В

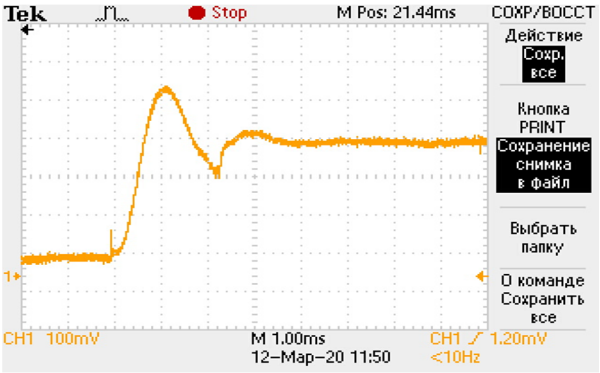


Рис. 14. Переходный процесс при амплитуде питания датчика угла 6 В

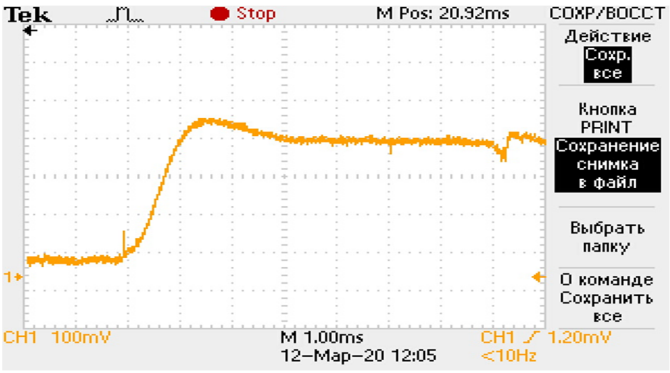


Рис. 15. Переходный процесс при амплитуде питания датчика угла 3 В

Из рис. 13 видно, что длительность фронта нарастания равна 0,36 мс. Из графиков на рис. 10–12 определяем динамические параметры акселерометра:

- полоса пропускания – 1300 Гц;
- запас устойчивости по амплитуде – 4,5;
- крутизна датчика угла – 3000 В/рад.

Из рис. 14 видно, что длительность фронта нарастания равна 0,6 мс. Из графиков на рис. 10–12 определяем динамические параметры акселерометра:

- полоса пропускания – 600 Гц;
- запас устойчивости по амплитуде – 6,5;
- крутизна датчика угла – 1500 В/рад.

Из рис. 15 видно, что длительность фронта нарастания равна 1 мс. Из графиков на рис. 5–7 определяем динамические параметры акселерометра:

- полоса пропускания – 380 Гц;
- запас устойчивости по амплитуде – 10;
- крутизна датчика угла – 750 В/рад.

Динамические параметры акселерометра, полученные предлагаемым методом, близки к параметрам, определяемым путем снятия АЧХ.

Заключение. Предложенная методика синтеза корректирующего контура акселерометра с ЧЭ на кремниевом подвесе с учетом влияния демпфирования подтверждена с помощью математического моделирования и экспериментально.

Также предложен метод оценки динамических параметров акселерометра по его переходной функции. Положительными особенностями метода являются:

- оценка запаса устойчивости по амплитуде без риска выхода из строя акселерометра из-за генерации;
- появление цифровых запоминающих осциллографов обеспечило требуемую точность измерения длительности фронта нарастания;
- оценка динамических параметров акселерометра в составе комплексного прибора, когда снятие АЧХ на вибростенде не представляется возможным.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анохин А.С., Кузьмин К.С., Чхиквадзе Л.И.** Методика синтеза корректирующего контура «сухого» маятникового компенсационного акселерометра // Труды ФГУП «НПЦАП» Научно-технический журнал. 2015. №1. С. 35–41.
2. **Машиностроение.** Энциклопедия / Ред. совет: К.В. Фролов (пред.) и др. М.: Машиностроение. Автоматическое управление. Теория. Т. I–4 / Е.А. Федосов, А.А. Красовский, Е.П. Попов и др. Под общ. ред. Е.А. Фролова. 2000. 688 с., ил.

A.S. Anokhin, A.D. Vorona, K.S. Kuzmin, V.M. Nikiforov (Academician Pilyugin Scientific-Production Centre of Automatics and Instrument-making, Moscow)

SYNTHESIS TECHNIQUE FOR THE CORRECTION LOOP OF AN ACCELEROMETER WITH A SENSITIVE ELEMENT ON A SILICON SUSPENSION AND ASSESSMENT OF ITS DYNAMIC PARAMETERS

The synthesis of the corrective circuit is considered. A mathematical model of an accelerometer with a silicon suspension is presented, taking into account the effect of aerodynamic damping. Theoretical and experimental estimates of the dynamic characteristics of the system are given. A technique is proposed for assessing the dynamic parameters of an accelerometer with a SE on a silicon suspension using a transient process. The dependences of the dynamic parameters of the pendulum compensation accelerometer on its transition function are determined.

С. А. ВОЛОБУЕВ, П. А. ЧЕСНОКОВ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург)

МАЛОГАБАРИТНЫЙ ЦИФРОВОЙ УГЛОМЕР НА ОСНОВЕ ПОПЛАВКОВЫХ МАЯТНИКОВЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

В докладе приведены результаты разработки и испытаний малогабаритного цифрового угломера. Результаты испытаний показали, что предлагаемый прибор по своим характеристикам может быть не хуже прибора Zeromatic 2/2 производства фирмы Wyler, Швецария.

Приведены структурная схема, особенности конструкции прибора, показана возможность введения алгоритмической компенсации изменения смещения нуля при изменении температуры. Приведены результаты стабильности выходных сигналов в пусках на неподвижном основании, Определена погрешность измерения.

Введение. Четыре года назад на XXX конференции памяти Острякова был представлен доклад «Разработка и результаты испытаний угломера цифрового прецизионного (УЦП) на основе чувствительного элемента акселерометра». По результатам изготовления, испытаний и проведенных отработок конструкторской документации прибора УЦП, представленных в том докладе, была проработана возможность разработки малогабаритного цифрового угломера (УЦМ) с характеристиками на уровне лучших мировых образцов. В качестве такой базы для сравнения был взят прибор Zeromatic 2/2, швейцарской фирмы Wyler.

Результаты испытаний приборов УЦП и Zeromatic 2/2. На рис. 1 и 2 приведены результаты испытаний прибора УЦП и Zeromatic 2/2 на основании, не имеющем развязанного фундамента.

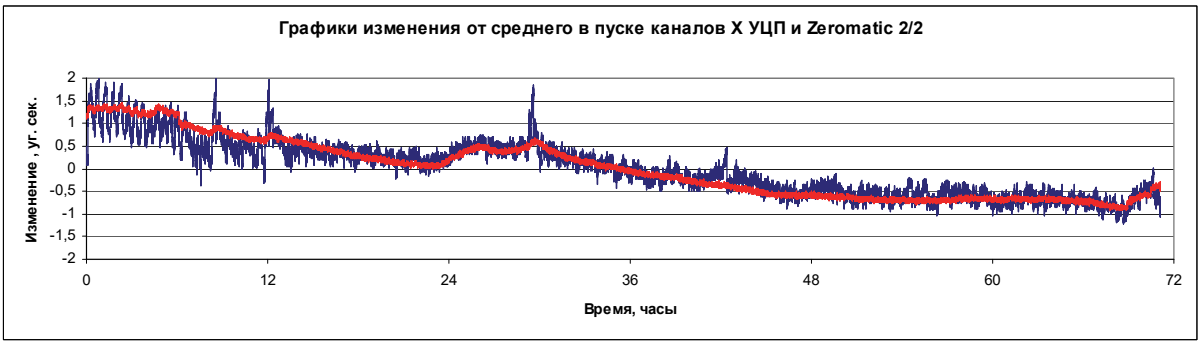


Рис. 1. Графики изменения выходных сигналов каналов X (синий цвет – Zeromatic, красный цвет – УЦП)

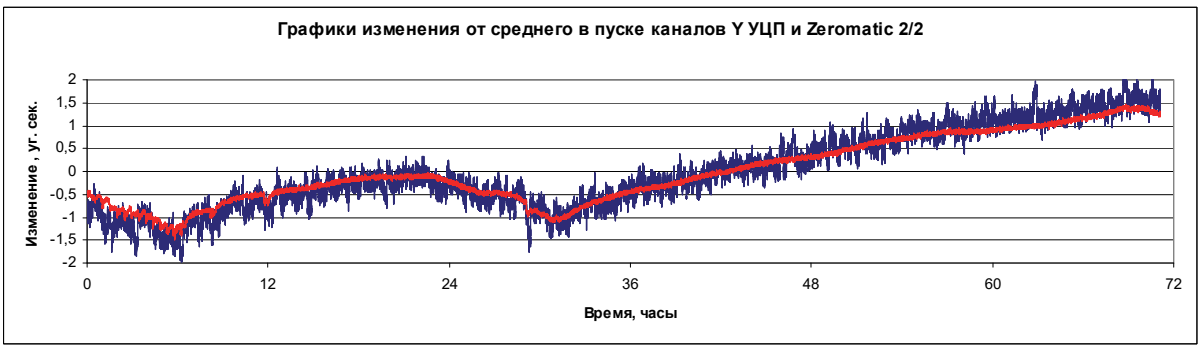


Рис. 2. Графики изменения выходных сигналов каналов Y (синий цвет – Zeromatic, красный цвет – УЦП)

Полученные результаты показали, что канал измерения УЦП не хуже, чем у канала прибора Zeromatic 2/2. В результате была выполнена проработка возможности создания двухкоординатного прибора УЦМ на основе технических решений, отработанных в приборе УЦП.

Результаты разработки макетного образца УЦМ. В докладе представлена структурная схема прибора, описание особенностей его конструкции и методов регулирования и контроля. С целью обеспечения выполнения требований к разрабатываемому прибору введены дополнительные требования по селективному отбору компонентов, входящих в прибор УЦМ. В программном обеспечении предусмотрена алгоритмическая компенсации изменения смещения нуля при изменении температуры окружающей среды.

Результаты испытаний макетного образца УЦМ. В докладе приведены результаты испытаний макетного образца прибора УЦМ. В частности показано, что макетный образец обеспечивает стабильность выходного сигнала на неподвижном основании не хуже 1″ и погрешность измерения угла наклона в диапазоне до 1º не более 2″. На рис. 3 и 4 приведены результаты испытаний макетного образца УЦМ в пуске на развязанном фундаменте.

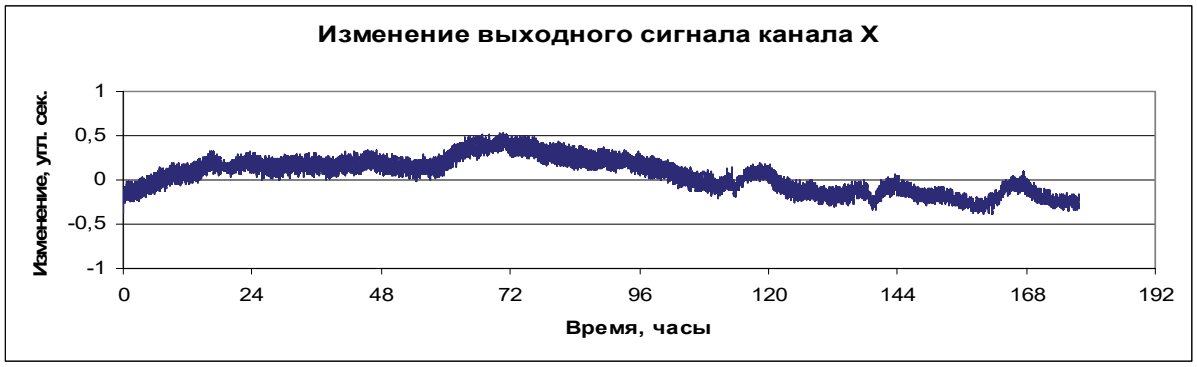


Рис. 3. График изменения выходного сигнала канала X макета УЦМ

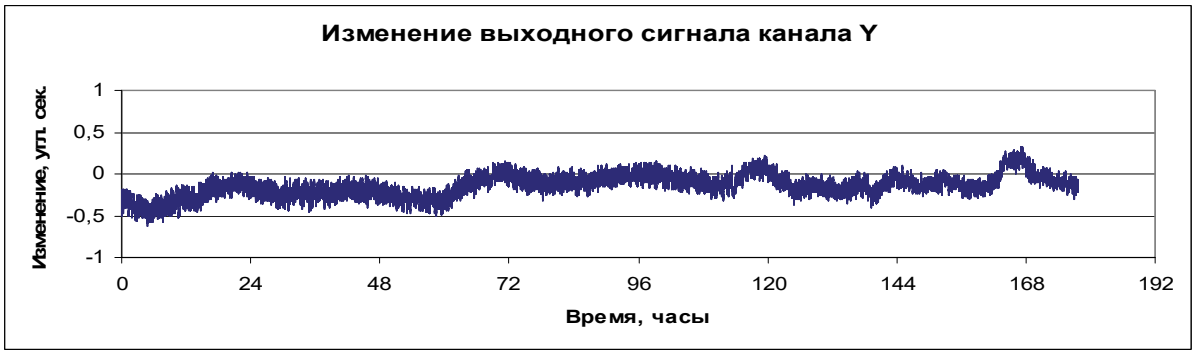


Рис. 4. График изменения выходного сигнала канала Y макета УЦМ

На рис. 5 и 6 показана возможность алгоритмической компенсации изменения выходных сигналов при изменении температуры окружающей среды.

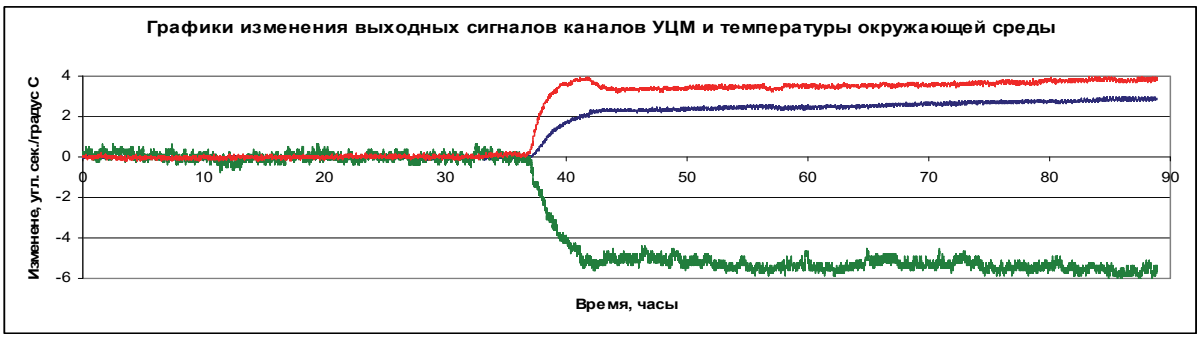


Рис. 5. График изменения выходных сигналов макета УЦМ и температуры окружающей среды (синий цвет – канал X, красный цвет – канал Y, зеленый – температура)

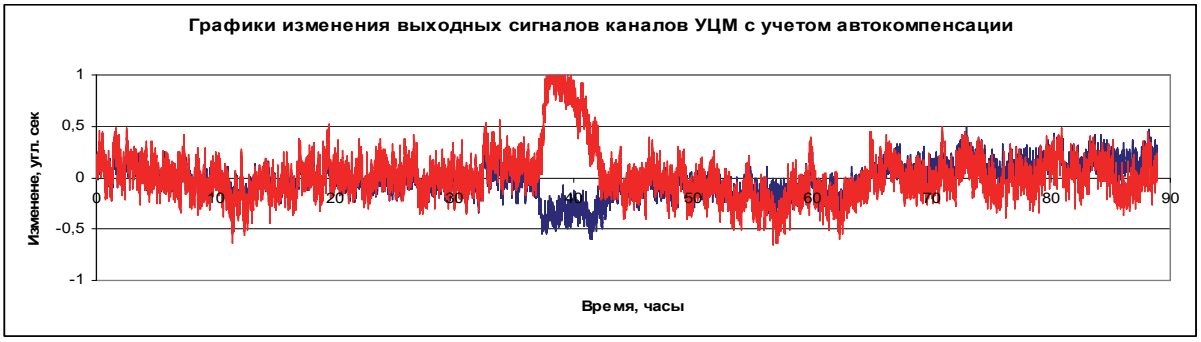


Рис. 6. График изменения выходных сигналов макета УЦМ с учетом компенсации (синий цвет – канал X, красный цвет – канал Y)

Заключение. Результаты разработки и испытаний макетного образца УЦМ показали:

- прибор УЦМ может обеспечить погрешность измерения в диапазоне до 1° не более 2″, что в два раза меньше, чем у прибора Zeromatic 2/2, нестабильность в пуске не более 1″;
- прибор УЦМ может быть использован в качестве импортозамещения лучших иностранных угломеров, например прибора Zeromatic 2/2, при этом следует отметить, что прибор Zeromatic 2/2 во время выполнения уточнения смещения нуля не выдает выходную информацию.

S.A. Volobuev (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg), P.A. Chesnokov (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg)

SMALL-SIZED DIGITAL INCLINATION SENSOR ON FLOATED PENDULUM ACCELEROMETERS

The results of the development and testing of a small-sized digital inclination sensor are considered. The test results suggest that the proposed inclination sensor can show characteristics similar to those of the Zeromatic 2/2 inclination sensor manufactured by Wyler, Switzerland.

A block diagram of the proposed inclination sensor is given. The design features of the device are described. The possibility of using algorithmic compensation for the zero bias change with the temperature variation is discussed. Stability of the output signals in starts on a fixed base is shown. The measurement error is determined.

Д. А. БУРОВ
(АО «ВНИИ «Сигнал», Ковров)

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ БЛОКА ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВИБРАЦИИ И УДАРОВ

В докладе рассматривается методика контроля параметров блока чувствительных элементов (БЧЭ), основанная на сравнении параметров угловой ориентации, вырабатываемых с помощью БЧЭ по алгоритмам бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) в режиме «Навигация» и в режиме «Выставка», до, во время и после действия ударов и вибрации на испытательных стендах. Представлены варианты методики как с контролем углового положения БЧЭ на механическом стенде оптическими средствами (теодолит, оптический квадрант) в процессе испытаний, так и без. Рассмотрены особенности обработки результатов измерений. Представлены результаты испытаний БЧЭ на кольцевых лазерных гироскопах (КЛГ) с использованием методики.

Введение. Блок чувствительных элементов является составной частью БИНС, вырабатывающей первичную инерциальную информацию. В процессе производства на заводе-изготовителе и на этапе входного контроля у потребителя качество вырабатываемой первичной инерциальной информации БЧЭ БИНС на базе кольцевых лазерных гироскопов подтверждается контролем таких параметров, как:

- линейность масштабных коэффициентов КЛГ;
- дрейф нулевых сигналов КЛГ;
- случайный дрейф (шум) сигналов КЛГ;
- воспроизводимость нулевых сигналов КЛГ от запуска к запуску:
- температурный дрейф сигналов КЛГ;
- смещение нулевых сигналов акселерометров;
- дрейф нулевых сигналов акселерометров;
- температурный дрейф сигналов акселерометров.

При эксплуатации БИНС в составе наземных подвижных объектов важным является обеспечение параметров БЧЭ в условиях воздействия вибрации и ударов. Вибрационная ошибка [1] является одним из факторов снижения точности работы БЧЭ на базе КЛГ в реальных условиях эксплуатации.

Однако непосредственный замер перечисленных выше параметров, по которым проводится оценка качества функционирования БЧЭ, в условиях воздействия вибрации и ударов сталкивается со значительными трудностями из-за существенного увеличения шумов в измерительных сигналах БЧЭ, а также зачастую из-за отсутствия оборудования, способного вырабатывать необходимые тестовые воздействия с наложением вибрации и ударов. В результате увеличения шумов параметры, по которым проводится непосредственный контроль БЧЭ (например, дрейф нулевых сигналов КЛГ, дрейф нулевых сигналов акселерометров), становятся трудноопределимыми с необходимой точностью из-за сложности выделения полезных сигналов чувствительных элементов [2].

Выходом из положения является косвенная оценка параметров БЧЭ по выходным данным алгоритмов функционирования БИНС [3].

Для этого при оценке вибрационной и ударной погрешности БЧЭ применяются требования по назначению БЧЭ в составе БИНС:

- погрешность определения азимута, выработанного БЧЭ, функционирующим по алгоритмам БИНС в режиме «Выставка»;
- значение изменения угловых параметров, выработанных БЧЭ, функционирующим по алгоритмам БИНС в режиме «Навигация», за заданное время работы.

Сам по себе контроль качества функционирования БИНС по выходным параметрам угловой ориентации, в том числе при действии ударов и вибраций, известен. В результате калибровки БИНС вырабатывает абсолютные значения параметров ориентации, изменение которых во

времени (уход) вызвано либо погрешностями задания значений начальных параметров, либо погрешностями калибровки, либо погрешностями работы чувствительных элементов. Инструментальными и методическими средствами погрешности задания значений начальных параметров, погрешности калибровки сводят к необходимому минимуму.

Изменение параметров ориентации, вырабатываемых БИНС на неподвижном основании, от действия оставшихся факторов регламентировано и определяет точность работы БИНС. Соответственно, оценка качества функционирования БИНС при механических воздействиях может проводиться по абсолютным значениям вырабатываемых параметров ориентации, изменение которых во времени при действии ударов и вибраций должно оставаться в заданных пределах.

В отличие от БИНС указанный подход для БЧЭ не применим, ввиду того что для БЧЭ неизвестны параметры модели погрешностей, т.к. отдельно калибровка БЧЭ на стадии производства не проводится. В результате выработка параметров угловой ориентации с помощью БЧЭ по алгоритмам БИНС будет проводиться с погрешностью (уходом во времени) из-за наличия смещений нулевых сигналов КЛГ и акселерометров, погрешностей масштабных коэффициентов и неортогональности измерительных осей чувствительных элементов. Априори значение ухода параметров угловой ориентации, вырабатываемых с помощью БЧЭ, неизвестно.

В таких условиях предположением для построения методики контроля является то, что при выработке параметров угловой ориентации с помощью БЧЭ, для которого неизвестна модель погрешностей, уход параметров угловой ориентации в результате действия неизвестной модели погрешностей (включающей смещения нулевых сигналов, погрешности масштабных коэффициентов, неортогональности измерительных осей чувствительных элементов) будет носить систематический характер с точностью до погрешностей работы чувствительных элементов. В докладе рассматривается методика косвенного контроля параметров БЧЭ для указанного случая.

Методика контроля параметров БЧЭ по угловым параметрам ориентации. При контроле БЧЭ располагается в приспособлении, которое закрепляют на столе испытательного стенда. Закрепление БЧЭ при дальнейших испытаниях не меняется. БЧЭ подключается к автоматизированному стенду контроля (АСК) на базе ПЭВМ. Первым циклом испытаний является получение значений угловых параметров ориентации, вырабатываемых по алгоритмам БИНС, до механического воздействия.

В процессе измерений до механического воздействия в течение первого заданного отрезка времени проводится регистрация усредненных данных гироскопов и данных акселерометров БЧЭ в режиме «Выставка». После истечения первого отрезка времени БЧЭ переключается на выдачу данных в режиме «Навигация», и происходит регистрация данных гироскопов и акселерометров в течение второго заданного отрезка времени.

При расчете параметров ориентации, вырабатываемых по алгоритмам БИНС, параметры модели погрешностей БЧЭ (смещения нулевых сигналов, погрешности масштабных коэффициентов, неортогональности измерительных осей чувствительных элементов) принимаются равными нулю. В ходе последовательно выполняемых выставок до механического воздействия в течение первого заданного отрезка времени определяются значения азимута $A1_i$, продольного $B1_i$ и поперечного $\Psi 1_i$ наклонов БЧЭ в режиме «Выставка» по алгоритмам БИНС в текущем положении. В результате использования нулевой модели погрешностей значения азимута $A1_i$, продольного $B1_i$ и поперечного $\Psi 1_i$ наклонов определяются с систематическими погрешностями. Критерием соответствия БЧЭ заданным требованиям является норма отклонений значений азимута $A1_i$, продольного $B1_i$ и поперечного $\Psi 1_i$ наклонов от их средних значений $A1$, $B1$ и $\Psi 1$.

На втором отрезке времени с использованием средних значений азимута $A1$, продольного $B1$ и поперечного $\Psi 1$ наклонов БЧЭ в качестве начальных значений параметров ориентации в режиме «Навигация» по алгоритмам БИНС рассчитываются угловые параметры ориентации по азимуту $\alpha 1$, продольному $\beta 1$ и поперечному $\psi 1$ наклонам до механического воздействия. Данные об углах ориентации $\alpha 1$, $\beta 1$ и $\psi 1$ сохраняются в памяти АСК для последующей обработки. В конце цикла испытаний для справки фиксируются изменения (абсолютные уходы) $\Delta\alpha 1$, $\Delta\beta 1$, $\Delta\psi 1$ углов ориентации по азимуту, продольному и поперечному наклонам до механического воздействия. В виду неизвестной модели погрешностей абсолютные значения величин уходов $\Delta\alpha 1$, $\Delta\beta 1$, $\Delta\psi 1$ БЧЭ в цикле испытаний не нормируются.

Следующим циклом испытаний является замер уходов БЧЭ во время механических воздействий на работающем стенде в соответствии с заданными параметрами испытаний.

Во время механического воздействия БЧЭ переключается на выдачу данных в режиме «Навигация», и производится регистрация данных гироскопов и акселерометров в течение заданного отрезка времени. В режиме «Навигация» по алгоритмам БИНС с использованием нулевой модели погрешностей рассчитываются углы ориентации по азимуту $\alpha 2$, продольному $\beta 2$ и поперечному $\psi 2$ наклонам во время механического воздействия. Для обеспечения последующих расчетов начальные значения параметров ориентации $\alpha 2$, $\beta 2$ и $\psi 2$, вырабатываемых в цикле испытаний, привязываются к средним значениям азимута $A1$, продольного $B1$ и поперечного $\Psi 1$ наклонов, определенных по результатам замеров до механического воздействия. Данные об углах ориентации $\alpha 2$, $\beta 2$ и $\psi 2$ сохраняются в памяти АСК для последующей обработки. В конце цикла испытаний для справки фиксируются изменения (абсолютные уходы) $\Delta\alpha 2$, $\Delta\beta 2$, $\Delta\psi 2$ углов ориентации. Абсолютные значения величин уходов $\Delta\alpha 2$, $\Delta\beta 2$, $\Delta\psi 2$ БЧЭ не нормируются.

В последнем цикле испытаний проводятся измерения после механического воздействия.

В течение первого заданного отрезка времени проводится регистрация усредненных данных гироскопов и данных акселерометров БЧЭ в режиме «Выставка». После завершения первого заданного отрезка времени БЧЭ переключается на выдачу данных в режиме «Навигация», и производится регистрация данных гироскопов и акселерометров в течение второго заданного промежутка времени.

Параметры модели погрешностей БЧЭ принимаются равными нулю и в течение первого заданного отрезка времени определяются значения азимута $A2_i$, продольного $B2_i$ и поперечного $\Psi 2_i$ наклонов БЧЭ в режиме «Выставка» по алгоритмам БИНС в текущем положении. Ввиду неизвестной модели погрешностей БЧЭ значения азимута $A2_i$, продольного $B2_i$ и поперечного $\Psi 2_i$ наклонов определяются с систематическими погрешностями. Критерием соответствия БЧЭ заданным требованиям является норма отклонений значений азимута $A2_i$, продольного $B2_i$ и поперечного $\Psi 2_i$ наклонов от их средних значений $A2$, $B2$ и $\Psi 2$ в положении стола стенда после механического воздействия.

В режиме «Навигация» по алгоритмам БИНС в течение второго заданного промежутка времени рассчитываются углы ориентации по азимуту $\alpha 3$, продольному $\beta 3$ и поперечному $\psi 3$ углам наклона после механического воздействия. Начальные значения параметров ориентации $\alpha 3$, $\beta 3$ и $\psi 3$, вырабатываемых в цикле испытаний, привязываются к средним значениям азимута $A1$, продольного $B1$ и поперечного $\Psi 1$ наклонов, определенных по результатам замеров до механического воздействия. Данные об углах ориентации $\alpha 3$, $\beta 3$ и $\psi 3$ сохраняются в памяти АСК. В конце цикла испытаний для справки фиксируются изменения (абсолютные уходы) $\Delta\alpha 3$, $\Delta\beta 3$, $\Delta\psi 3$ углов ориентации. Абсолютные значения величин уходов $\Delta\alpha 3$, $\Delta\beta 3$, $\Delta\psi 3$ не нормируются.

Окончательная обработка результатов выработки углов ориентации в режиме «Навигация» проводится по относительным измерениям. Графики изменения углов азимута $\alpha 1$, продольного $\beta 1$ и поперечного $\psi 1$ наклонов до механического воздействия принимаются за эталон. Значения угловых параметров ориентации $\alpha 1$, $\beta 1$ и $\psi 1$ до механического воздействия сравниваются с соответствующими значениями угловых параметров ориентации во время $\alpha 2$, $\beta 2$ и $\psi 2$ и после $\alpha 3$, $\beta 3$ и $\psi 3$ механического воздействия. Для этого определяются графики сравнения как разница между точками соответствующих параметров (азимут, продольный угол наклона, поперечный угол наклона) в одинаковые моменты времени с начала расчета до и во время, до и после механического воздействия. Характеристики БЧЭ соответствует заданным требованиям, если значения графиков сравнения до и во время, до и после механического воздействия по углам азимута, продольного и поперечного наклонов, взятые по модулю, не превышают значения задаваемой при контроле функции $\Delta=f(\omega,t)$, где ω – заданная скорость ухода угловых параметров, t – момент времени с начала расчета изменения углов ориентации. В простейшем случае для малых временных интервалов $\Delta=f(\omega,t)$ – линейная функция.

Улучшение методики контроля БЧЭ с использованием оптических средств измерений. Характер движения стола стенда при создании внешнего механического воздействия условно можно разделить на две составляющие – это полезные управляемые линейные перемещения и вредные случайные или периодические малые угловые колебания, совершаемые относительно линейных перемещений. В результате после окончания механического воздействия стол стенда может занять

новое произвольное угловое положение в пределах амплитуды малых угловых колебаний как в азимуте, так и по углам наклонов по отношению к исходному положению до начала испытаний.

Рассмотренная выше методика является простейшим вариантом измерений, в котором полагается, что малые угловые колебания стола стенда при создании линейных перемещений испытываемого объекта ограничены конструктивными особенностями стенда. В результате изменение углового положения стола стенда после завершения механических воздействий не превышает определенных нормированных значений и составляет малые угловые величины, влиянием которых на изменение систематического ухода угловых параметров ориентации в режиме «Навигация» по отношению к замеру до начала механического воздействия на малых временных интервалах можно пренебречь. Влияние изменения углового положения стола стенда на сравнение значений угловых параметров ориентации до и во время, до и после механического воздействия устраняется тем, что начальные значения параметров ориентации в режиме «Навигация» привязываются к одному и тому же начальному значению – к средним значениям азимута, продольного и поперечного наклонов, определенных по результатам замеров в режиме «Выставка» до механического воздействия.

Так как угловые колебания стола стенда при совершении линейных перемещений имеют случайный или периодический характер, то в режиме «Навигация» за счет операций интегрирования в алгоритмах выработки параметров ориентации такие движения эффективно усредняются и не оказывают влияния на систематический уход, возникающий от изменения параметров чувствительных элементов (гироскопов и акселерометров) и подлежащий косвенному контролю, но приводят к увеличению шума выработки параметров ориентации в процессе испытаний. Дополнительные эффекты уходов параметров ориентации, например таких как влияние конических движений, size-эффект и т.д., рассматриваются как погрешность ухода, подлежащая контролю.

Основным инструментом косвенной оценки качества работы БЧЭ в условиях ударов и вибраций в рассмотренной выше методике контроля является уход угловых параметров ориентации в режиме «Навигация». С помощью ухода угловых параметров ориентации в режиме «Навигация» в условиях воздействия ударов и вибраций косвенно контролируются как изменение параметров БЧЭ в запуске, так и изменение систематических составляющих параметров от запуска к запуску. Дополнительным критерием оценки параметров БЧЭ является величина разброса значений параметров ориентации (азимут, продольный и поперечный углы наклонов) в режиме «Выставка» при неподвижном столе стенда до и после механического воздействия, которым в основном контролируется увеличение случайных (шумовых) составляющих погрешностей чувствительных элементов в запуске в результате механического воздействия. Как можно заметить, в результате возможности изменения пространственной ориентации БЧЭ после механических воздействий в простейшей методике не используется возможность дополнительного косвенного контроля изменения систематических составляющих параметров БЧЭ от запуска к запуску в результате механических воздействий с использованием контроля изменения азимута и углов наклонов до и после ударов и вибраций в режиме «Выставка».

Такой контроль возможен в усовершенствованной методике, в которой применяется непосредственное измерение изменения пространственной ориентации БЧЭ с помощью оптических средств. В качестве средств измерений могут применяться теодолит для измерения изменения положения БЧЭ в азимуте и оптический квадрант для измерения изменения положения БЧЭ по углам наклонов. Для организации измерений в состав приспособления АСК вводятся оптический элемент – контрольное зеркало и опорные площадки для установки квадранта вдоль продольной и поперечной осей БЧЭ. При испытаниях до воздействия ударов и вибрации с помощью теодолита и оптического элемента в режиме автоколлимации фиксируется положение БЧЭ по азимуту, а с помощью оптического квадранта – значения продольного и поперечного углов наклонов БЧЭ. После воздействия ударов и вибрации в режиме автоколлимации фиксируется изменение ориентации относительно зафиксированного положения БЧЭ в азимуте, а квадрантом – изменение углов наклонов. Измеренные изменения углов ориентации сохраняются в памяти АСК. Полученная матрица изменений углов ориентации используется при сравнении параметров угловой ориентации, вырабатываемых БЧЭ в режиме «Выставка», до и после воздействия ударов и вибрации, чем обеспечивается дополнительный косвенный контроль изменения систематических составляющих параметров БЧЭ от запуска к запуску в результате механических воздействий.

В режиме «Навигация» полученная матрица изменений углов ориентации используется для повышения точности сравнения уходов параметров угловой ориентации БЧЭ во время испытаний. Для этого в первом цикле испытаний параллельно с основными вычислениями проводится усеченная калибровка БЧЭ в текущей пространственной ориентации стола стенда в одном положении. В условиях неподвижного стола стенда фиксируются средние значения уходов параметров ориентации, которые сохраняются в памяти АСК, и в дальнейшем при обработке результатов испытаний через модель ошибок БЧЭ используются при расчете угловых параметров в режиме «Навигация» до и во время механического воздействия. После получения матрицы изменений углов ориентации стола стенда после завершения механического воздействия средние значения уходов, полученные до механического воздействия, через матрицу переводятся к текущему положению БЧЭ после механического воздействия. В результате погрешность сравнения уходов угловых параметров до и после вибрации и ударов из-за изменения уходов параметров ориентации в результате изменения пространственного положения стенда уменьшается.

Результаты испытаний. В таблице представлены результаты испытаний БЧЭ при воздействии вибрации по упрощенной методике. До механического воздействия в условиях неподвижного стола стенда контролируется разброс параметров ориентации в режиме «Выставка» и фиксируется уход в режиме «Навигация». Далее во время и после механического воздействия контролируется изменение ухода в режиме «Навигация» по отношению к уходу до механического воздействия. После механического воздействия в условиях неподвижного стола стенда повторно контролируется разброс параметров ориентации в режиме «Выставка». На рис. 1–3 графически показаны результаты замеров и обработки изменения параметров ориентации при испытаниях в режиме «Навигация». На графиках рис. 2 видно, что из-за наличия значительных шумов измерений в начальный момент времени контрольная функция (зеленая линия) перекрывается данными БЧЭ. Для уменьшения влияния шумов измерений на процесс контроля применяется дополнительная фильтрация данных, показанная на рис. 3. Процесс контроля (сравнение модуля величин параметров ориентации с уровнем контрольной функции) начинается в момент времени *nt*, на рис. 3 обозначенный вертикальной пунктирной линией, который выбирается из условия завершения переходного процесса фильтра и непревышения уровня шума вырабатываемых параметров ориентации уровня контрольной функции. На графиках рис. 4–5 показан пример несоответствия БЧЭ заданным требованиям при воздействии вибрации.

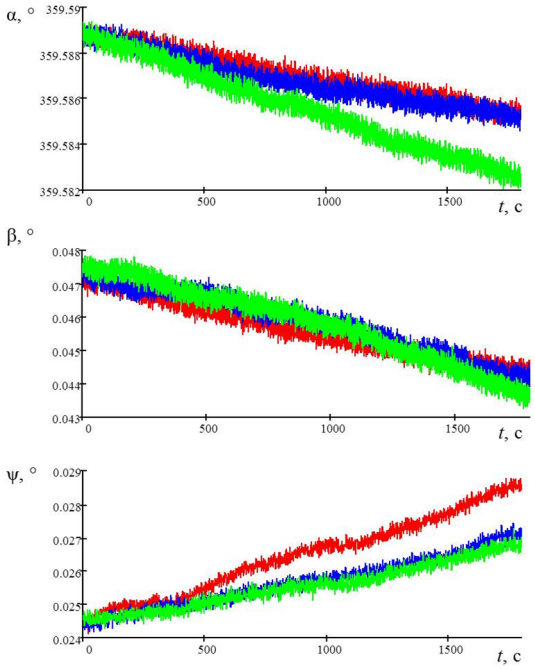


Рис. 1. Результаты замеров изменения угловых параметров ориентации в режиме «Навигация» в первом цикле испытаний до (красная кривая), во втором цикле испытаний во время (синяя кривая) и в третьем цикле испытаний после (зеленая кривая) воздействия вибрации

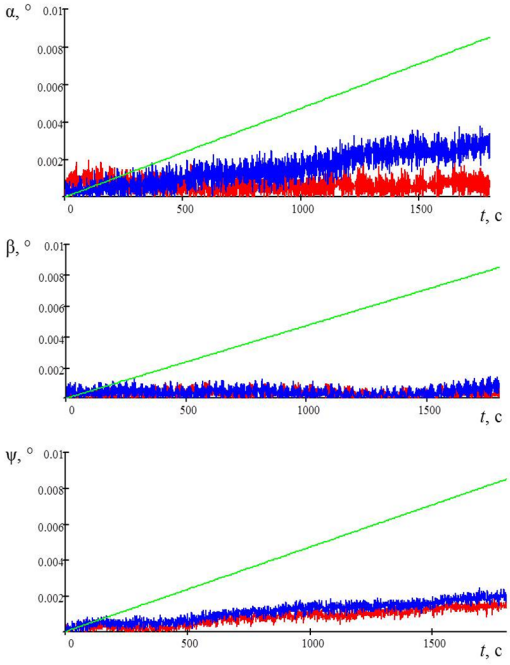


Рис. 2. Результаты построения графиков сравнения до и во время (красная кривая), до и после (синяя кривая) воздействия вибрации; задаваемая при контроле функция (зеленая кривая)

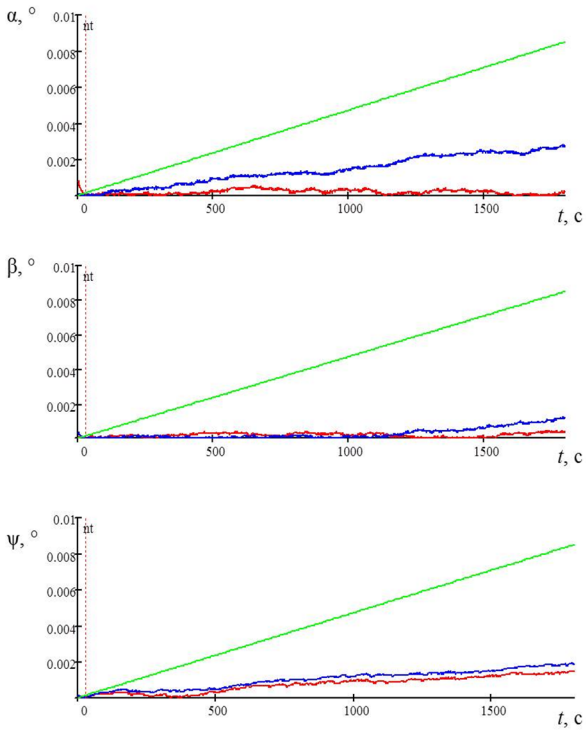


Рис. 3. Графики сравнения после фильтрации; *nt* – момент начала контроля

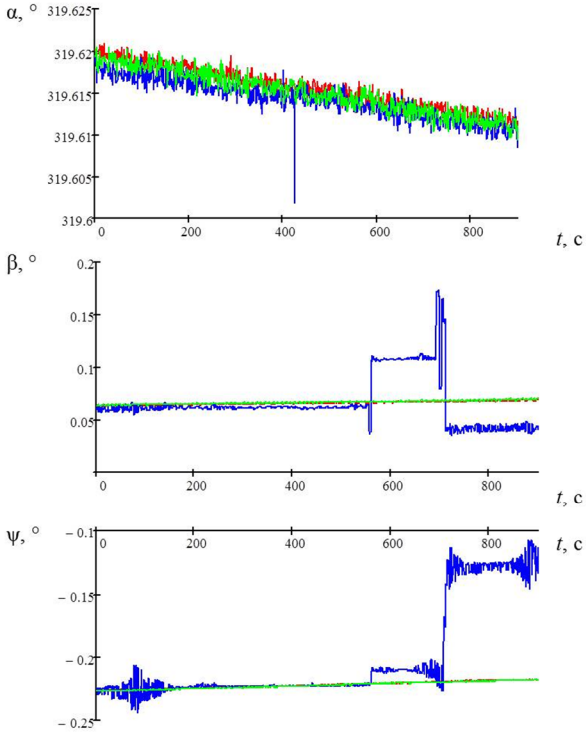


Рис. 4. Результаты замеров изменения угловых параметров ориентации в режиме «Навигация» при не штатном функционировании БЧЭ во время вибрации

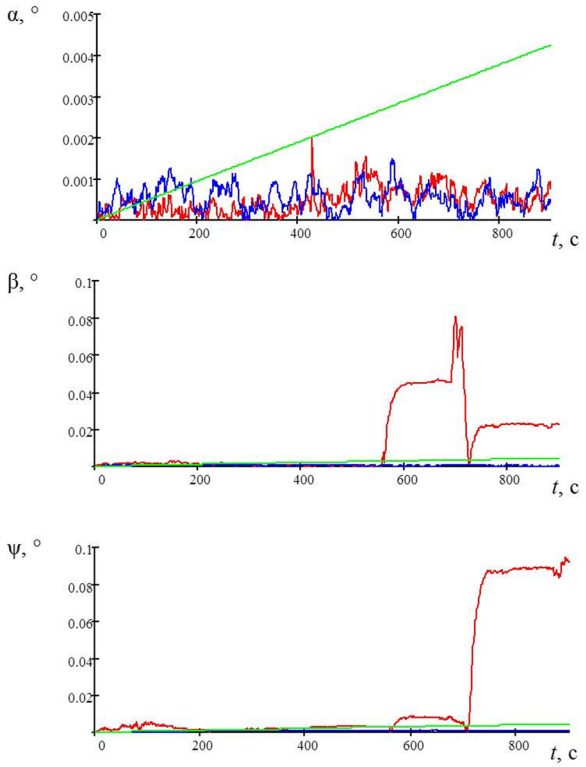


Рис. 5. Результаты построения графиков сравнения до и во время (красная кривая), до и после (синяя кривая) воздействия вибрации (задаваемая при контроле функция – зеленая кривая) при не штатном функционировании БЧЭ во время вибрации

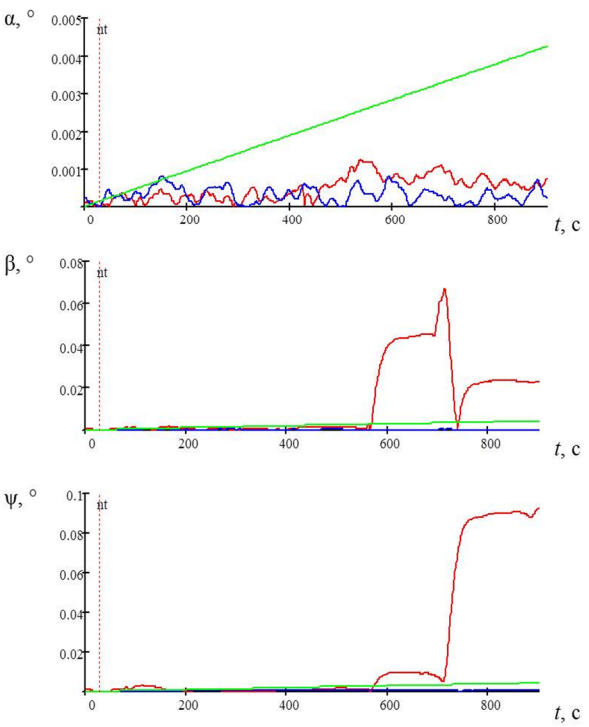


Рис. 6. Графики сравнения после фильтрации при не штатном функционировании БЧЭ во время вибрации; nt – момент начала контроля

Таблица

Результаты испытаний на устойчивость к вибрации

До механического воздействия:

Замер «Выставка»	Азимут [д.у.]	Прод. наклон [д.у.]	Попер. наклон [д.у.]	dA [д.у.]
Выставка 1	5993,19	0,78	0,40	0,05
Выставка 2	5993,14	0,78	0,41	0,00
Выставка 3	5993,10	0,78	0,41	0,04

A1 среднее = 5993,14 д.у.

Замер «Навигация»	Азимут [д.у.]	Прод. наклон [д.у.]	Попер. наклон [д.у.]
Углы Н	5993,14	0,78	0,41
Углы К	5993,08	0,75	0,48
Изменение	-0,06	-0,04	0,07

Во время механического воздействия:

Замер «Навигация»	Азимут [д.у.]	Прод. наклон [д.у.]	Попер. наклон [д.у.]
Углы Н	5993,14	0,78	0,41
Углы К	5993,07	0,73	0,45
Изменение	-0,07	-0,05	0,05

После механического воздействия:

Замер «Выставка»	Азимут [д.у.]	Прод. наклон [д.у.]	Попер. наклон [д.у.]	dA[д.у.]
Выставка 4	5993,44	0,79	0,42	0,44
Выставка 5	5992,77	0,79	0,42	0,23
Выставка 6	5992,79	0,79	0,42	0,21

A2 среднее = 5993,00 д.у.

Замер «Навигация»	Азимут [д.у.]	Прод. наклон [д.у.]	Попер. наклон [д.у.]
Углы Н	5993,14	0,79	0,42
Углы К	5993,04	0,72	0,46
Изменение	-0,10	-0,06	0,04

* 1 деление угломера (д.у.) = 0,06°

Заключение. В условиях воздействия вибрации и ударов на испытательных стендах из-за существенного увеличения шумов в измерительных сигналах БЧЭ параметры, по которым проводится непосредственный контроль (например, дрейф нулевых сигналов КЛГ, дрейф нулевых сигналов акселерометров), становятся практически неопределимыми с необходимой точностью. В этом случае возможна косвенная оценка параметров БЧЭ по выходным данным алгоритмов функционирования БИНС. В рассмотренной методике контроля вибрационной и ударной погрешности БЧЭ используются требования по назначению БЧЭ в составе БИНС:

- погрешность определения азимута, выработанного БЧЭ, функционирующим по алгоритмам БИНС в режиме «Выставка»;
- значение изменения угловых параметров, выработанных БЧЭ, функционирующим по алгоритмам БИНС в режиме «Навигация», за заданное время работы.

Испытания по представленной методике показали ее работоспособность. Применение непосредственного измерения изменения пространственной ориентации БЧЭ после механического воздействия на стенде с помощью теодолита и оптического квадранта позволяет дополнить контроль проверкой изменения систематических составляющих параметров БЧЭ от запуска к запуску в результате механического воздействия в режиме «Выставка», а также повысить точность контроля параметров угловой ориентации БЧЭ во время испытаний в режиме «Навигация».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Грушин М.Е., Колбас Ю.Ю.** Вибрационная ошибка лазерных гироскопов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 4. С. 27–42.
2. **Николаев С.Г., Ившина Ю.В.** Калибровка бесплатформенных инерциальных навигационных систем по выходным сигналам модели ошибок // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2014. № 4. С. 95–105.
3. **Николаев С.Г., Ившина Ю.В.** Идентификация инструментальных погрешностей волоконно-оптических гироскопов бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Прикладная фотоника. 2014. № 2. С. 84–98.

D.A. Burov («All-Russian Scientific Research Institute «Signal» Joint Stock Company (AO «VNII «Signal»), Kovrov)

CHECKING PARAMETERS OF SINS INERTIAL MEASUREMENT UNITS UNDER VIBRATION AND SHOCK

The paper presents the technique of IMU parameters indirect check based on the above-mentioned assumption. This technique is characterized by the use of angular orientation parameters generated by IMU before, after and in the course of vibration and shock effect. The application of this technique leads to highlighting of data on drift and angular orientation parameters change before, after and in the course of mechanical effects. There are versions of this technique that include or do not include the check of IMU angular position on test benches performed during tests using optical instruments (a theodolite, an optic quadrant). Features of the processing of the measurement results are considered. The paper also presents the results of tests of RLG-based IMU on test benches.

Секция 2

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И ИНТЕГРИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ

Е. Г. ХАРИН, И. А. КОПЫЛОВ, В. А. КОПЕЛОВИЧ, А. Ю. МАКАРОВА
(АО «Летно-исследовательский институт имени М.М. Громова», г. Жуковский)

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Пилотажно-навигационное оборудование современных летательных аппаратов включает в себя инерциальную навигационную систем (ИНС). Предъявляемые требования к ИНС по точности определения навигационных параметров различны для различных типов летательных аппаратов. Необходимый этап отработки ИНС является этап летных испытаний. В докладе приводятся результаты летных испытаний как предварительных, так и в составе пилотажно-навигационного оборудования летательного аппарата отечественных инерциальных навигационных систем различного класса точности.

Введение. Инерциальные навигационные системы входят в состав пилотажно-навигационного комплекса всех современных летательных аппаратов. На борт летательного аппарата устанавливаются системы, удовлетворяющие всем заданным на систему требованиям. Этап летных испытаний – один из основных этапов оценивания ИНС. В АО «Летно-исследовательский институт имени М.М. Громова» разработана технология летных испытаний ИНС [1], которая применялась для оценивания отечественных систем БИНС-Т, БИНС-СП-1, ИНС-2000, ЛИНС-100РС, и др. Результаты летных испытаний перечисленных систем представлены в материалах XXX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова [2]. В предлагаемом докладе приводятся результаты летных испытаний других инерциальных систем отечественных разработчиков, проведенных в последние годы специалистами ЛИИ им. М.М. Громова.

Оценка работы БИНС2М-В в летных испытаниях. Бесплатформенная инерциальная навигационная система БИНС2М-В производится ООО «Научно-производственный комплекс «Электрооптика», г. Москва. Для проведения предварительных летных испытаний системы в 2019 году на летающей лаборатории Ту-154М были установлены три комплекта БИНС2М-В. Регистрация параметров систем во время полетов производилась комплексом бортовых траекторных измерений (КБТИ), в который встроен приемник СНС. Погрешности

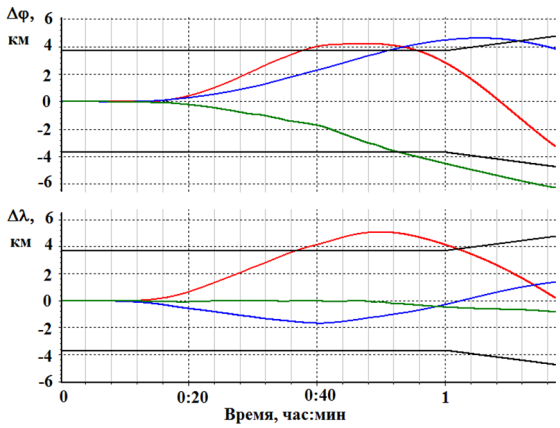


Рис. 1. Погрешности координат систем БИНС2М-В

координат, проекций путевой скорости, истинного курса, крена и тангажа БИНС2М-В вычислялись с помощью программных комплексов «Анализ» и «Эталон», разработанных в ЛИИ им. М.М. Громова. Количество выполненных полетов не дает возможность набрать статистический материал в необходимом объеме для проведения оценивания. Погрешности навигационных параметров системы вычислялись по материалам каждого из четырех выполненных полетов. Длительность полетов составляла от 1 до 1,3 часа. На рис. 1 изображены погрешности координат каждой из трех БИНС2М-В в одном из полетов. Черным цветом на рис. 1 нанесены линии, соответствующие нарастанию погрешности со скоростью 3,7 км за час полета. Погрешности по северной и восточной составляющим вектора скорости во всех полетах не превышали 5 м/с, погрешности по истинному курсу были меньше 16 угл. мин.

Летные испытания инерциальной курсовертикали СНВ-1. В 2017 году предварительные испытания проходила инерциальная курсовертикаль СНВ-1 на летающей лаборатории на базе вертолета Ми-8. Разработчик курсовертикали – АО «Инерциальные технологии «Технокомплекса», г. Раменское. Макетный образец системы был установлен в грузовой кабине автономно, без связи со штатным оборудованием вертолета. В качестве регистрирующей аппаратуры в процессе проведения летных испытаний использовался КБТИ, который служил также как средство получения действительных значений координат и составляющих путевой скорости. Для определения значений углов истинного курса, крена и тангажа, принимаемых при оценивании за действительные, на борт вертолета была установлена инерциальная навигационная система KN-4072A. Всего выполнено два полета длительности порядка 1 часа. Полеты проходили в экспериментальной зоне аэродрома на высоте порядка 2000 м с приборной скоростью до 130 км/ч. После обработки материалов летных испытаний получены следующие результаты. Погрешности координат в первом полете не превышали 4 км (рис. 2), во втором – 10 км. Максимальные абсолютные значения погрешности по скорости составили 7,8 м/с. Погрешности по истинному курсу не превышали 40 угл. мин., крену и тангажу – 6 угл. мин.

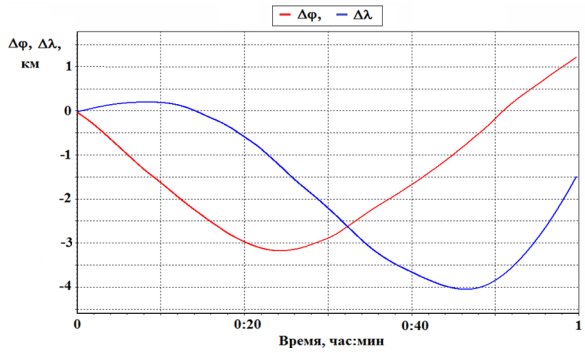


Рис. 2. Погрешности координат курсовертикали СНВ-1

Оценивание характеристик БИНС-СП-2. Бесплатформенная инерциальная навигационная система БИНС-СП-2 проходила подтверждение своих технических характеристик в составе пилотажно-навигационного оборудования российского маневренного самолета. Система серийно производится концерном «Радиоэлектронные технологии» в Московском институте электромеханики и автоматики. Информация бортовых систем, включая БИНС-СП-2, регистрировалась в КБТИ. Обработка материалов летных испытаний производилась с помощью программных комплексов «Анализ» и «Эталон». По результатам 9 полетов длительности от 0,9 до 2,2 часа погрешности системы в определении широты и долготы текущего местоположения изменялись менее чем 1,85 км за час полета. На рис. 3 изображено поведение погрешностей координат системы и показано, что их значения не выходят за установленные пределы. Погрешности БИНС-СП-2 в определении горизонтальных составляющих путевой скорости в основном находились в пределах ±1 м/с,

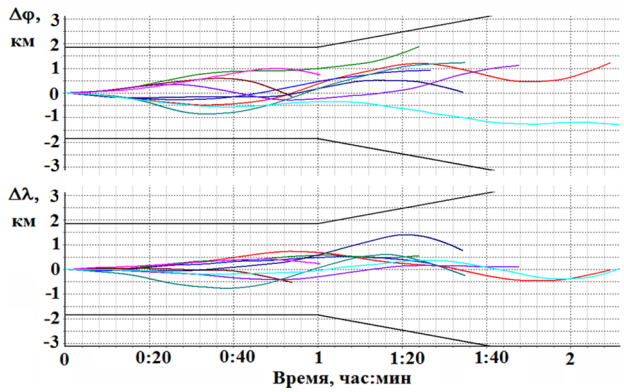


Рис. 3. Погрешности координат БИНС-СП-2 в девяти полетах

что не превышает заданных на систему требований. Система БИНС-СП-2 подтвердила соответствие заданным требованиям и в определении угловых параметров. Максимальные погрешности истинного курса не превышали 7,2 угл. мин., а по крену и тангажу – 1 угл. мин.

Заключение

1. Разработанные технологии, средства и методы в АО «ЛИИ им. М.М. Громова» позволяют производить оценивание характеристик инерциальных навигационных систем в летных испытаниях.

2. Различные отечественные предприятия производят инерциальные навигационные системы, удовлетворяющие заданным на них требованиям по характеристикам и предназначенные для применения на различных типах летательных аппаратов.

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. **Харин Е.Г., Копелович В.А., Копылов И.А., Клабуков Е.В., Макарова А.Ю., Ильин В.Б.** Проведение летных испытаний инерциальных и инерциально-спутниковых навигационных систем // XXX конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016. С. 141–153.

E.G. Kharin, I.A. Kopylov, V.A. Kopelovich, A.Yu. Makarova (SC «M.M. Gromov Flight Research Institute», Zhukovsky)

FLIGHT TEST RESULTS FOR DOMESTIC INERTIAL NAVIGATIONAL SYSTEMS

INS requirements for the determining navigation parameters accuracy are different for different aircraft types. The flight test stage is necessary for INS development. This report includes flight tests results for various accuracy classes domestic inertial navigation systems.

Д. В. ВОЛЫНСКИЙ, А. А. ПАВЛОВ, Р. Я. ВОЛКИНД, Е. И. КОНДРАТЕНКО
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ МАЛОГАБАРИТНОЙ БЕСПЛАТФОРМЕННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ

В АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разработана малогабаритная БИНС морского применения на базе ВОГ собственной разработки с использованием автокомпенсационного вращения блока чувствительных элементов. Проведены испытания БИНС на имитационных стендах и в условиях реальных подводных и надводных объектов. По результатам испытаний изделию присвоена литера О1 и организованно серийное производство.

Введение. Бескарданные инерциальные навигационные системы (БИНС) на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ) составляют основу современного и перспективного бортового навигационного оборудования для подвижных объектов различного назначения. Распространение БИНС на ВОГ обусловлено низкой стоимостью, малыми массой, габаритами и временем готовности, высокой надежностью и низкими эксплуатационными расходами по сравнению с платформенными инерциальными системами.

Мировыми лидерами в области разработки и производства ВОГ, а также БИНС на их основе являются компании Northrop Grumman, IXSEA (IXblue), KVH, Honeywell и некоторые другие. В нашей стране создание прецизионных ВОГ и морских БИНС на их основе является относительно новым направлением. В этой области наибольшим опытом обладают АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ООО НПО «Оптолинк», ПАО ПНППК.

Первым опытом построения инерциальных систем на ВОГ в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (период с 1998 по 2005 г.) стала разработка гировертикалей, систем хранения азимутального направления и гирогоризонткомпасов морского и наземного применения. В качестве чувствительных элементов использовались ВОГ производства ЗАО «Физоптика» и кварцевые акселерометры. В гирогоризонткомпасах на ВОГ была применена схема с непрерывным вращением блока чувствительных элементов (БЧЭ), что позволило существенно повысить точность выработки основных параметров.

С 2007 г. АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» совместно с НИУ ИТМО начало разработку собственного ВОГ класса точности 0,01°/час. В 2011 г. был изготовлен первый образец БИНС на базе собственных ВОГ.

В 2018 г. разработана модификация БИНС с применением схемы автокомпенсационного вращения на базе ВОГ собственной разработки. Для разработки использован ВОГ с диаметром интерферометра 150 мм, что позволило создать БИНС в габаритах, сравнимых с габаритами гирогоризонткомпаса на базе ВОГ производства ЗАО «Физоптика».

Эта разработка получила ряд улучшений по сравнению с первым гирогоризонткомпасом на ВОГ производства ЗАО «Физоптика». В ВОГ реализована обратная связь, что исключает нелинейность выходной характеристики, а также введен ряд технологических новшеств, что в совокупности позволило уменьшить эквивалентный дрейф ВОГ на несколько порядков. Изменена конструкция прибора с сохранением посадочных мест для взаимозаменяемости с уже выпускаемыми приборами. Применены новые электронные компоненты собственного производства с улучшенными характеристиками и большей вычислительной мощностью. Полностью изменены алгоритмы выработки навигационных параметров с применением фильтра Калмана, что позволяет оценивать и учитывать изменение характеристик чувствительных элементов в результате влияния на них различных внешних факторов. Все эти изменения позволили уменьшить погрешность выработки курса более чем в 5 раз, а погрешность выработки качек уменьшить в 2 раза. Также точность ВОГ позволила реализовать инерциальный режим работы с возможностью хранения координат на протяжении длительного интервала времени, что позволяет использовать БИНС в качестве основной навигационной системы навигационных комплексов (НК) различных классов и резервной навигационной системы дизельных подводных лодок.

Испытания проводились в четыре этапа:

- этап 1 – на стендах АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»;
- этап 2 – на автомобильной исследовательской лаборатории (АИЛ);
- этап 3 – на катере;
- этап 4 – на морском подводном объекте.

На каждом из этапов проводилась проверка работы изделия, анализ полученных результатов, доработка алгоритмов работы изделия и программного обеспечения.

На 1 этапе производились стендовые испытания на территории АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Задавались различные параметры качки и рысканья, при этом оценивалась погрешность выработки курса и качек, а также радиальная погрешность выработки координат места. Начальная выставка БИНС производилась в корректируемом режиме при поступлении данных о координатах места и скорости от имитатора лага. После выставки БИНС переводилась в автономный режим (при этом в БИНС поступали только данные о скорости от имитатора лага). Проверка работы БИНС производилась в автономном режиме. В качестве эталона использовались показания стенда и известные координаты места.

На 2 этапе производились испытания БИНС на АИЛ. АИЛ совершала поездки по кольцевой автодороге (КАД), при этом оценивалась радиальная погрешность выработки координат места. Начальная выставка БИНС производилась в корректируемом режиме при поступлении данных о координатах места и скорости от имитатора лага. После выставки БИНС переводилась в автономный режим (при этом в БИНС поступали только данные о скорости от имитатора лага). Проверка работы БИНС производилась в автономном режиме. В качестве эталона использовались данные о координатах места от СНС.

На 3 этапе производились испытания БИНС на катере в акватории Ладожского озера. Во время испытаний оценивалась радиальная погрешность выработки координат места. Запуск БИНС производился в корректируемом режиме при поступлении данных о координатах места и скорости от имитатора лага. После выставки БИНС переводилась в автономный режим (при этом в БИНС поступали только данные о скорости от имитатора лага). Проверка работы БИНС производилась в автономном режиме. В качестве эталона использовались данные о координатах места от СНС.

На 4 этапе проводилась проверка в условиях реального объекта. БИНС была установлена на морской подводный объект. Начальная выставка БИНС проводилась по данным от лага, при однократном поступлении данных о координатах места в момент запуска от НК. После выставки БИНС проводилась разовая коррекция по координатам места от НК, после чего БИНС переводилась в инерциальный режим, при этом в БИНС не поступало внешней информации о координатах места и скорости объекта. В качестве эталона использовались данные о координатах места и курсе объекта от НК.

Результаты испытаний. Результаты проверки работы БИНС показали точности, значительно превышающие требования ТЗ.

Заключение. Проведенные испытания изделия показали, что изделие может вырабатывать полный набор навигационных параметров как при наличии данных о координатах и скорости объекта, так и при полном отсутствии внешних данных, при этом погрешность выработки динамических параметров практически не изменяется, а хранение координат места сохраняется на уровне требований ТЗ на изделие.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии Гироскопия и навигация. 2020. № 2. С. 3–10.
2. **Емельянцев Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016.
3. **Емельянцев Г.И., Блажнов Б.А., Драницына Е.В., Степанов А.П.** О калибровке измерительного модуля прецизионной БИНС и построении связанного с ним ортогонального трехгранника // Гироскопия и навигация. 2016. № 1. С. 36–48.

D.V. Volynskiy, A.A. Pavlov, R.YA. Volkind, E.I. Kondratenko (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg)

TEST RESULTS FOR A MINIATURE STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM BASED ON FIBER OPTIC GYROS

A miniature marine-application SINS was developed at the Concern CSRI Elektropribor, JSC, based on FOG of in-house design, using self-compensating rotation of a sensor unit. SINS was tested on simulation test benches and in conditions of real submarine and surface objects. According to the test results, code O1 is assigned to the article, and batch production is organized.

И. А. ШИПОВ, Е. В. ВЕТОШКИН, А. В. МОРОЗОВ
(АО «ВНИИ «Сигнал», Ковров)

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ НАЗЕМНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Рассмотрена роль навигационного обеспечения наземных робототехнических комплексов. Приведены классификация и типовые решения в условиях современного состояния и научно-технического задела отечественной промышленности по результатам завершенных разработок. Обозначены основные трудности навигационного оснащения наземных современных робототехнических комплексов и перспективные направления их решения.

Введение. Наземные робототехнические комплексы (РТК) как новый класс подвижных объектов задают специфические технические требования к компонентам, входящим в их состав. Для эффективного решения функциональных задач информация о пространственном положении и углах ориентации является ключевой. Предлагаемый доклад посвящен обзору современных подходов к вопросу решения задачи обеспечения наземных объектов интегрированными навигационными системами (ИНС), выбору их элементов, а также перспективным способам повышения технических характеристик.

Структура ИНС. Робототехнические комплексы нашли свое применение в различных областях и могут играть ключевую роль как в решении прикладных бытовых задач, так и в военных и специальных операциях. Исходя из массогабаритных характеристик, можно выделить легкие (до 5 тонн), средние (от 5 до 20 тонн) и тяжелые (от 20 тонн) комплексы. Состав типовой системы навигации и ориентирования наземного подвижного объекта (НПО) представлен на рис. 1.

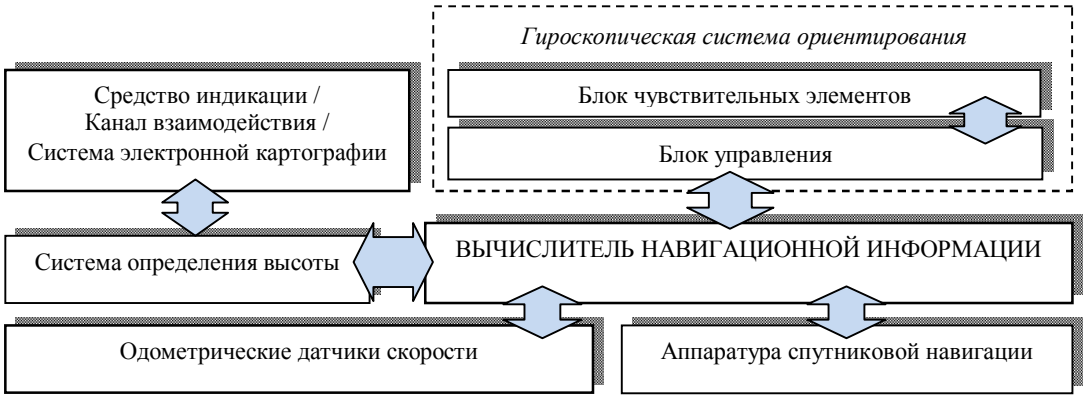


Рис. 1. Типовая структура интегрированной навигационной системы

Система, построенная по данной схеме, как правило, решает следующие основные задачи в составе наземного подвижного объекта:

- автономное определение углов ориентации (курса, крена и тангажа);
- определение глобальных и локальных пространственных координат;
- решение навигационных задача и задач ориентирования на пункты назначения;
- выдача метки времени и другие.

Также навигационные системы, применяемые в современных робототехнических комплексах, можно поделить по принципам функционирования на две группы [1]:

- локальное позиционирование. Подобная схема широко применяется при решении задач в условной системе координат на ограниченных участках местности, с известным контуром;
- глобальная навигация. Необходима для определения позиции робота в любой момент времени при неограниченных маршрутах передвижения.

В то же время навигационные системы в соответствии с их точностными характеристиками можно разделить на несколько классов, а именно: высокоточные системы, среднего и низкого классов точности. Для эффективного решения задач наземных РТК требуется, по опыту проведенных разработок [2], исходный дирекционный угол с погрешностью не хуже 0,18º. Класс точности системы определяется характеристиками применяемой в ней гироскопической системы ориентирования. В современных ИНС в качестве гироскопических систем ориентирования применяются бесплатформенные гироскопические системы ориентирования (ГСО) на базе электрооптических датчиков.

В перспективных СНО для РТК дополнительно применяется различные датчики «технического зрения». Однако при этом информация, вырабатываемая ГСО, является первичной и обладает наивысшим приоритетом, поскольку при выходе из строя датчиков «технического зрения» все равно позволяет обеспечивать автономную навигацию РТК.

Для обеспечения эффективного комплексирования со всеми вышеуказанными источниками дополнительной информации ключевую роль играют вычислительные мощности ИНС, которые, в свою очередь, обусловлены высокой степенью интеллектуальности программно-алгоритмических решений.

В расширенный состав системы навигации и ориентирования для РТК могут входить гироскопическая система ориентирования, датчики линейной скорости, аппаратура спутниковой навигации, система определения высоты, система автоматизации движения, дальномеры, стереоскопические системы и RTK-навигация (кинематика реального времени).

Также в типовой состав современных РТК входит целый ряд устройств и датчиков, вырабатывающих информацию, использование которой в алгоритмах комплексирования навигационной системы позволит в перспективе улучшить точностные характеристики ИНС:

- оптические системы слежения за перемещением объекта. Лидар – оптический локатор для дистанционного зондирования воздушных и водных сред. Также к лидарам относят оптические локаторы, которые позволяют дистанционно получать информацию о твердых объектах. Лидар позволяет вычислить расстояние между ним и целью с высокой точностью;
- оптико-корреляционные (стереоскопические) системы. В их состав входят две и более видеокамеры, разнесенные в пространстве, смонтированные на объекте, а также вычислитель с программным «центром управления», в состав которого входят система распознавания изображений, которая позволяет запоминать внешний вид предметов и опознавать их впоследствии, сравнивать изображения, полученные с разных видеокамер, и модуль «дрессировки»;
- ультразвуковые сонары. В момент измерения ультразвуковой дальномер создает электрическое колебание при помощи генератора, которое, преобразуясь в ультразвуковую волну, излучается в окружающее пространство. Эта волна отражается от препятствия и возвращается как эхо в приемник. Измеряя время между посылкой и приемом отраженного сигнала и зная скорость звуковой волны, распространяемой в данной среде, можно определить расстояние до препятствия. Диапазон работы подобных приборов не превышает 20-25 метров, но этого может быть достаточно для решения задач с невысокой скоростью перемещения НПО.

Оценочным методом можно определить, что в настоящий момент для перспективных тяжелых и средних РТК предъявляются следующие ключевые требования к гироскопической системе ориентирования:

- предельная погрешность определения дирекционного угла 0,1º при времени определения не более 6 минут с момента подачи питания;
- погрешность определения продольного и поперечного углов 0,03º;
- удержание угла не более 0,01º за час.

Для легких робототехнических комплексов состав глобальной ИНС остается практически неизменным. Возможно исключение некоторых компонентов «технического зрения» и увеличение акцента в сторону повышения качества решения задачи локальной навигации. Также предъявляются более жесткие требования к массогабаритным характеристикам.

Проблематика и пути решения. Одной из ключевых особенностей требований РТК в части навигационного обеспечения является сантиметровая точность определения пространственных координат. В наземной навигации, как правило, погрешность задается в процентах от пройденного пути, для тактических задач, решаемых робототехническими комплексами, такой поход зачастую неприменим. Ограничениями для решения данной задачи в основном являются дискретность датчиков линейной скорости и величина погрешности определения начального дирекционного угла. Переход на дециметровые и сантиметровые погрешности может быть обеспечен путем реализации эффективных алгоритмов комплексирования.

Массогабаритные параметры могут играть ключевую роль для легких роботизированных подвижных объектов. Данный класс обладает незначительной грузоподъемностью. Как правило, снижение массы прямо пропорционально ухудшению тактико-технических характеристик в части гироскопических систем ориентирования и, как следствие, всего режима автономного счисления координат. В таких системах с учетом функциональных задач обеспечение точности может быть осуществлено локальной навигацией.

Прецизионные системы ориентирования, как правило, являются мелкосерийными изделиями и зачастую требуют селективного отбора базовых элементов, что приводит к значительной конечной стоимости таких систем для потребителя. В совокупности с обеспечением задачи импортозамещения ценовая целесообразность применения таких систем может быть сомнительна.

Стоит также отметить, что в составе робототехнических комплексов автономные системы навигационного обеспечения являются ключевым источником информации для системы управления движением в автоматическом режиме выполнения тактических задач. Отладка и отработка технических решений требуют наличия специализированных полигонов и испытательного оборудования для проведения таких испытаний.

Заключение. Текущий уровень развития технологий отечественной промышленности позволяет решать задачи навигационного обеспечения наземных робототехнических комплексов на конкурентоспособном уровне. Обеспечение накладываемых специфических требований возможно по большей части с внедрением адаптивных алгоритмов комплексирования показаний всех датчиков, имеющихся в составе объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Матахин В. В., Шитиков Д. В., Филиппов С. И.** Эволюционное развитие систем навигации и топопривязки для наземных подвижных объектов // Оборон. техника. 2014. № 3–4.
2. **Официальный сайт АО «ВНИИ «Сигнал»**. Раздел «Робототехника» [Электронный ресурс]. URL:https://vniisignal.ru/ru/activity/special/robotics(дата обращения 04.05.2020)/

I.A. Shipov, E.V. Vetoshkin, A.V. Morozov (JSC Signal, Kovrov)

INERTIAL NAVIGATION SYSTEMS FOR ROBOTIC LANDING OBJECTS

The article is consider role of navigation for ground-based robotic systems. Classification and standard solutions in the conditions of the current state and scientific and technical reserve of the domestic industry based on the results of completed developments are given. The main difficulties of navigation equipment for ground-based modern robotic systems and promising directions for their solution are outlined.

А. В. ЧЕРНОДАРОВ
(ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», г. Москва)

С. А. ИВАНОВ
(АО «Раменский приборостроительный завод», г. Раменское, Московская область)

КОНТРОЛЬ И ЗАЩИТА ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОТ ИМИТАЦИОННЫХ ПОМЕХ

Работа посвящена проблеме обнаружения и парирования имитационных помех в инерциально-спутниковых навигационных системах. Предлагаемые решения проблемы опираются на декомпозицию диагностических моделей таких систем, применение приращений наблюдаемых параметров и комбинированных статистических критериев. Приводятся и анализируются результаты полунатурных экспериментов с интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системой БИНС-500НС.

Введение. Современное состояние бортового оборудования характеризуется применением навигационных комплексов (НК) нового поколения. Ядром таких НК являются интегрированные инерциально-спутниковые навигационные системы (ИСНС) [1]. Интеграция основана на различии спектральных характеристик ошибок бесплатформенных инерциальных (БИНС) и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Однако в практических применениях возникают трудности спутниковой поддержки БИНС [2], связанные с нестабильностью информации от ГНСС из-за естественных и преднамеренных помех. Использование аномальных сигналов при формировании инерциально-спутниковых наблюдений может привести к нарушению информационной целостности ИСНС, когда при аппаратурной исправности получаемые оценки навигационных параметров являются недостоверными. Поэтому возникает задача обнаружения и парирования аномальных наблюдений, а также локализации связанных с такими наблюдениями систем и их адаптации к текущей помеховой обстановке.

Следует отметить, что имитационные помехи, как правило, не обнаруживаются аппаратными средствами [2]. В то же время при использовании БИНС для контроля ГНСС полагается, что инерциальная информация является достоверной. С учетом указанных особенностей работа посвящена обнаружению и парированию аномальных наблюдений, связанных с естественными и имитационными помехами.

Контроль инерциально-спутниковых наблюдений по критерию χ^2/ϑ^2. В качестве объекта исследований рассматривается ИСНС БИНС-500НС [3], ошибки которой оцениваются с помощью обобщенного фильтра Калмана (ОФК) путем обработки следующих наблюдений^

$$Z_{k(i)} = [B_i\, L_i\, h_i]^{\mathrm{T}}_{\text{БИНС}} - [B_i\, L_i\, h_i]^{\mathrm{T}}_{\text{ГНСС}}, \quad (1)$$

$$Z_{V(i)} = [V_E V_N V_H]^{\mathrm{T}}_{(i)\text{БИНС}} - [V_E V_N V_H]^{\mathrm{T}}_{(i)\text{ГНСС}}, \quad (2)$$

где B, L – геодезические широта и долгота; h – высота над земным эллипсоидом; V_E, V_N, V_H – проекции вектора относительной скорости на оси геодезического сопровождающего трехгранника о*ENH*.

Для контроля информационной целостности наблюдений и их защиты от помех предлагается использовать статистические свойства [4] кондиционных невязок ν_j и их прогнозируемых дисперсий α_j^2, формируемых в ОФК, а именно:

$$\nu_j \in N(0, \alpha_j^2);\ J_j = \nu_j^2/\alpha_j^2 \in \chi^2(1,2),\ F_j = \hat{\alpha}_j^2/\alpha_j^2 \in \vartheta^2(b,c), \quad (3)$$

где $\nu_j = Z_j - \hat{Z}_j$ – невязка между реальным Z_j и прогнозируемым $\hat{Z}_j = H_j \hat{m}_j$ значениями наблюдений; m_j – оценка вектора ошибок БИНС x_i на i-м шаге после обработки j-го элемента вектора наблюдений Z_i; H_j – вектор-строка коэффициентов связи;

$\hat{\alpha}^2_{j(i)} = \frac{1}{N-1} \sum_{k=i-N+1}^{i} [\nu_{j(k)} - \hat{\bar{\nu}}_{j(i)}]^2$ – оценка дисперсии; $\hat{\bar{\nu}}_{j(i)}$ – оценка математического ожидания невязки в *j*-м наблюдении в *i*-й момент времени. Отсутствию нарушений можно поставить в соответствие значение $\hat{\bar{\nu}}_{j(i)} = 0$; $b = N/(N-2)$; $c = 4N(N-1)/[(N-2)^2 (N-4)]$; N – количество отсчетов невязки на скользящем временном интервале $T = [t_{i\text{-}N+1}, t_i]$.

Анализ табличных данных показывает, что условиям (3) правильного функционирования ИСНС можно поставить в соответствие правило трех сигм [4], а именно:

$$\hat{J}_j \le \gamma_1^2 = M[\beta_j^2] + 3\sqrt{D[\beta_j^2]} = 1 + 3\sqrt{2} \approx 5{,}2, \quad (4)$$

$$\hat{F}_j \le \eta_1^2 = M[F_j] + 3\sqrt{D[F_j]} = b + 3\sqrt{c}, \quad (5)$$

где γ_1^2; η_1^2 – допуски; $M[\ldots]$, $D[\ldots]$ – операторы математического ожидания и дисперсии.

Контроль по критерию χ^2 позволяет обнаруживать как аномальные наблюдения, так и постепенные нарушения. Диагностический параметр F_j определяется по множеству невязок на скользящем временном интервале. Сбойные сигналы, используемые для вычисления такого параметра, усредняются и несущественно влияют на результаты контроля. В то же время постепенные нарушения в чувствительных элементах БИНС, характеризующиеся постоянными смещениями невязок относительно их номинальных значений, приводят к отклонению параметра от допуска. Таким образом, если нарушение в *j*-м наблюдении выявляется по обоим критериям, то оно наиболее вероятно связано с БИНС, если только по критерию χ^2, то с ГНСС. С учетом соотношений (4), (5) может быть реализована следующая процедура контроля и парирования нарушений в ИСНС. При отсутствии нарушений невязка обрабатывается с помощью ОФК, аномальные наблюдения, выявленные по критерию χ^2, исключаются из обработки, а нарушения, выявленные по обоим критериям, парируются путем увеличения дисперсии невязки на величину $\Delta\alpha_j^2 = (\hat{\alpha}_j^2 - \eta_1^2 \alpha_j^2)/\eta_1^2$.

Контроль и парирование имитационных помех в инерциально-спутниковых наблюдениях. Имитационные помехи связаны, как правило, со смещениями навигационных параметров относительно их истинных значений. Поэтому такие помехи могут быть обнаружены с помощью диагностических параметров, формируемых по критерию ϑ^2. Однако в этом случае возникает задача идентификации системы в структуре ИСНС, из-за которой нарушилось условие (5). Решение такой задачи может быть основано на использовании дополнительных диагностических параметров, формируемых по приращениям наблюдений $\tilde{z}_j = z_{j(i)} - z_{j(i-1)}$. В таких наблюдениях детерминированные смещения удаляются. Для приращений наблюдений диагностический параметр по критерию ϑ^2 будет иметь вид $\tilde{F}_j = \hat{\tilde{\alpha}}_j^2 / \tilde{\alpha}_j^2$, где $\tilde{\nu}_j = \tilde{z}_j - \tilde{H}_j m_j$; $\tilde{H}_j = H_{j(i)} - H_{j(i-1)} \Phi_i^{-1}$; $\tilde{\alpha}_j^2 = \tilde{H}_j M_{j-1} \tilde{H}_j^T + \tilde{R}_j$; $\tilde{R}_j = 4R_j$ – дисперсия ошибки наблюдения; Φ_i^{-1} – обратная переходная матрица для вектора ошибок ИСНС; $M_{j\text{-}1}$ – ковариационная матрица для вектора ошибок $m_{j\text{-}1}$. Обнаружение и парирование детерминированных имитационных помех в ИСНС может быть сведено к следующему алгоритму:

- если $F_j > \eta_1^2$ & $\tilde{F} > \eta_1^2$, то нарушения в БИНС и $\alpha_j^2 := \alpha_j^2 + \Delta\alpha_j^2$;
- если $F_j > \eta_1^2$ & $\tilde{F} < \eta_1^2$, то нарушения в ГНСС и $z_j = \tilde{z}_{j(i)}$; $\alpha_j^2 = \tilde{\alpha}_j^2$.

(6)

Анализ результатов исследований. Эксперименты проводились в городских условиях, которые являются наиболее критичными для ГНСС. На рис. 1 показана круговая позиционная ошибка корректируемой БИНС ΔS при добавлении к сигналам ГНСС на 780-й секунде смещения 200 м и применении решающих правил (4), (5). Такая же ошибка с учетом парирования имитационных помех на основе решающих правил (4)–(6) показана на рис. 2, где $\Delta S = \sqrt{\delta_B^2 + \delta_L^2}$; $\delta_B = (B_{\text{БИНС}} - B^*_{\text{ГНСС}})R$; $\delta_L = (L_{\text{БИНС}} - L^*_{\text{ГНСС}})R\cos B^*_{\text{ГНСС}}$; R – величина радиус-вектора местоположения БИНС; $B^*_{\text{ГНСС}}$; $L^*_{\text{ГНСС}}$ – координаты ГНСС без смещений.

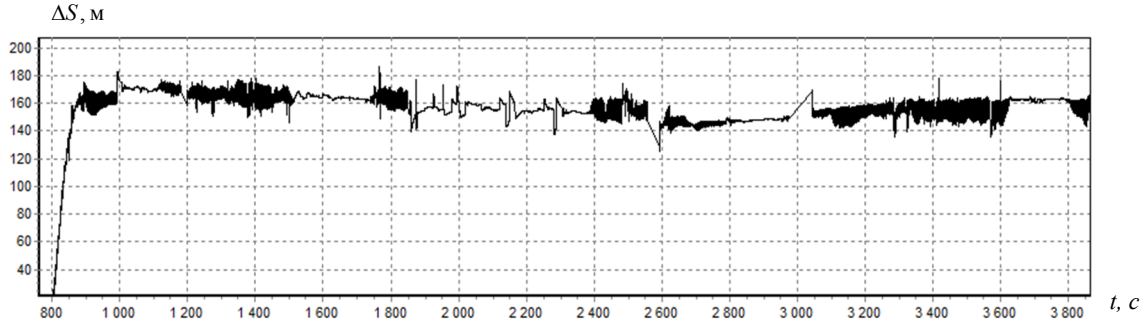


Рис. 1. Круговая позиционная ошибка БИНС с учетом парирования естественных помех

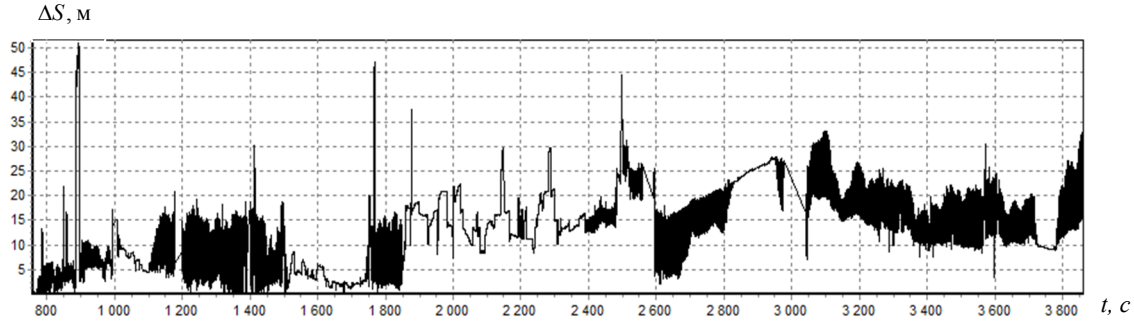


Рис. 2. Круговая позиционная ошибка БИНС с учетом парирования естественных и имитационных помех

Можно видеть, что реализация алгоритма обнаружения и парирования имитационных помех ГНСС позволила поддерживать точностные характеристики инерциально-спутникового режима на традиционном и допустимом для такого режима уровне.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Емельянцев Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / Под ред. В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор», 2016. 394 с.
2. **Schmidt, G.T.,** GPS Based Navigation Systems in Difficult Environments, *Gyroscopy and Navigation*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 41–53.
3. **Чернодаров А.В., Патрикеев А.П.** Летная отработка за полярным кругом инерциально-спутниковой навигационной системы БИНС-500НС на волоконно-оптических гироскопах // Авиакосмическое приборостроение. 2019. № 7. С. 22–26.
4. **Чернодаров А.В.** Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов. М.: Научтехлитиздат, 2017. 300 с.

A.V. Chernodarov (“NaukaSoft” Experimental Laboratory, Ltd., Moscow), S.A. Ivanov (“Ramensky Instrument Engineering Plant”, JSC, Ramenskoe, Moscow Region)

MONITORING AND PROTECTION OF INERTIAL SATELLITE NAVIGATION SYSTEMS FROM IMITATION INTERFERENCE

This paper is devoted to the problem of detecting and countering imitation interference in inertial-satellite navigation systems. The proposed solutions to the problem are based on the decomposition of diagnostic models of such systems, on the processing of increments of the observed parameters, and on the application of combined statistical criteria. The results of semi-natural experiments with the integrated inertial-satellite navigation system SINS-500NS are presented and analyzed.

А. А. ГОЛОВАН, В. М. ЖЕЛЕЗНОВ, Д. И. СМОЛЬЯНОВ
(МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва)

А. Ю. МИШИН, Д. М. ФОМИН, Р. В.БЕЛОВ
(ПАО АНПП «Темп-Авиа», Арзамас)

ЗАДАЧА ВЫСТАВКИ БЕСКАРДАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ В УСЛОВИЯХ ИНФОРМАЦИОННЫХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ

Рассматривается задача выставки бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) на подвижном основании при помощи информации базовой навигационной системой воздушного объекта. Особенностями задачи являются: пространственное разнесение базового навигационного комплекса и выставляемой БИНС; несоосность их приборных осей; неконтролируемое транспортное запаздывание информации базовой системы. Предложены и методом математического моделирования протестированы алгоритмы выставки. Приводятся результаты тестирования алгоритмов.

Введение. Рассматривается задача выставки БИНС на подвижном основании при помощи позиционной, скоростной, угловой информации, предоставляемой базовой навигационной системой (или базовой БИНС) воздушного объекта. Особенностями задачи являются:

- пространственное разнесение приведенных центров базовой и выставляемой БИНС и связанное с ним относительное орбитальное движение двух систем;
- несоосности приборных осей рассматриваемых БИНС;
- наличие неконтролируемого транспортного запаздывания при передаче корректирующей информации от базовой системы.

Алгоритмы выставки БИНС имеют калмановский вид и были реализованы в двух вариантах:

- разомкнутом – оценивание ошибок БИНС и их компенсация на выходе системы;
- замкнутом – в инерциальном счислении выставляемой БИНС используются обратные связи, формируемые при помощи корректирующей информации.

Особенностью исследования является математическое моделирование задачи, включающее в себя:

- согласованное моделирование траекторных и угловых параметров движения базовой и выставляемой системы с учетом их пространственного разнесения и несоосностей их приборных осей;
- использование в том числе телеметрических траекторий движения объекта;
- моделирование инструментальных погрешностей инерциальных датчиков в соответствии с классом точности выставляемой БИНС;
- имитация транспортного запаздывания информации, основанное как на датчике псевдослучайных чисел, так и на конкретных реализациях транспортного запаздывания;
- моделирование алгоритмов инерциального «шулеровского» счисления БИНС;
- моделирование алгоритмов выставки в разомкнутом и замкнутом вариантах.

Циклограмма выставки БИНС на подвижном основании. Использовалась типовая циклограмма выставки БИНС: участки прямолинейного (маршевого) движения и движение типа «змейка». В качестве опорного навигационного трехгранника использовался географический трехгранник с законом относительно свободной ориентации в азимуте.

Краткая характеристика модели алгоритма выставки. Применялся дискретный фильтр Калмана (метод квадратного корня). Два варианта алгоритма выставки: разомкнутый и замкнутый. Корректирующая информация: позиционные, скоростные данные базового комплекса. Вектор состояния включал в себя позиционные, скоростные, угловые ошибки БИНС, параметры пространственного отнесения, транспортное запаздывание:

$$\Delta r_1, \Delta r_2, \delta V_1, \delta V_2, \alpha_1, \alpha_2, \beta_3, \nu_1^0, \nu_2^0, \nu_3^0, \Delta f_1^0, \Delta f_2^0, \Delta f_3^0, \Delta t, l_1, l_2, l_3,$$

где

- $\Delta r_1, \Delta r_2$ – ошибки местоположения в горизонтальной плоскости в осях модельного географического трехгранника с полусвободной азимутальной ориентацией;
- $\delta V_1, \delta V_2$ – динамические ошибки горизонтальных составляющих относительной скорости в этих же осях;
- α_1, α_2 – угловые ошибки построения приборной вертикали, β_3 – азимутальная кинематическая ошибка;
- $\nu^0, \Delta f^0$ – погрешности нулей акселерометров и гироскопов;
- Δt – параметр транспортного запаздывания;
- l_1, l_2, l_3 – параметры, характеризующие пространственное разнесение навигационных систем.

Модель задачи выставки была близка к модели, которая была использована в [2].

Краткая характеристика модели инструментальных погрешностей. Рассматривается следующая типовая модель инструментальных погрешностей акселерометров:

$$f'_{z^0} = f_{z^0} + \Delta f_{z^0}, \qquad \Delta f_{z^0} = \Delta f^0_{z^0} + \Gamma f_{z^0} + \Delta f^s_{z^0},$$

где f'_{z^0} – измерения блока акселерометров; f_{z^0} – измерения идеальных акселерометров; Δf_{z^0} – погрешность измерения; $\Delta f^0_{z^0}$ – смещение нулевых сигналов акселерометров; $\Delta f^s_{z^0}$ – случайная составляющая погрешности акселерометров; элементы матрицы Γ содержат погрешности масштабных коэффициентов акселерометров и коэффициенты перекрестных влияний по внешней силе. Аналогично для датчиков угловой скорости:

$$\omega'_{z^0} = \omega_{z^0} - \nu_{z^0}, \qquad \nu_{z^0} = \nu^0_{z^0} + \Theta\omega_{z^0} + \nu^s_{z^0},$$

где ω'_{z^0} – измерения блока ДУС; ω_{z^0} – измерения идеальных ДУС; ν_{z^0} – приведенная погрешность измерения ДУС; $\nu^0_{z^0}$ – смещение нулевых сигналов ДУС, систематические составляющие дрейфа в запуске; $\nu^s_{z^0}$ – случайная составляющая погрешности ДУС; элементы матрицы Θ содержат погрешности масштабных коэффициентов и коэффициенты перекрестных влияний по измеряемой угловой скорости.

Приведенная модель инструментальных погрешностей записана в осях приборного трехгранника.

Типовые характеристики разнесения навигационных систем и параметры инструментальных погрешностей:

- l_1, l_2, l_3 ~2 м;
- погрешности углов взаимного расположения ~1 град;
- Δt ~20÷10 мс;
- $\Delta f^0_{z^0}$ ~10″, $\Delta f^s_{z^0}$ ~1″;
- перекосы осей чувствительности акселерометров ~1′;
- $\nu^0_{z^0}$ ~0,1 град/час, $\nu^s_{z^0}$ ~0,1 град/час;
- масштабные коэффициенты гироскопов ~0,001%.

Некоторые результаты работы алгоритмов выставки. В качестве характерного времени выставки был выбран период 120 секунд, который включает в себя этапы прямолинейного движения и маневра (рис. 1); дальше фильтр переходил в режим прогноза на 10 минут. Результаты одного из таких моделирований представлены на рис. 2. Начальные ошибки ориентации по курсу, тангажу и крену составляли 60′, 30′ и 30′ соответственно; по результатам выставки в 120 секунд – 7,2′, 0,6′ и 0,2′ соответственно.

На рис. 3 представлены оценки транспортного запаздывания позиционной и скоростной информации. По результатам выставки остаточные ошибки оценивания составили 3 мс и 12 мс соответственно.

На рис. 4 представлены оценки составляющих вектора разнесения навигационных систем. Проекция вектора на продольную ось остается ненаблюдаемой, оставшиеся проекции оценены с ошибками не более 0,2 м.

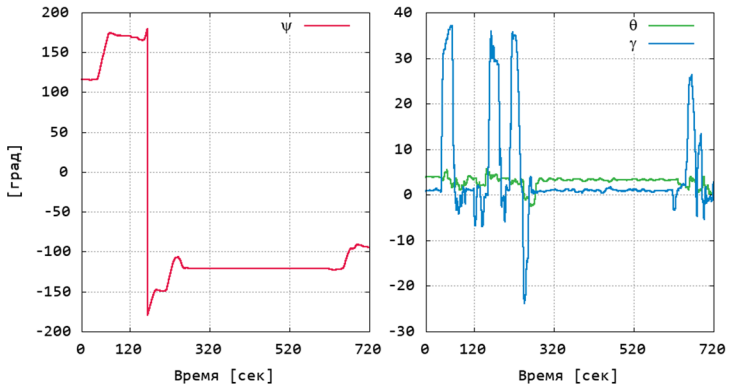


Рис. 1. Типовые траектории углов ориентации воздушного объекта (курс, тангаж, крен)

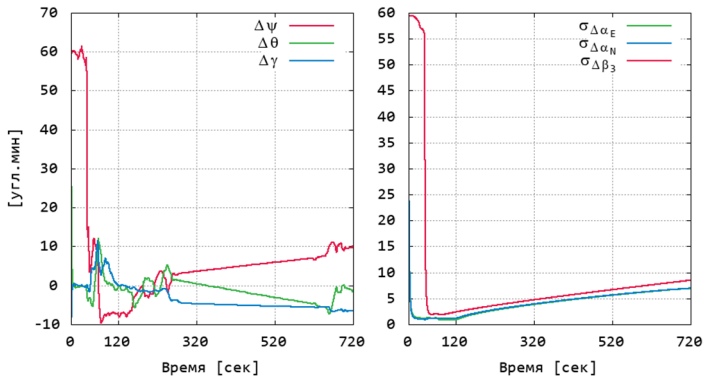


Рис. 2. Ошибки оценивания углов ориентации и среднеквадратические отклонения ошибки оценки углов $\alpha_1, \alpha_2, \beta_3$

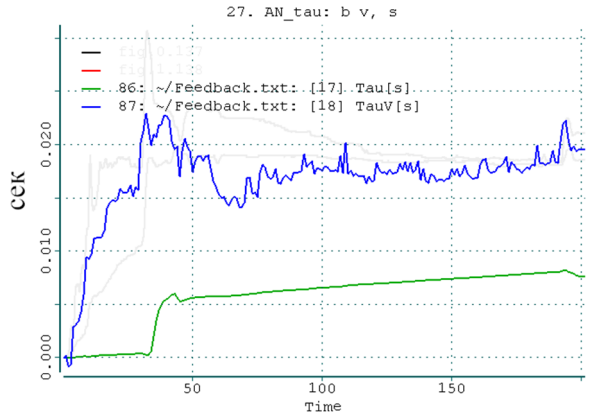


Рис. 3. Оценки транспортного запаздывания позиционной и скоростной информации

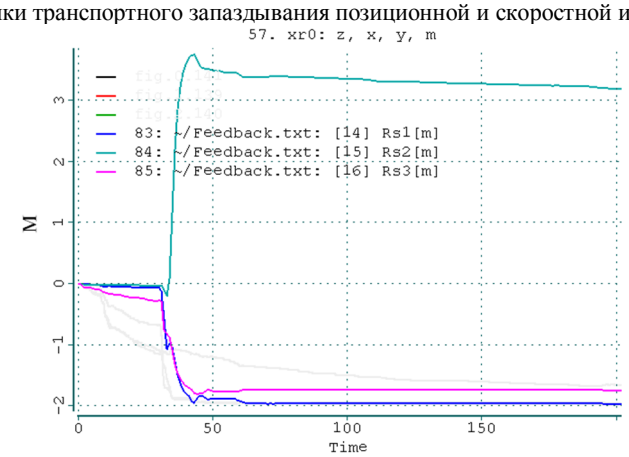


Рис.4. Оценки составляющих вектора разнесения навигационных систем

Заключение. В результате исследования были разработаны алгоритмы выставки БИНС в условиях пространственного разнесения навигационных систем, транспортного запаздывания информации базового навигационного комплекса. Проведено тщательное моделирование задачи с привлечением телеметрических данных и модели инструментальных погрешностей выставляемой БИНС. Моделирование алгоритмов позволило оценить потенциальный уровень точности решения задачи выставки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А.** Математические основы навигационных систем. Математические модели инерциальной навигации. М.: Издательство Московского университета, 2020. 162 с.
2. **Вавилова Н.Б., Голован А.А., Козлов А.В., Папуша И.А., Зорина О.А., Измайлов Е.А., Кухтевич С.Е., Фомичев А.В.** Влияние смещения спутниковой информации относительно инерциальной в алгоритме комплексной обработки информации // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам.

A.A. Golovan, V.M. Zheleznov, D.I. Smol'yanov (Lomonosov Moscow State University, Moscow), A.Yu. Mishin, D.M. Fomin, R.V. Belov (PJSC Arzamas Research and Production Enterprise Temp-avia)

IN-FLIGHT INS ALIGNMENT UNDER NON-CONTROLLED DELAYS IN AIDING DATA

In the presented paper we consider a well-known in-flight alignment problem for strapdown inertial navigation system (INS) via positional and velocity data provided by reference navigation system. The features of the mentioned problem are spatial displacement of the reference and aligned navigation systems; mutual misalignment of the relevant instrument frames, the presence of an uncontrolled time delays in the positional, velocity aiding data.

We propose in-flight INS alignment algorithm that was tested based on mathematical modeling. A special feature of the research was a thorough simulation, which included coordinated modeling of trajectory and angular parameters of a vehicle and INS under alignment, modeling of inertial sensor readings; modeling of inertial dead reckoning algorithm. Typical vehicle's trajectories were derived from relevant telemetry data. Instrument errors of INS inertial sensors correspond to their class of accuracy. The alignment algorithm have the Kalman type form and was implemented in two versions: open loop and close loop. The results of numerical experiments are also presented.

Г. О. БАРАНЦЕВ, А. А. ГОЛОВАН, П. Ю. КУЗНЕЦОВ
(Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова)

А. В. НЕКРАСОВ, И. Х. ШАЙМАРДАНОВ, Е. Н. ТЕНЮШЕВ
(АО «Инерциальные технологии Технокомплекса», Московская обл., г. Раменское)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛГОРИТМОВ НАЧАЛЬНОЙ ВЫСТАВКИ БИНС. РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

В работе приводятся результаты исследования алгоритма начальной выставки бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС). Основная идея алгоритма выставки основана на осреднении показаний ньютонометров, когда последние проектируются на оси замороженного в инерциальном пространстве приборного трехгранника. Прием обусловлен гипотезой о том, что линейные ускорения центра блока ньютонометров отсутствуют, а вместе с тем приборный трехгранник, жестко связанный с БИНС, может совершать неконтролируемые угловые движения. Приводятся результаты обработки модельных и экспериментальных данных, приводится сравнение с классическим двухэпапным подходом к задаче выставке на основе фильтра Калмана.

Введение. Рассматривается задача начальной выставки бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС), состоящая в определении параметров ориентации корпуса БИНС – углов курса, крена и тангажа, при помощи показаний инерциальных датчиков – ньютонометров (далее – акселерометров) и датчиков угловой скорости (ДУС).

Термин «неподвижное основание» означает, что точка М, отождествляемая с приведенным центром БИНС – центром блока акселерометров, неподвижна относительно Земли. При этом условие строгой неподвижности корпуса БИНС обычно не оговаривается: корпус БИНС может быть подвержен вибрациям различного рода, например при действии ветровых возмущений на корпус самолета, включением двигателей и т.п. Основной вариант постановки задачи выставки предполагает, что координаты точки М известны. Показания инерциальных датчиков представляют собой измерения компонент вектора внешней удельной силы (акселерометры), действующую на объект, измерения компонент вектора абсолютной угловой скорости (датчики угловой скорости ДУС). Эти измерения осуществляются в осях приборного трехгранника БИНС, образованного осями чувствительности акселерометров.

Традиционно задача начальной выставки решается в два этапа: этап алгебраической выставки с последующим применением алгоритма оценивания позиционных, скоростных, угловых ошибок БИНС при помощи ее коррекции по нулевой скорости, отражающей гипотезу неподвижности точки М относительно Земли. Однако в реальных системах требование неподвижности нарушается множеством возникающих погрешностей, связанных, например, с ударами и толчками по корпусу объекта, на котором закреплена БИНС. Более того, в запусках системы из холодного состояния в показаниях акселерометров наблюдаются температурные тренды. За счет подобных возмущений в показаниях акселерометров присутствует нежелательное для этапа точной выставки движение, вследствие чего точность результатов начальной выставки значительно ухудшается, что приводит к выходу параметров последующей навигации за допустимые значения. В работе исследуется иной алгоритм начальной выставки: алгоритм с параболической аппроксимацией спроектированных на неподвижные оси показаний акселерометров. Можно показать, что алгоритм устойчиво определяет все три угла ориентации: истинный курс, крен, тангаж, – использует минимальное число настроечных параметров, устойчиво работает при угловых движениях корпуса БИНС.

В работе проведено сравнение точностных характеристик следующих алгоритмов точной начальной выставки БИНС: с коррекцией по нулю скорости и координатам и алгоритм с параболической аппроксимацией. Алгоритмы точной начальной выставки реализованы на модельных и реальных данных БИНС.

Описание алгоритма начальной выставки с коррекцией по нулю скорости. Первый этап алгоритма – этап алгебраической выставки («грубой» выставки). На этапе «грубой» выставки начальные приближения углов курса, крена и тангажа определяются при помощи осредненных показателей инерциальных датчиков. Выставка происходит при условии неподвижности основания, то есть центр блока акселерометров системы полагается неподвижным относительно Земли.

Второй этап алгоритма – алгоритм оценивания с коррекцией по нулю скорости (этап «точной» выставки). Данный алгоритм предполагает наличие начальных условий (углы ориентации, географические координаты). Начальные географические координаты задаются априорно, а углы ориентации определяются на этапе «грубой» выставки. Скорость БИНС относительно Земли полагается равной нулю. Для получения оценок углов ориентации используется фильтр Калмана. В качестве корректирующих измерений используются вычисленные навигационным алгоритмом значения относительных скоростей, которые являются динамическими ошибками относительной скорости.

После этапа выставки с коррекцией по нулю скорости БИНС переводится в режим «Навигация», где осуществляется автономное счисление координат, азимутального угла, компонент линейной скорости, углов истинного курса, гироскопического курса, крена и тангажа [1, 2].

Описание алгоритма начальной выставки с параболической аппроксимацией. Опорная модель алгоритма вводится следующим образом.

Начальное положение приборного трехгранника фиксируется и затем считается инерциальной системой отсчета. Путем интегрирования уравнения Пуассона определяется модельная матрица ориентации между текущим положением приборного трехгранника и зафиксированным ранее инерциальным трехгранником. Показания акселерометров проектируются в неподвижные оси инерциального трехгранника при помощи полученной матрицы ориентации. Полученные проекции затем аппроксимируются параболами при помощи МНК. Далее осуществляется обратная перепроектировка сглаженных показаний акселерометров на подвижные оси приборной системы координат. Средние значения показаний гироскопов вычисляются из формул точного интегрирования для матрицы ориентации, зная ее начальное и конечное значение на известном промежутке времени. По полученным осредненным значениям показаний инерциальных датчиков вычисляются оценки углов крена, тангажа и курса.

Описанный алгоритм имеет модификацию, где вместо измерений акселерометров аппроксимируются приращения скорости, то есть интеграл от показаний акселерометров. Приращения скорости аппроксимируются кубическими многочленами.

Результаты обработки. Рассматриваются данные неподвижной системы, установленной на находящемся на земле вертолете, где присутствуют значительные внешние возмущения.

На рис.1 представлены полученные на этапе навигационного счисления оценки углов ориентации в случае проведения начальной выставки традиционным алгоритмом оценивания с помощью фильтра Калмана (ФК) и алгоритмом с параболической аппроксимацией (ПА). Длительность выставки в обоих случаях составляет 285 секунд.

Видно, что в условиях сильных внешних возмущений алгоритм ПА предоставляет более стабильную оценку углов ориентации на этапе начальной выставки, что улучшает точность последующей навигации.

На рис. 2 представлены значения восточной скорости Ve, северной Vn и круговой ошибки координат dR, доставляемые навигационным алгоритмом на этапе навигационного счисления [1] для того же запуска. На графиках видно, что алгоритм ПА обеспечивает лучшую точность навигации в сравнении с традиционным алгоритмом.

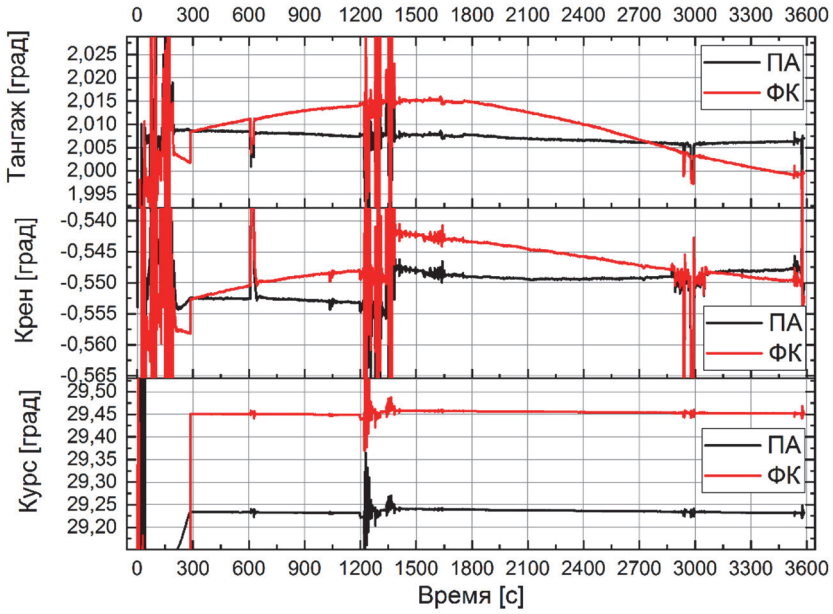


Рис. 1. Углы ориентации

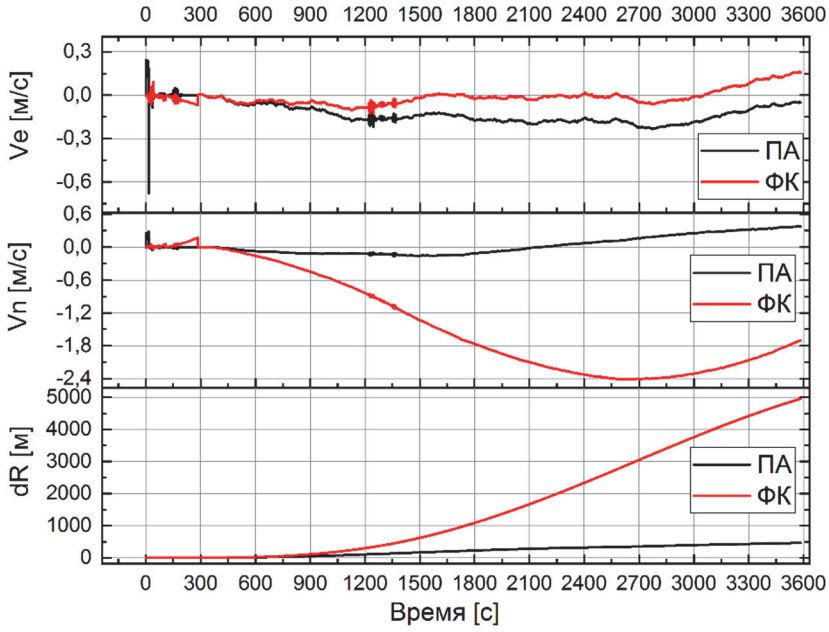


Рис. 2. Ошибка скоростей и круговая ошибка координат

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А.** Математические основы инерциальных навигационных систем. М.: Издательство Московского университета, 2020. 160 с.

G.O. Barantsev, A.A. Golovan, P.Y. Kuznetsov (Lomonosov Moscow State University), A.V. Nekrasov, I.Kh. Shaimardanov, E.N. Tenyushev (JSC Inertial Technologies of Technocomplex, Ramenskoye)

THE ANALYSIS OF THE ACCURACY CHARASTERISTICS OF THE INITIAL ALIGNMENT ALGORITHMS OF THE STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM. THE RESULTS OF THE PRACTICAL TESTS OF THE NAVIGATION SYSTEM

The paper presents the results of the analysis of the initial alignment algorithms of the Strapdown Inertial Navigation System (SINS). The main idea of the alignment algorithm is based on averaging the readings of accelerometers in inertial frame. This inertial frame is the body frame which is frozen in inertial space at the initial time.

Hypothesis is accepted that linear accelerations of the center of the accelerometer's block equals zero, but uncontrollable angular movements of the current body frame are possible. The results of the model and practical tests of SINS are presented. Also, the paper presents the comparison of the initial alignment method described above and classical two-step alignment method based on Kalman filter.

А. А. ГОЛОВАН, В. М. ЖЕЛЕЗНОВ, Д. И. СМОЛЬЯНОВ
(МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва)

ИНЕРЦИАЛЬНОЕ СЧИСЛЕНИЕ В ПРИПОЛЯРНЫХ РАЙОНАХ: ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КВАЗИКООРДИНАТ И КВАЗИУГЛОВ ОРИЕНТАЦИИ

Инерциальное счисление в полярных районах имеет особенность, связанную с невозможностью определения значений долготы и угла истинного курса в точке полюса. Описывается методический прием, устраняющий эту особенность. Он основан на введении квазигринвичской системы координат и использовании соответствующих квазигеографических координат, квазиуглов ориентации вместо традиционных. Прием добавляет необременительные вычисления в штатный алгоритм бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС) без изменения его базовых вычислительных функций.

Введение. Инерциальное счисление в полярных районах имеет особенность, связанную с невозможностью определения долготы, угла истинного курса в точке полюса. Описывается методический прием, устраняющий эту особенность. Он основан на введении квазигринвичской системы координат, квазигеографических координат, квазиуглов ориентации. Показывается, что квазипараметры не имеют особенностей вычисления в полярных районах. Прием добавляет необременительные вычисления в штатный алгоритм автономного «Шулеровского» инерциального счисления БИНС.

Представляемый материал основан на работах [1–3], которые были связаны с проведением аэрогравиметрических съемок в районах Арктики и Антарктики, где проблема плохой обусловленности указанных навигационных параметров проявилась. Полезной оказалась публикация [5].

В инерциальной навигации есть следующие особенности перехода от традиционных географических координат λ (долгота), φ (широта), параметров ориентации корпуса объекта – углов истинного курса ψ, тангажа υ, крена γ – к их квазианалогам:

- традиционные географические координаты основаны на понятии географической вертикали, квазипараметры связаны с понятием геоцентрической вертикали;
- угол истинного курса связан с направлением на север, угол квазиистинного курса – с направлением на квазисевер;
- уравнения автономного «шулеровского» счисления должны быть записаны в осях опорного географического трехгранника с законом относительно или абсолютно свободной ориентации в азимуте [4];
- алгебраическое перевычисление традиционных и квазипараметров должно быть основано на элементах соответствующих матриц ориентации.

Ниже реферативно описываются необходимые перевычисления параметров.

Квазигринвичская (квазиземная) система координат $O\eta^q$. За квазисеверный полюс принимается точка N^q с географическими координатами $\lambda = 180°$, $\varphi = 0°$, квазиюжный полюс S^q будет иметь координаты $\lambda = 0°$, $\varphi = 0°$. Плоскость квазиэкватора совпадает с плоскостью меридиана, содержащего точки с координатами ($\lambda = 90°$, $\varphi = 0°$), ($\lambda = –90°$, $\varphi = 0°$). Нулевым квазимеридианом полагается меридиан, проходящий через ось вращения Земли и точки северного и южного квазиполюсов, O – центр навигационного эллипсоида Земли.

Взаимосвязь географических координат и квазипараметров. Можно показать, что взаимосвязь геоцентрических координат точки с их квазианалогами такова (здесь φ^0,λ^0 – соответствующие геоцентрические координаты точки):

$$\varphi^q = -arcsin\left(cos\varphi^0 sin\lambda^0\right), \lambda^q = atan2\left(cos\varphi^0 sin\lambda^0, sin\varphi^0\right).$$

Если воспользоваться следующей приближенной формулой [6]

$$\varphi^0 = \varphi - \Delta\varphi,\ \Delta\varphi \approx \frac{1}{2}e^2 sin2\varphi\left(1 - \frac{h}{a} + e^2 sin^2\varphi\right) + O\left(0.01''\right),$$

то с высокой точностью получим

$$\varphi^q \approx -arcsin\left(b_{31}\left(1+e^2b_{33}^2\left(1-\frac{h}{a}+e^2b_{33}^2\right)\right)\right),$$

$$\lambda^q \approx atan2\left[b_{32}\left(1+e^2b_{33}^2\left(1-\frac{h}{a}+e^2b_{33}^2\right)\right), b_{33}\left(1-e^2\left(1-b_{33}^2\right)\left(1-\frac{h}{a}+e^2b_{33}^2\right)\right)\right],$$

где b_{ij} – элементы матрицы ориентации $B_{x\eta}$ опорного географического трехгранника *Mx* относительно гринвичской (земной) системы координат $O\eta$ с указанным законом азимутальной ориентации, *atan2* – функция вычисления угла по значениям синуса и косинуса.
Напомним, что выражения для угловых скоростей трехгранника *Mx* с законом относительно или абсолютно свободной ориентации в азимуте не имеют особенностей в полярных точках.

Определение квазиистинного курса и квазипутевого угла. Угол квазиистинного курса и квазипутевой угол определяются точно так же, как и их традиционные аналоги, за исключением того, что их отсчет осуществляется от направления на квазисевер. Имеем

$$\psi^q = \psi_g - \chi^q \ , \ \chi^q = atan2\left(b_{11}, b_{21}\right),$$

где ψ_g – угол гироскопического курса, не имеющий особенностей вычисления, χ^q – квазиугол «платформы», вычисляемый по элементам матрицы $B_{x\eta}$.

Квазипутевой угол ψ_c^q определятся так:

$$\psi_c^q = atan2\left(V_1, V_2\right) - \chi^q,$$

где V_1, V_2 – компоненты горизонтальной относительной линейной скорости объекта в осях *Mx* – выходные данные стандартного счисления БИНС, а также ранее вычисленного квазиугла χ^q.

Особенности режима коррекции БИНС в квазипараметрах. Можно показать, что алгебраический переход к квазикоординатам, квазиуглам не вызывает особенностей в режиме коррекции БИНС как при использовании показаний лага, так и при использовании данных спутниковой навигации. Так, в формировании корректур лага используется «неперевычисляемый» угол гироскопического курса ψ_g. Вторичная спутниковая информация легко может быть представлена в квазипараметрах, что было сделано компаний JAVAD.COM для выходных данных приемника [3] для обеспечения всеширотности использования аэрогравиметра GT-2A.

Примеры вычисления традиционных и квазипараметров

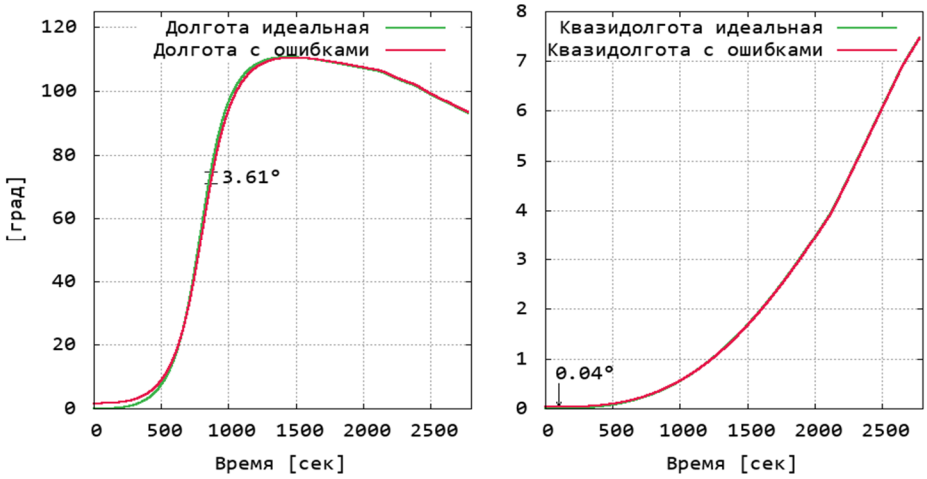


Рис. 1. Пример долготы и квазидолготы. На рисунке указана максимальная ошибка

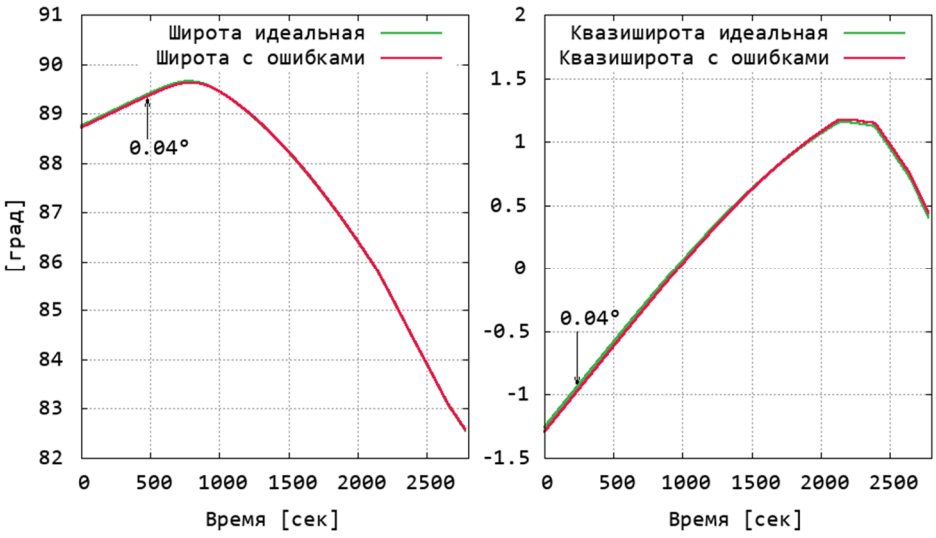


Рис. 2. Пример широты и квазиширoты. На рисунке указана максимальная ошибка

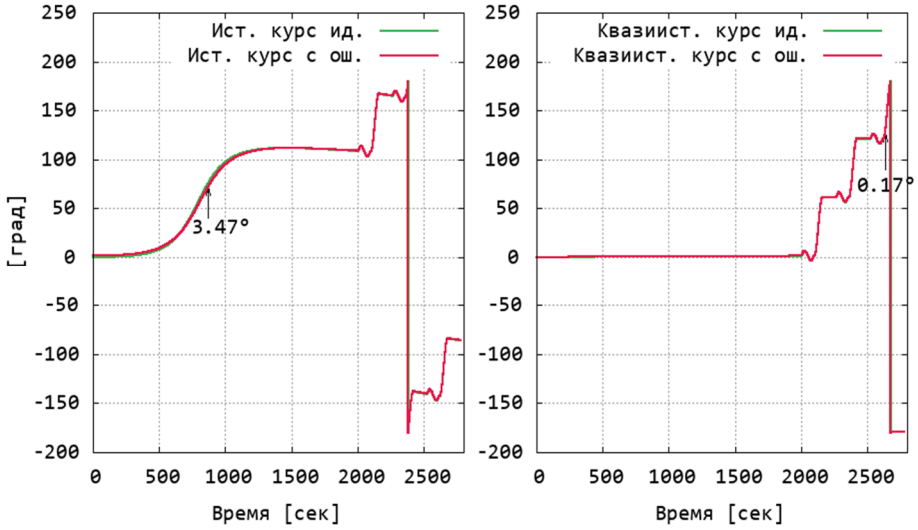


Рис. 3. Пример истинного курса и квазиистинного курса. На рисунке указана максимальная ошибка

Заключение. Для устранения особенностей алгоритмов инерциального счисления в полярных районах предложен методический прием, основанный на использовании квазигринвичской системы координат, квазигеографических координат, квазиуглов ориентации вместо традиционных. Показано, что прием добавляет необременительные вычисления в штатный алгоритм БИНС без изменения его базовых вычислительных функций.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 19-01-00179

ЛИТЕРАТУРА

1. **Современные методы и средства** измерения параметров гравитационного поля Земли / Под общ. ред. В.Г.Пешехонова. СПБ.: ГНЦ РФ АО «Концерн "ЦНИИ "Электроприбор», 2017. С. 201–209, 389.
2. **Richter, T.G., Greebaum, J.S., Young, D.A., Blankenship, D.D., Hewison, W.Q., Tuckett, H.,** University of Texas Airborne Gravimetry in Antarctica, 2008 to 2013, Proceeding of IAG International Sympoisium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements, Saint-Petersburg, Russia, 2013.
3. **Smoller, Y.L., Yurist, S.S., Golovan, A.A. et al.,** Using a multiantenna GPS receiver in the airborne gravimeter GT-2a for surveys in polar areas, Gyroscopy Navig., 2015, 6: 299. https://doi.org/10.1134/S2075108715040100.
4. **Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А.** Математические основы инерциальных навигационных систем. М.: Издательство Московского университета, 2020. 160 с.
5. **Юманов В.С**. Алгоритм преобразования квазигеографических координат из одной системы геодезических координат в другую // Материалы XV конференции молодых ученых. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2013

A.A. Golovan, V.M. Zheleznov, D.I. Smol'yanov (MSU named after M.V. Lomonosov, Moscow)

INERTIAL NAVIGATION IN THE POLAR REGIONS: USING QUASI COORDINATES AND QUASI ATTITUDE ANGLES

Inertial navigation has a feature in the polar areas, associated with the inability to determine longitude and heading at the pole point. In the paper a methodical technique is described that eliminates marked feature. It is based on the implementation of the quasi Earth Centered Earth Fixed reference frame and on the usage of appropriate quasi geographic coordinates and quasi attitude angles instead of traditional ones. The mentioned technique adds minor arithmetic operations in the standard algorithms of strapdown inertial navigation system.

С. Б. БЕРКОВИЧ, Н. И. КОТОВ, А. В. ШОЛОХОВ
(Межрегиональное общественное учреждение «Институт инженерной физики», г. Серпухов)

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ АВТОНОМНОГО СЧИСЛЕНИЯ КООРДИНАТ НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ ПУТЕМ ОПТИМАЛЬНОЙ ОРИЕНТАЦИИ ДАТЧИКОВ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ

Исследованы пути повышения точности автономных систем навигации наземных объектов за счет оптимизации ориентации измерительных осей датчиков угловой скорости. Раскрыт физический принцип повышения точности координат. Подробно рассмотрена модель погрешностей системы навигации, в которой ориентация входных осей датчиков отличается от взаимно ортогональной. Сформулирована оптимизационная задача и предложен метод нахождения углов ориентации датчиков угловой скорости.

Моделированием оценена точность координат при различных условиях функционирования наземного объекта. Представлены зависимости характеристик точности координат от времени, вариаций высот вдоль маршрута движения объекта, точности датчиков. Обоснованы условия достижения положительного эффекта 15-20% при практической реализации описанного подхода.

Введение. В наземных навигационных системах (ННС) основным источником погрешностей автономного счисления координат являются ошибки выработки параметров ориентации. Ошибки азимутальной ориентации вносят наибольший вклад в погрешности горизонтальных координат современных ННС. Существенно меньшим является вклад погрешности угла продольного наклона объекта, а погрешность угла крена объекта практически не сказывается на точности определения местоположения. Поэтому повышение точности горизонтальных координат в ННС возможно уменьшением погрешности азимутальной ориентации объекта за счет несущественного снижения точности измерения двух других углов.

Один из путей реализации такого подхода состоит в выборе особой ориентации входных осей измерителей параметров углового движения (датчиков угловой скорости (ДУС)), отличающейся от «традиционной» взаимно ортогональной ориентации [1–3]. Он легко реализуем в бескарданных измерителях параметров ориентации (БИПО) в отличие от устройств, где используется карданов подвес. В работе решается задача нахождения углов оптимальной ориентации входных осей ДУС при различных условиях движения наземного объекта и уровнях погрешностей навигационных датчиков. Детально рассматривается модель погрешностей ННС с неортогональной ориентацией входных осей ДУС, в том числе при избыточном их числе. Приводятся результаты оценки достигаемого эффекта, полученные путем моделирования. Рассматриваемый подход не ограничивается горизонтальными координатами ННС, а может быть использован в целях повышения точности определения других навигационных параметров в современных системах навигации.

Постановка задачи. Погрешности ННС описываются в общем виде системой линеаризованных дифференциальных уравнений [3, 4]:

$$\Delta\dot{Z} = A\Delta Z + Bw, \tag{1}$$

где $\Delta Z^T = \left[\Delta x\ \Delta y\ \Delta h \quad \Delta\alpha\ \Delta\beta\ \Delta\gamma \quad \Delta V \quad \omega_1 \ldots \omega_n\right]$ – вектор состояния, включающий следующие погрешности: горизонтальных плоских прямоугольных координат Δx, Δy и высоты Δh; углов ориентации $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$, $\Delta\gamma$ по трем взаимно ортогональным осям приборной системы координат (СК); одометрического датчика ΔV; и n ДУС $\omega_1 \ldots \omega_n$, причем $n \geq 3$; w – вектор входных воздействий («белых» шумов), A и B – матрицы состояния и входных воздействий соответственно. Векторы и матрицы в уравнении (1) могут быть конкретизированы с учетом уравнений идеальной работы ННС [6] и ее приборного состава.

В рассматриваемом подходе ориентация входных осей ДУС отличается от взаимно ортогональной. Ориентацию входной оси η_i каждого i-го ДУС ($i = 1 \ldots n$) в приборной СК xyz ННС зададим двумя углами (рис. 1): горизонтальным углом u_i между осью x приборной СК ННС и

проекцией входной оси η_i ДУС на плоскость осей *xy*; углом возвышения t_i между входной осью *i*-го ДУС и плоскостью осей *xy*.

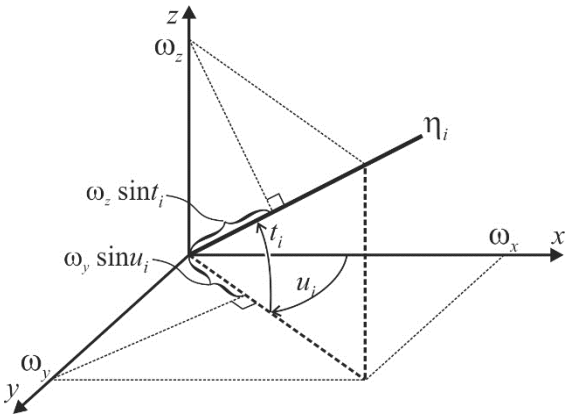


Рис. 1. Ориентация входной оси *i*-го ДУС в приборной СК ННС

Проекции вектора $\overline{\omega} = \left[\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z\right]^T$ угловой скорости наземного объекта на соответствующие оси *xyz* приборной СК ННС могут быть получены по одновременно измеренным проекциям вектора $\overline{\omega}$ на входные оси $\eta_1 \ldots \eta_n$ ДУС при условии, что последние не лежат в одной плоскости [7, 8]. При этом погрешности проекций угловых скоростей ω_x, ω_y, ω_z, непосредственно фигурирующих в алгоритме ННС, и, как следствие, точность определения местоположения зависят от ориентации входных осей ДУС. Это позволяет минимизировать погрешности вырабатываемых ННС координат путем выбора введенных выше углов ориентации входных осей ДУС.

Задача состоит в нахождении таких углов u_i и t_i ориентации входных осей всех *n* ДУС, при которых минимальна среднеквадратичная погрешность (СКП) местоположения объекта, определяемая как $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$, где σx и σy – соответственно СКП выработанных ННС координат *x*, *y* в конечной точке траектории наземного объекта.

Оптимизация углов ориентации входных осей датчиков угловой скорости. Поиск субоптимального решения предпочтительней оптимального потому, что на практике часть значимых исходных данных известна весьма приближенно (например, продолжительность движения объекта к конечной точке, пройденный при этом путь, высоты вдоль маршрута движения наземного объекта и т.п.).

В модели погрешностей наземной навигационной системы (1) для вектора состояния ΔZ конкретизированы основные группы алгоритмов с учетом неортогональной ориентации входных осей ДУС в бескарданном измерителе параметров ориентации. При этом угловая скорость дрейфа *i*-го ДУС для простоты полагается экспоненциально-коррелированным случайным процессом [10] с СКП σ_ω и периодом корреляции T_ω.

Совокупное влияние дрейфов ДУС на точность выработки параметров ориентации БИПО выражается посредством введенных коэффициентов $k_{\alpha 1} \ldots k_{\gamma n}$ следующим образом. Из рис. 1 следует, что измеряемая *i*-м ДУС угловая скорость ω_i может быть найдена путем суммирования проекций угловых скоростей ω_x, ω_y, ω_z на его входную ось. Она зависит от углов u_i и t_i ориентации входной оси *i*-го ДУС:

$$\omega_i = \omega_x \cos u_i \cos t_i + \omega_y \sin u_i \cos t_i + \omega_z \sin t_i . \qquad (2)$$

Формула (2) может использоваться и для решения обратной задачи – нахождения проекций ω_x, ω_y, ω_z вектора $\overline{\omega}$ угловой скорости объекта на оси приборной СК по выходным сигналам ДУС $\omega_1 \ldots \omega_n$:

$$\overline{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\alpha 1} & \cdots & k_{\alpha n} \\ k_{\beta 1} & \cdots & k_{\beta n} \\ k_{\gamma 1} & \cdots & k_{\gamma n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_n \end{bmatrix}. \qquad (3)$$

Коэффициенты $k_{\alpha 1} \ldots k_{\gamma n}$ в формуле (3) могут быть получены, например, для равноточных ДУС согласно методу наименьших квадратов по *n* формулам (2). В этом случае погрешности угловых скоростей ω_x, ω_y, ω_z (матрица ковариации вектора $\overline{\omega}$) зависят от «геометрического фактора» – углов u_i, t_i ориентации входных осей всех *n* ДУС.

Таким образом, могут быть найдены зависящие от ориентации входных осей ДУС коэффициенты $k_{\alpha 1}\ldots k_{\gamma n}$, входящие в матрицу A модели погрешностей ННС (1).

СКП местоположения объекта σ выражается через СКП координат σ_x и σ_y, которые могут быть рассчитаны посредством разностного уравнения $P_{k+1}=F_kP_kF_k^T+Q$, где P_k – матрица ковариации вектора погрешностей ΔZ (1) в k-й момент времени, $F_k=E+A_k\Delta t$ – дискретная матрица состояния, A_k – матрица состояния в k-й момент времени, E – единичная матрица соответствующей размерности, Δt – период дискретности, Q – постоянная дискретная матрица входных воздействий, соответствующая матрице B в формуле (1) [2, 10]. Поскольку матрица A содержит коэффициенты $k_{\alpha 1}\ldots k_{\gamma n}$ и зависит от углов u_i, t_i ориентации входных осей ДУС, СКП местоположения объекта является некоторой функцией этих углов: $\sigma=f_\sigma(u_1,t_1\ldots u_n,t_n)$. Последняя формула положена в основу нахождения оптимальных углов ориентации входных осей ДУС известными методами поиска экстремумов функций [8].

Оценка эффекта, достигаемого в результате оптимизации ориентации входных осей датчиков угловой скорости. В качестве показателя эффекта принят $\sigma_{\%}=100\%\cdot(\sigma_\perp-\sigma_t)/\sigma_\perp$, где $\sigma_\perp$ и σ_t – СКП определения местоположения соответственно при взаимно ортогональной ориентации входных осей ДУС и при их оптимальной ориентации.

Значения $\sigma_{\%}$ получены моделированием процесса выработки координат ННС в процессе движения наземного объекта по 100 случайно сформированным маршрутам следующих протяженностей: 22…25 км, 35…38 км, 47…50 км, 72…75 км и 95…100 км. Все маршруты пролегают по автомобильным дорогам реальных топографических карт, которые специально были подобраны с разными характеристиками пересеченности рельефа местности. Это дополнительно позволило охарактеризовать вертикальный профиль каждого маршрута посредством его СКП высот σ_H. Параметры модели (1) таковы, что темп увеличения погрешностей координат составляет ≈1 м за 1 км пути в ННС с ортогональной ориентацией входных осей ДУС.

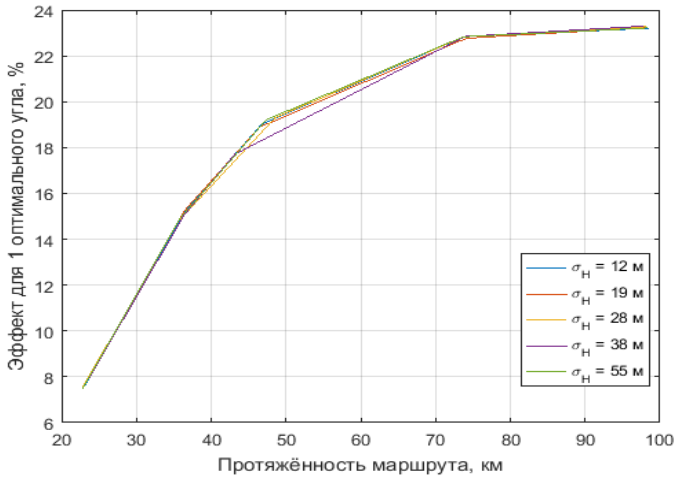


Рис. 1. Зависимость достигаемого эффекта от протяженности маршрута и пересеченности рельефа местности

Типичная зависимость $\sigma_{\%}$ от протяженности маршрута ННС показана на рис. 2 для различных значений σ_H пересеченности рельефа местности. С увеличением протяженности эффект $\sigma_{\%}$ возрастает до некоторого предела ≈20…25%. Эффект практически не зависит от вертикального профиля маршрута для σ_H в диапазоне 12…55 м. С повышением точности ДУС эффект от оптимальной ориентации входных осей снижается. Поэтому предлагаемый подход более актуален для БИПО на ДУС средней и низкой точности.

Заключение. Рассмотрена задача снижения погрешностей координат наземных навигационных систем за счет оптимальной (не взаимно ортогональной) ориентации входных осей датчиков в бескарданных измерителях параметров ориентации. Положительный эффект достигается на основе учета различного вклада погрешностей ориентации по осям приборного трехгранника в погрешности координат. Его величина составляет около 15…20% и существенно зависит от точности датчиков угловой скорости, а также объективных условий функционирования навигационной системы в составе наземного объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Андреев В.Д.** Теория инерциальной навигации. Автономные системы. М.: Наука, 1966.
2. **Анучин О.Н., Емельянцев Г.И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1999. 357 с.
3. **Матвеев В.В., Распопов В.Я.** Основы построения бесплатформенных инерциальных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с.
4. **Голован А. А., Парусников Н.А.** Математические основы навигационных систем. Ч. I. Математические модели инерциальной навигации. М.: МАКС Пресс, 2011.
5. **Вавилова Н.Б., Вязьмин В.С., Голован А.А.** Результаты разработки и применения алгоритмов интеграции низкоточной БИНС, СНС и одометра в аппаратном комплексе дорожной лаборатории // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 27–29 мая 2019, Санкт-Петербург, Россия. Сб. рефератов докладов. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019. С. 8–15.
6. **Шолохов А.В., Беркович С.Б., Котов Н.И.** Повышение точности наземных навигационных систем за счет оптимизации ориентации входных осей датчиков бескарданных модулей // Электронные информационные системы. 2019. №4(23). С. 59–70.
7. **Гантмахер Ф. Р.** Теория матриц. 5-е изд. М.: Физматлит, 2010.
8. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. Пер. с англ. / Под общ. ред. И.Г. Арамановича. М.: Наука, 1968. 720 с.
9. **Волков Е.Б., Дворкин В.З., Прокудин А.И.** Технические основы эффективности ракетных систем. М.: Машиностроение, 1989.
10. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1998. 370 с.
11. **Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И, Чигин Г.П.** Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985. 328 с.
12. **Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.** Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2000. 383 с.

S.B. Berkovich, N.I. Kotov, A.V. Sholokhov (Inter-regional public institution «Institute of engineering physics», Serpukhov)

IMPROVING THE ACCURACY OF COORDINATE RECKONING FOR AUTONOMOUS TERRAIN OBJECTS BY OPTIMIZING THE ORIENTATION OF RATE SENSORS

The article examines a new approach to improving the accuracy of autonomous navigation systems for terrain objects. It is based on optimizing the orientation of the measuring axes of inertial rate sensors used for determining the orientation of an object. The physical principle of increasing the coordinate's accuracy is revealed. The model of navigation system errors is considered in detail. Its peculiarity is that the orientation of the measuring axes of the rate sensors differs from the mutually orthogonal one. The problem of optimizing the orientation angles of the rate sensor measuring axes is formulated and solved to achieve the highest accuracy of the terrain object coordinates.

The effect on the accuracy of coordinates is estimated by modeling errors of the navigation system under various operating conditions of a terrain object. The relationship of standard errors of coordinates is analyzed: on the length of the object's route, variations in heights along the route, and the accuracy of rate sensors. The necessary conditions for achieving a positive effect of 15-20% in the practical implementation of the described approach are considered.

С. В. КРИВОШЕЕВ, К. О. ЛУКИН
(КНИТУ–КАИ, Казань)

ГИРОСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ВЗАИМНОГО ПОЛОЖЕНИЯ РЕЛЬСОВЫХ НИТЕЙ ПО УРОВНЮ

В докладе предлагается гиросистема для измерения взаимного положения рельсовых нитей по уровню в вертикальной плоскости с компенсацией виражной погрешности. Основным принципом решения задачи является замена в контуре коррекции гиросистемы одноосного маятникового чувствительного элемента гиромаятником с динамической настройкой по линейной скорости движения путеизмерителя. Приводится схема построения, математическая модель гиросистемы – одноосной силовой гировертикали с гиромаятником, анализируется точность ее работы.

Введение. Железные дороги являются стратегическим ресурсом развитых стран. Для обеспечения безопасности перевозок необходимо контролировать большое количество параметров полотна, в том числе положение рельсовых нитей по уровню. Для скоростного измерения данного параметра на протяженных участках используются различного типа гиросистемы: от гиростабилизаторов [1, 2, 3] до бесплатформенных инерциальных навигационных систем [4], включая аналитические гировертикали усеченного состава [5]. Однако использование бесплатформенных инерциальных навигационных систем не оправдано для оперативного контроля дистанциями пути и предприятиями промышленного транспорта. Особенно востребованы малогабаритные путеизмерители в металлургических и горно-обогатительных комбинатах, которые имеют достаточно протяженные железнодорожные пути [6]. В работе предлагается совершенствование построения цепи коррекции одноосной силовой гировертикали (ОСГВ) [7] в условиях возмущенного движения в кривых (на вираже) для малогабаритных путеизмерителей. Основной проблемой является действие центростремительного ускорения, которое вызывает виражные погрешности. В докладе приведено построение и анализ точности ОСГВ с компенсацией виражной погрешности с помощью гиромаятника (ГМ).

Аспекты проектирования гиросистемы. Ставится задача проектирования ОСГВ [7] с модифицированным маятниковым чувствительным элементом [8] в виде ГМ, поведение которого инвариантно к действию центробежной силы. Кинематическая схема ОСГВ показана на рис. 1.

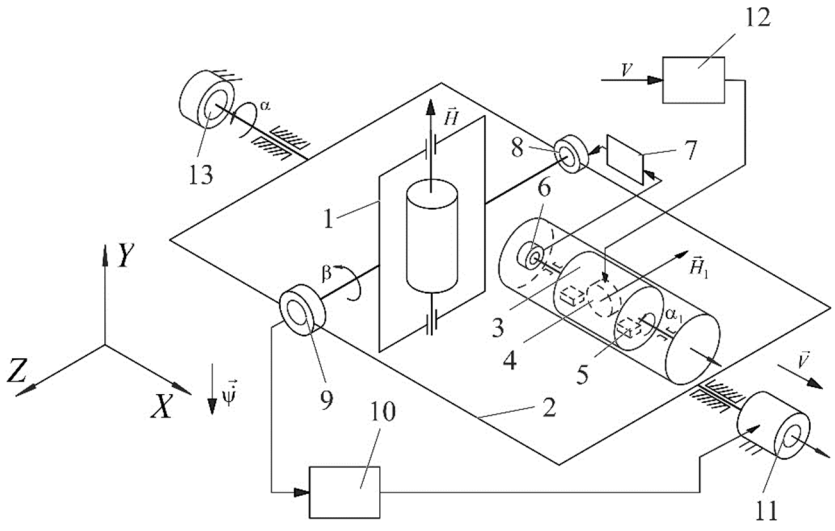


Рис. 1. Кинематическая схема ОСГВ с ГМ: 1 – гироузел с полуосями; 2 – наружная рамка; 3 – поплавковый узел; 4 – гиромотор ГМ; 5 – грузики; 6 – датчик угла коррекции; 7 – усилитель коррекции; 8 – мотор коррекции; 9, 10 – датчик угла и усилитель контура стабилизации; 11 – мотор стабилизации; 12 – одометр; 13 – системный датчик угла

Гиромаятник. Уравнение динамики гиромаятника имеет вид:

$$-J_{\text{м}}\left(\ddot{\alpha}_1-\dot{\omega}_x\right)-a_{\text{м}}\left(\dot{\alpha}_1-\dot{\alpha}\right)-ml\left(-\left(V_{\text{г}}\dot{\psi}-2U_{\text{в}}V_{\text{г}}\right)\text{C}_{\alpha_1}+w_z+g\,\text{C}_{\vartheta}\text{S}_{\alpha_1}\right)+H_1\omega_y\,\text{C}_{\alpha_1}+M^{\text{м}}_{\text{тр}}=0\,, \qquad (1)$$

где $J_{\text{м}}$ – момент инерции поплавкового узла по оси подвеса; α_1 – угол отклонения ГМ от местной вертикали; ω_x – проекция угловых скоростей на продольную ось прибора, совпадающую с продольной осью вагона-путеизмерителя; $a_{\text{м}}$ – коэффициент вязкого сопротивления; α – угол между плоскостью местного горизонта и плоскостью наружной рамки; ml – маятниковость ГМ; $V_{\text{г}}$ – горизонтальная составляющая линейной скорости движения путеизмерителя; ψ – угол курса; ϑ – угол уклона рельс; $U_{\text{в}}$ – вертикальная составляющая угловой скорости вращения Земли; здесь и далее принимается $\text{C}_{(\bullet)}\equiv\cos(\bullet)$, $\text{S}_{(\bullet)}\equiv\sin(\bullet)$; w_z – ускорение поперечных линейных колебаний; g – ускорение свободного падения; H_1 – кинетический момент ГМ; ω_y – проекция угловых скоростей на нормаль к полу вагона; $M^{\text{м}}_{\text{тр}}$ – момент трения в подвесе поплавкового узла. Проекции угловых скоростей на систему координат *OXYZ*, связанную с вагоном (рис. 1), определятся так:

$$\omega_x=U_{\text{г}}\,\text{C}_{\psi}\text{C}_{\vartheta}+U_{\text{в}}\text{S}_{\vartheta}-\dot{\psi}\text{S}_{\vartheta};\omega_y=-U_{\text{г}}\,\text{C}_{\psi}\text{S}_{\vartheta}+U_{\text{в}}\text{C}_{\vartheta}-\dot{\psi}\text{C}_{\vartheta}+\omega_{\text{вл}};\omega_z=-U_{\text{г}}\,\text{S}_{\psi}-\frac{V}{R_{\text{з}}}+\dot{\vartheta}\,, \qquad (2)$$

где $U_{\text{Г}}$ – горизонтальная составляющая угловой скорости вращения Земли; $\omega_{\text{вл}}$ – угловая скорость виляния вагона; ω_z – проекция угловых скоростей на ось *OZ*.

Из уравнений (1) и (2) можно получить условие компенсации момента центробежных сил (условие динамической настройки)

$$H_1=mlV_{\text{г}}\,. \qquad (3)$$

Для выполнения условия (3) скорость вращения ротора ГМ будет регулироваться по сигналу с одометра. Заметим, что при уклоне рельс, когда скорость, измеряемая одометром, равна $V=V_{\text{г}}/\cos\vartheta$, дополнительная погрешность не создается, так как по (1), (2) и (3)

$$mlV_{\text{г}}\dot{\psi}+ml\frac{V_{\text{г}}}{\text{C}_{\vartheta}}\left(-\dot{\psi}\,\text{C}_{\vartheta}\right)=gml\alpha_1\,. \qquad (4)$$

Для обеспечения необходимого качества работы ГМ на любом пути точность поддержания кинетического момента ГМ должна быть не хуже

$$\delta H_1=\frac{\Delta H_1}{H_1}=\frac{[\alpha_1]gml}{mlV\dot{\psi}}=\frac{[\alpha_1]g}{a_{\text{цс}}}\,, \qquad (5)$$

где δH_1, ΔH_1 – относительная и абсолютная погрешность поддержания кинетического момента; $[\alpha_1]$ – допустимая погрешность показаний ГМ от неточности кинетического момента; $a_{\text{цс}}$ – центростремительное ускорение, действующее на вагон, которое можно оценить исходя из данных [9], согласно которым максимально допустимое непогашенное ускорение равно 0,7 м/с^2, а максимальное превышение рельс – 150 мм.

Точность работы ГМ в соответствии с (1) определяется моментом трения в опорах подвеса

$$\Delta\alpha_1=M^{\text{м}}_{\text{тр}}\big/gml\,, \qquad (6)$$

где $\Delta\alpha_1$ – погрешность ГМ.

Из приведенного анализа следует, что конструкция ГМ будет определяться на основе совместного выполнения трех условий: определение маятниковости по моменту трения и статической погрешности (6); влияние маятниковости на динамическую настройку (3); обеспечение практически полного жидкостного взвешивания поплавкового узла путем рационального подбора его объема и массы. Необходимо одновременно конструктивно подобрать коэффициент вязкого трения так, чтобы обеспечивалось заданное демпфирование колебаний ГМ при ограничении возмущающего момента от колебаний наружной рамки ОСГВ.

Силовая гировертикаль. Систему уравнений ОСГВ образуют уравнения динамики (7)–(8) и уравнения электрических цепей моторов стабилизации (9) и коррекции (10):

$$-J_x(\ddot{\alpha}+\dot{\omega}_x)+H(\dot{\beta}\mathrm{C}_\beta-\omega_y\mathrm{C}_\beta\mathrm{S}_\alpha+\omega_z\mathrm{C}_\beta\mathrm{C}_\alpha)+C_{\text{см}}i_{\text{с}}+M^x_{\text{тр}}=0, \quad (7)$$

$$-J_z(\ddot{\beta}+\dot{\omega}_z\mathrm{C}_\alpha-\dot{\omega}_y\mathrm{S}_\alpha)-H((\dot{\alpha}+\omega_x)\mathrm{C}_\beta+\omega_y\mathrm{C}_\alpha\mathrm{S}_\beta)+C_{\text{км}}i_{\text{к}}+M^z_{\text{тр}}=0, \quad (8)$$

$$T_{\text{эс}}\frac{di_{\text{с}}}{dt}+i_{\text{с}}+R_{\text{с}}^{-1}C_{\text{се}}(\dot{\alpha}-\dot{\gamma})=R_{\text{с}}^{-1}s_{\text{у}}s_{\text{ду}}\beta, \quad (9)$$

$$T_{\text{эк}}\frac{di_{\text{к}}}{dt}+i_{\text{к}}+R_{\text{к}}^{-1}C_{\text{ке}}\dot{\beta}=R_{\text{к}}^{-1}k_{\text{у}}k_{\text{ду}}(\alpha_1-\alpha), \quad (10)$$

где β – угол прецессии; J_x и J_z – моменты инерции наружной рамки с установленными на ней элементами и гироузла относительно осей подвеса; H – кинетический момент гироузла; $M^x_{\text{тр}}$, $M^z_{\text{тр}}$ – моменты сухого трения по оси стабилизации и прецессии соответственно; $i_{\text{с}}$ и $i_{\text{к}}$, $T_{\text{эс}}$ и $R_{\text{с}}$, $T_{\text{эк}}$ и $R_{\text{к}}$ – токи, электрические постоянные времени и активные сопротивления в обмотках моторов стабилизации и коррекции; $C_{\text{се}}$ и $C_{\text{ке}}$, $C_{\text{см}}$ и $C_{\text{км}}$ – коэффициенты противо-ЭДС и коэффициенты момента моторов стабилизации и коррекции; γ – угол наклона вагона-путеизмерителя в поперечной плоскости; $s_{\text{у}}$ и $s_{\text{ду}}$, $k_{\text{у}}$ и $k_{\text{ду}}$ – коэффициенты передачи усилителей и датчиков угла контуров стабилизации и коррекции.

На основе уравнений (7)–(10) с учетом реальных параметров ОСГВ можно прийти к соотношению, определяющему ее точность работы:

$$\alpha_{\max}=\frac{J_z}{H^2}M^x_{\text{в}\max}\sqrt{\frac{\omega_1^4+(\omega_1/T_{\text{эмк}})^2}{\omega_1^4+(T_{\text{к}}T_{\text{с}})^{-2}}}+\Delta\alpha_{1\max}\sqrt{\frac{\left(1-T_{\text{эс}}T_{\text{с}}\omega_2^2\right)^2+T_{\text{с}}^2\omega_2^2}{\left(T_{\text{к}}T_{\text{с}}\omega_2^2\right)^2+1}}, \quad (11)$$

где $\alpha_{\max}$ – амплитуда угла стабилизации; $M^x_{\text{в}\max}$, ω_1 – амплитуда и круговая частота возмущающего момента по оси стабилизации; $T_{\text{эмк}}$ – электромеханическая постоянная времени мотора коррекции; $T_{\text{к}}$, $T_{\text{с}}$ – постоянные времени контура коррекции и стабилизации; $\Delta\alpha_{1\max}$ – амплитуда погрешности ГМ; ω_2 – круговая частота колебания ГМ. Из уравнения (11) можно определить необходимый кинетический момент ОСГВ, а также качество подавления вредных колебаний ГМ.

Моделирование. Было проведено моделирование ОСГВ в среде MATLAB/Simulink с параметрами, часть из которых указана в табл. 1, по виртуальному тестовому треку. Погрешность угла стабилизации не превысила четырех угловых минут.

Таблица 1

Параметры моделирования

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$C_{\text{см}}$ (НмА$^{-1}$) = $C_{\text{се}}$ (Вс)	0,11	J_x	1,1·10^{-3} кг·м^2	$s_{\text{у}}s_{\text{ду}}$	410 В/рад
$C_{\text{км}}$ (НмА$^{-1}$) = $C_{\text{ке}}$ (Вс)	5,2·10^{-3}	max [$\lvert M_{\text{тр}}{}^x\rvert$]	0,5·10^{-2} Нм	$k_{\text{у}}k_{\text{ду}}$	580 В/рад
H	0,2 Нмс	max [$\lvert M_{\text{тр}}{}^z\rvert$]	0,8·10^{-4} Нм	γ	3°sin(6πt)
ml	9·10^{-4}кг·м	max [$\lvert M_{\text{тр}}{}^{\text{м}}\rvert$]	5·10^{-6} Нм	w_z	1,4 м/с^2·cos(6πt)
a_m	0,0086 Нмс	$T_{\text{с}}$; $T_{\text{к}}$	0,08 с; 2,5 с	ϑ	2·10^{-4}рад cos(8πt)
$J_{\text{м}}$	3·10^{-5} кг·м^2	$T_{\text{эс}}$; $T_{\text{эк}}$	5·10^{-4}с; 7,1·10^{-4}с	V	[20…60] км/ч
J_z	2,5·10^{-4} кг·м^2	$R_{\text{с}}$; $R_{\text{к}}$	18 Ом; 37 Ом	Кривизна пути	[0…1/300] м$^{-1}$

Заключение. 1. Предложена схема ГМ с динамической настройкой инвариантного к центростремительному ускорению. 2. На основе ГМ построена ОСГВ, не имеющая виражной погрешности при движении путеизмерителя в кривых. 3. Результаты предложенных технических решений и полученных параметров подтверждены моделированием с учетом реального движения путеизмерителя. 4. Дальнейшие исследования будут связаны с задачей создания оптимальной конструкции ГМ и вопросами синтеза контура стабилизации ОСГВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Плохоцкий М.А., Соломонов С.А., Толмазов А.Ф., Хабаров В.П.** Машины и механизмы для путевого хозяйства. Москва: Транспорт, 1970. 358 с.
2. **А. с. 790923** СССР, МПК G01C 19/44 (2006.01), G01C 21/18 (2006.01). Одноосный силовой горизонтальный гиростабилизатор: № 2778354 заявл. 26.03.1979: опубл. 07.01.1982 / Арутюнов С. С., Хохлов В. М. (СССР). Заявитель КАИ им. А. Н. Туполева. Бюл. № 1. 2 с.
3. **Патент №2676951** Российская Федерация, МПК G01C 7/04 (2006.01). Устройство для определения и регистрации взаимного положения рельсовых нитей в вертикальной плоскости: № 2017144318 заявл. 18.12.2017: опубл. 11.01.2019 / Кривошеев С. В., Гатауллина Д. Р.; заявитель КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева. 15 с.
4. **Вагон-путеизмеритель ЦНИИ-4**. Техническое описание. ЕИМН.663511.001 ТО. М., 1996.
5. **Гупалов В.И., Мочалов А.В., Боронахин А.М.** Аналитические гировертикали усеченного состава // Гироскопия и навигация. 2001. №2. С. 25–36.
6. **Клименко А.К., Парунакян В.Э., Волков С.А. и др.** Путеизмерительный комплекс // Промышленный транспорт. 1983. №10. С. 17.
7. **Патент №2716599** Российская Федерация, МПК G01C 7/04 (2006.01). Одноосный силовой горизонтальный гиростабилизатор: № 2019118392 заявл. 13.06.2019: опубл. 13.03.2020 / Кривошеев С. В., Лукин К. О.; заявитель КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева. 14 с.
8. **Патент №2719241** Российская Федерация, МПК G01C 7/04 (2006.01). Гироскопический маятник: № 2019118401 заявл. 13.06.2019: опубл. 17.04.2020 / Кривошеев С. В., Лукин К. О.; заявитель КНИТУ-КАИ им. А. Н. Туполева. 12 с.
9. **Нормы допускаемых скоростей** движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм федерального железнодорожного транспорта: издание официальное. Москва: Транспорт, 2001. 126 с.

S.V. Krivosheev (KNRTU–KAI, Kazan), K.O. Lukin (KNRTU–KAI, Kazan)

GYRO SYSTEM FOR RAILWAY TRACK CROSSLEVEL MEASUREMENTS

A gyro system for railway track crosslevel measurements with turn error rejection is proposed in this report. The main principle of the described solution is the use of a gyro pendulum with dynamic tuning based on the linear speed of a track recording car instead of a single axis pendulum sensitive element. The physical model of the gyro system consisted of a single axis powered vertical gyro with the gyro pendulum is presented, performance accuracy is considered. Simulation of the gyro system was also conducted.

А. В. БОЛЬШАКОВА, А. М. БОРОНАХИН, Д. Ю. ЛАРИОНОВ,
Л. Н. ПОДГОРНАЯ, А. Н. ТКАЧЕНКО, Р. В. ШАЛЫМОВ
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург)

ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ И ВЫБОРА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ ДЛЯ ЗАДАЧИ ДИАГНОСТИКИ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ

Использование микромеханических акселерометров для контроля движения объекта в большом диапазоне амплитуд и частот является сложной комплексной задачей. Во-первых, обеспечение предъявляемых к измерителям требований по точности во всем диапазоне амплитуд и частот может быть невозможно лишь одной моделью датчика. Может потребоваться сформировать так называемый «виртуальный акселерометр», использующий измерения от нескольких датчиков по определенным критериям. Во-вторых, использование традиционной схемы калибровки (в поле силы тяжести) может не дать корректных коэффициентов в математическую модель акселерометра – требуется проведение испытаний в условиях приближенных к эксплуатационным. На результаты этих же испытаний следует опираться и при выборе критериев достоверности показаний каждой из используемых в составе «виртуального акселерометра» моделей датчиков. Именно перечисленные особенности испытаний и выбора микромеханических акселерометров, проиллюстрированные на примере задачи использования инерциальных датчиков при диагностике рельсового пути, составляют суть настоящего доклада.

Введение. Предлагаемый доклад посвящен вопросам выбора и испытаний микромеханических акселерометров (ММА), применяемых для контроля движений объектов с повышенной динамикой. Примером такого рода объектов могут служить, например, элементы конструкции железнодорожного вагона. В этом случае может требоваться измерение ускорений в большом диапазоне как по амплитуде, так и по частоте воздействий. Традиционным подходом при выборе акселерометров является подбор одного датчика на измерительную ось, полностью закрывающего предъявляемые требования. Однако на выбор состава датчиков могут быть наложены дополнительные ограничения: помимо требований по точности измерений, значение часто имеют массогабаритные характеристики, энергопотребление, стоимость и др. Для решения задач такого уровня не всегда целесообразно (а порой и невозможно) использовать одну модель акселерометра. Изложенный ниже подход предполагает использование двух и более типов датчиков с перекрывающимися диапазонами измерений. В этом случае становится возможным (благодаря переключениям между датчиками) создать «виртуальный акселерометр», обеспечивающий требуемые характеристики.

Особенности выбора состава датчиков для контроля ускорений объектов с повышенной динамикой. Решение обозначенной выше задачи получения заданных характеристик во всем требуемом диапазоне на основании измерений от нескольких соосных акселерометров различных моделей будет проиллюстрировано в настоящем докладе на примере задачи выбора состава инерциальных измерительных модулей (ИИМ) малогабаритной инерциальной системы диагностики рельсового пути (МИСД РП), разработанной коллективом авторов [1, 2].

Требования к датчикам. Каждый из ИИМ (см. рис. 1) представляет собой набор микромеханических датчиков, установленных на жестком основании и защищенных внешним корпусом. ИИМ устанавливаются на крышках подшипников колес вагона (буксах) и предназначены для измерения ускорений, вызванных динамическим взаимодействием в системе «вагон – рельсовый путь» [2]. В первую очередь интерес представляют воздействия, вызванные прохождением колесом неровностей на поверхности катания рельса (импульсных и волнообразных дефектов, стыковых зазоров [3]). Для предъявления требований к измерителям необходимо учесть несколько моментов: рабочие скорости движения вагона, на котором будет установлена МИСД РП (определяются типом вагона и

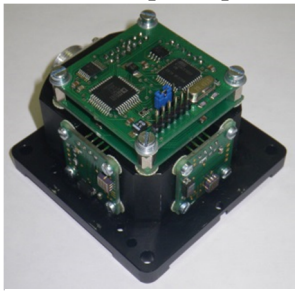
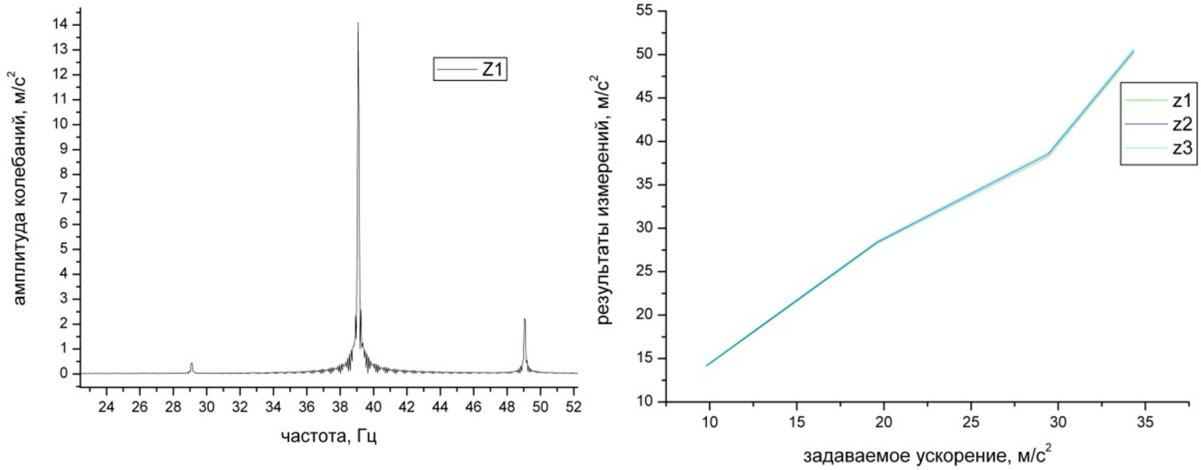


Рис. 1. Внешний вид ИИМ без корпуса

установленным на него дополнительным оборудованием); характеристики контролируемых дефектов (определяются нормативной документацией на содержание рельсового пути). Зная возможные амплитуды и длины волн контролируемых неровностей, можно сказать, какого порядка ускорения на буксе может вызывать их прохождение колесом на заданных скоростях, а также какую частоту будет иметь такое воздействие. Например, при прохождении неровности с длиной волны 30 см и глубиной 1 мм на скорости 80 км/ч вертикальное ускорение буксы колеса будет иметь амплитуду порядка 11 g и частоту 74 Гц. После рассмотрения всей совокупности значений амплитуд и частот порождаемых при прохождении всех предполагаемых к контролю типов неровностей рельсового пути можно предъявить требования к датчику – например, измерение амплитуд ускорений от 0,01 до 100 g в диапазоне частот 1 кГц. Следует отметить, что в том случае, когда предстоит выбор еще и микромеханических гироскопов в состав ИИМ, высокое значение приобретает параметр чувствительности этого датчика к ускорению.

Выбор состава датчиков и формирование «виртуального акселерометра». Опираясь на выработанные требования, можно осуществить подбор датчиков, которые удовлетворяли бы им по всем характеристикам, кроме диапазона измеряемых ускорений. Этот диапазон разбивается на несколько интервалов, каждый из которых должен закрыть отдельный датчик. Например, для удовлетворения приведенного диапазона в ±100 g можно использовать три модели датчиков: MMA1 на диапазон ±8g, MMA2 на диапазон ±50g и MMA3 на диапазон ±100g. Преимущество подобного подхода заключается в большей чувствительности и меньшей плотности шума MMA1 по сравнению с MMA2 в одном диапазоне ускорений (аналогично для MMA2 и MMA3) [4]. Интересной является задача определения критерия переключения между датчиками или определения коэффициентов достоверности их сигналов при различных условиях эксплуатации. Самым простым путем является переключение с одного датчика на другой при приближении к границе его диапазона измерений (например, при достижении 90% от максимально измеримого датчиком значения). Однако этот подход может оказаться не совсем корректен в конкретных условиях эксплуатации, т.к. разные модели датчиков могут по-разному себя вести при измерении одной и той же частоты воздействия (имеет свои динамические погрешности). Решить эту проблему возможно только при проведении соответствующих испытаний (в условиях, близких к условиям эксплуатации).

Вибрационная калибровка микромеханических акселерометров. При проведении калибровки во всем интересующем диапазоне частот и амплитуд воздействий становится возможным получить для каждого датчика набор выходных характеристик при разных частотах воздействий. А значит, можно получить более корректные коэффициенты математической модели измерений датчика (в частности, масштабный коэффициент) по сравнению с традиционной калибровкой в поле силы тяжести или даже на центрифуге. Помимо этого, можно оценить непостоянство масштабного коэффициента для каждого датчика при различных частотах входных воздействий (обычно связано с особенностями физической реализации конкретной модели акселерометра). Например, при проведении испытаний для акселерометра ADXL 278 фирмы Analog Devices на вибрационном стенде ST5000/300 при задании движения с частотой 40 Гц и амплитудой по ускорению 1 g был получен спектр сигнала, представленный на рис. 2, *а*. Хорошо видно, что центральный максимум (после применения к показаниям датчика полученного при калибровке в поле силы тяжести масштабного коэффициента) находится куда выше, чем задается стендом. Выходная характеристика этого датчика при воздействиях на частоте 40 Гц показана на рис. 2, *б*. По оси ординат приведены результаты измерений после применения к ним полученного при калибровке в поле силы тяжести масштабного коэффициента (три линии соответствуют трем датчикам одной и той же модели). Видно, что масштабный коэффициент, полученный на первой (традиционной) стадии калибровки, не является корректным для приведенного случая. Следует также отметить, что при проведении испытаний нескольких моделей ММА, входящих в состав ИИМ, такие испытания лучше проводить сразу в сборке, чтобы имелась возможность сравнить показания датчиков при абсолютно идентичном входном воздействии.



а) *б*)

Рис. 2. Показания акселерометра ADXL 278: (*а*) амплитудный спектр сигнала, (*б*) выходная характеристика акселерометра ADXL 278 на частоте 40 Гц (z1, z2, z3 – 1-й, 2-й, 3-й акселерометры)

Заключение. Проведенные исследования очередной раз подтвердили важность проведения испытаний инерциальных модулей в условиях, приближенных к условиям эксплуатации. Было показано, что результаты вибрационной калибровки на частотах, близких к частотам движения контролируемого объекта, могут существенно отличаться от коэффициентов, полученных при традиционной калибровке в поле силы тяжести. Учет этих отличий является значимым при использовании датчиков. В частности, при использовании нескольких моделей акселерометров при измерениях по одной измерительной оси достоверность сигнала каждого из них может быть определена исходя из результатов таких испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Larionov, D.Yu., Filatov, Yu.V., Boronahin, A.M., Podgornaya, L.N., Bokhman, E.D., Shalymov, R.V.,** Inertial System for Railway Track Diagnostics, Proceedings of the Symposium Inertial Sensors and Systems, DGON, Karlsruhe, Germany, September 2012, pp. 17.1–17.20.
2. **Боронахин А.М., Подгорная Л.Н., Бохман Е.Д., Филипеня Н.С., Филатов Ю.В., Шалымов Р.В., Ларионов Д.Ю**. Использование микромеханических чувствительных элементов в задачах диагностики рельсового пути // Гироскопия и навигация. 2012. № 1 (76). С. 57–66.
3. **Инструкция** «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов». Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» № 2499р от 23.10.2014.
4. **Таблица** выбора для категории Акселерометры | Analog Devices. URL: https://www.analog.com/ru/parametricsearch/11175#/ (обращение от 12 Августа 2020).

A.V. Bolshakova, A.M. Boronakhin, D.Yu. Larionov, L.N. Podgornaya, A.N. Tkachenko, R.V. Shalymov (Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», Saint Petersburg)

PECULIARITIES OF CHOOSING AND CALIBRATING MICROMECHANICAL ACCELEROMETERS FOR RAILWAY TRACK DIAGNOSTICS

Using micromechanical accelerometers for controlling an object's movement in a wide range of amplitudes and frequencies is a complex and sophisticated task. First, it might not be possible to meet the accuracy requirements imposed on the meters in the entire range of amplitudes and frequencies with just one sensor model. It might be necessary to design a so-called "virtual accelerometer" that would use measurements from several sensors according to certain criteria. Secondly, using the traditional calibration approach (within the gravity field) might not give the correct coefficients for the accelerometer's mathematical model; testing should be done under conditions close to operational ones. The results of these very tests should be used as foundation for choosing the reliability criteria for the readings of each of the sensor models used in the "virtual accelerometer". This article is focused on the aforementioned peculiarities of choosing and calibrating micromechanical accelerometers, illustrated by the example of using inertial sensors for railway track diagnostics.

А. М. БОРОНАХИН, А. В. ВЕЙНМЕЙСТЕР, П. А. ИВАНОВ, Е. С. СОЛЯНКО, А. Н. ТКАЧЕНКО
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина))

МЕТОД ОЦЕНКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ СТЕНДОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Основы построения современных систем ориентации и навигации заключаются в испытаниях и калибровке инерциальных датчиков измерительного модуля (ИМ) путем задания серии угловых позиционирований и вращений. Данные воздействия задают при помощи испытательных стендов, имеющих, в свою очередь, ряд инструментальных погрешностей, влияющих на точность калибровки объекта испытаний. Одной из таких погрешностей является нестабильность угловой скорости вращения осей стенда, оцениваемая, как правило, за полный оборот. В работе изложен метод оценки динамических погрешностей испытательных стендов, который позволяет повысить точность определения текущего углового положения осей стенда при их вращении с непостоянной угловой скоростью.

Традиционные методы испытаний и калибровки инерциальных датчиков угловой скорости и линейного ускорения базируются на использовании испытательных стендов, оснащенных климатическими термокамерами. Важной проблемой остается то, что, выдерживая нестабильность угловой скорости вращения осей стенда на уровне 0,0005-0,001% за полный оборот, «внутри оборота» заданная угловая скорость (ее внутриоборотная нестабильность) не контролируется. В силу особенностей построения моментных бесконтактных электроприводов, применяемых в современных испытательных стендах, внутриоборотная нестабильность угловой скорости вращения осей таких стендов, особенно на малых ее значениях (до 0,1°/с), может достигать 10%.

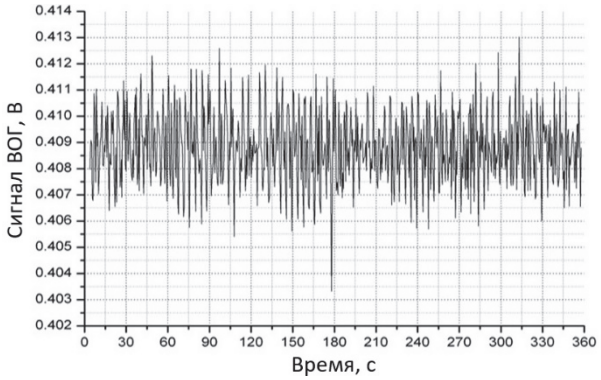


Рис. 1. Влияние внутриоборотной нестабильности угловой скорости на показания ВОГ

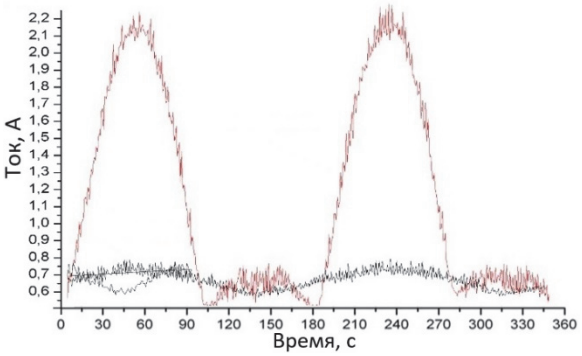


Рис. 2. Потребляемый электроприводом ток

На рис. 1 отображено влияние внутриоборотной нестабильности угловой скорости на показания одного из триады волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), измерительная ось которого была расположена параллельно плоскости горизонта. Вращение производилось с малой угловой скоростью вокруг горизонтальной оси двухосного испытательного стенда. Кроме того, данное вращение не было сбалансировано в достаточной степени специальными грузами. На рис. 2 показана зависимость тока электропривода оси вращения стенда от степени ее сбалансированности. Видно, что при наличии дебаланса оси потребляемый электроприводом ток существенно колеблется относительно уровня потребления в сбалансированной системе. В результате чего при низких значениях угловых скоростей система управления электроприводом оси стенда в полной мере не компенсирует внутриоборотную нестабильность ее вращения. Именно эти вариации действительной угловой скорости относительно заданной и приводят к зависимостям, показанным на рис. 1. Кроме того, следует понимать, что процесс балансировки осей стенда обычно выполняется на фиксированном значении угловой скорости, тогда как испытания датчиков осуществляются в более широких диапазонах, что может приводить к дополнительным погрешностям при калибровке ИМ.

Традиционные методы испытаний и калибровки инерциальных датчиков угловой скорости и линейного ускорения, предполагающие задание испытательным стендом серии угловых позиционирований и вращений, подробно изложены в источниках [1, 2]. Например, в [2] приведены соотношения, связывающие точностные характеристики испытательного стенда с величиной достижимой точности калибровки ИМ. Однако в ряде случаев возникают ситуации, в том числе связанные с внутриоборотной нестабильностью угловой скорости вращения осей стенда, когда принятая к использованию последовательность его входных воздействий не позволяет выявить проблемные участки во всем диапазоне работы ИМ. Для решения этой проблемы хорошо зарекомендовала себя на практике динамическая калибровка ИМ [3, 4], предполагающая работу испытательного стенда в режиме имитации движения объекта, на котором предполагается эксплуатация ИМ, с получением оценок его инструментальных погрешностей через построение классических схем интегрированных систем ориентации и навигации.

На рис. 3 приведены результаты работы одного из вариантов такого подхода в оценке смещения нулей триады микромеханических акселерометров (ММА), измерительные оси которых определяют приборную систему координат ИМ.

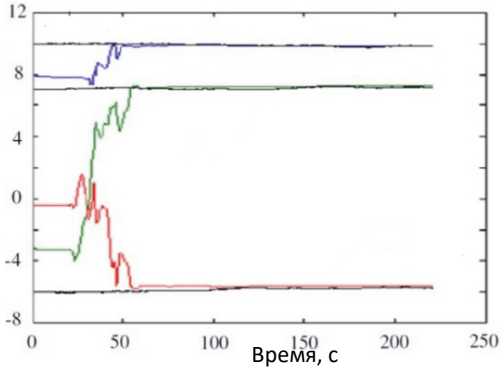


Рис. 3. Результат динамической калибровки смещения нулей триады ММА

При динамическом методе, помимо существенного сокращения длительности калибровки в сравнении с традиционными (статическими) методами, появляется возможность учета расположения датчиков внутри ИМ, что улучшает его функционал, особенно в случае использования на высокодинамичных объектах [5]. На фоне перспективности развития подобных схем остаются нерешенными вопросы влияния внутриоборотной нестабильности угловой скорости вращения осей испытательного стенда.

Существующие на сегодняшний день способы учета внутриоборотной нестабильности угловой скорости применяются исключительно в единичных образцах стендов и подразумевают включение в их состав прецизионных датчиков угловой скорости с целью формирования обратных связей в контур управления электроприводами осей стенда и учета нестабильности их вращения в каждый момент времени [6]. В большинстве случаев задача оценки инструментальных погрешностей испытательного стенда сводится к определению погрешностей цифровых преобразователей угла (ЦПУ), по показаниям которых и формируется информация как об углах поворота осей стенда, так и об угловой скорости вращения этих осей. Основным источником погрешности фотоэлектрических ЦПУ, массово применяемых в испытательных стендах, является временная задержка срабатывания фотоприемного устройства от меток угловой шкалы датчика на полном обороте. Эта так называемая динамическая погрешность фотоэлектрического ЦПУ будет иметь различное значение при различных угловых скоростях вращения оси, на которой этот ЦПУ установлен.

В работе рассматривается метод использования адаптированного стенда для бесконтактного измерения угловых перемещений (СБИУП), разработанного научной группой под руководством профессора Ю.В. Филатова на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ», для оценки динамических погрешностей фотоэлектрических ЦПУ в составе испытательного стенда. Метод позволяет повысить точность определения текущего углового положения осей испытательного стенда при их вращении с непостоянной угловой скоростью.

Заключение. Предлагаемый в работе метод метрологической поверки динамических погрешностей фотоэлектрических ЦПУ, являющихся в испытательном стенде основным источником информации о текущих значениях угла и угловой скорости, позволяет усовершенствовать методики динамических испытаний и калибровки инерциальных датчиков, ИМ и систем на их основе.

«Проведенные исследования осуществлены при поддержке гранта РНФ №20-19-00412»

ЛИТЕРАТУРА

1. **IEEE Recommended Practice for Inertial Sensor Test Equipment**, Instrumentation, Data Acquisition, and Analysis: IEEE Std 1554, 2005, 115 p.
2. **Ткаченко А.Н.** Разработка и исследование средств измерения угловых параметров сейсмических колебаний на базе волоконно-оптических гироскопов. Диссертация кандидата технических наук на соискание научной степени. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 139 с.
3. **Дао Ван Ба.** Динамический метод исследования погрешностей триады микромеханических акселерометров. Диссертация кандидата технических наук на соискание научной степени. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010.113 с.
4. **Емельянцев Г.И., Блажнов Б.А., Драницина Е.В., Степанов А.П.** О калибровке измерительного модуля прецизионной БИНС и построении связанного с ним географического трехгранника // Гироскопия и навигация. 2016. № 1. С. 36–48.
5. **Калихман Д.М.** Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2008. 296 с.
6. **Анисимов С.А., Боронахин А. М., Вейнмейстер А.В., Иванов П.А.** Концепция построения испытательного оборудования для калибровки систем ориентации и навигации. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 131 с.

A.M. Boronahin, A.V. Veinmeister, P.A. Ivanov, E.S. Solyanko, A.N. Tkachenko (St. Petersburg state electrotechnical University «LETI» them. V.I. Ulyanova (Lenin))

METHOD FOR ASSESSING DYNAMIC ERRORS OF TEST BENCHES DESIGNED FOR CALIBRATION OF INERTIAL SENSORS

The construction of modern orientation and navigation systems is based on testing and calibration of inertial sensors of the measuring module (IM), specifying angular positioning and rotation. These moves are set using test benches. Test benches have tool errors that affect the accuracy of calibration of the test object. One of these errors is the instability of the angular speed of rotation of the benches axes. This error is usually estimated as an average per turnover. This article describes a method for estimating the dynamic errors of test benches. The method increases the accuracy of determining the angular position of the stand axes when they rotate at instability angular speed.

Ю. Г. ЕГОРОВ
(МГТУ имени Н. Э. Баумана, г. Москва)

Г. Ю. КИРЯЧЕНКО, Е. А. ПОПОВ
(АО «ЦНИИАГ», г. Москва)

СУБОПТИМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ПРОГРАММЫ КАЛИБРОВКИ БЛОКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ

В докладе приводятся результаты анализа применения генетического оптимизационного алгоритма для программ калибровки, состоящих из 9 и 18 измерительных положений. Результаты математического моделирования и натурного эксперимента подтверждают эффективность применения полученных программ калибровки.

Введение. Современные системы управления летательными аппаратами, как правило, содержат в своем составе инерциальную навигационную систему (ИНС), являющуюся автономным средством определения координат и ориентации. Зачастую ИНС комплексируется с другими навигационными системами, например спутниковыми. Точность решения навигационной задачи (автономной или комплексированной) в любом случае зависит от инструментальных погрешностей чувствительных элементов ИНС: акселерометров и датчиков угловых скоростей.

Для устранения систематических инструментальных погрешностей блока акселерометров (БА) ИНС проводится процедура калибровки, которая может быть организована с помощью различных методов. Одним из таких методов является инвариантная относительно погрешностей испытательного оборудования методика калибровки, основа которой заключается в вычислении по показаниям БА модуля вектора ускорения силы тяжести в различных измерительных положениях (ИП) и сравнении его с известным для места проведения калибровки значением [1–8].

В представленном докладе авторы предлагают решение задачи выбора ИП с помощью генетических поисковых алгоритмов [9] с целью оптимизации по одному или нескольким критериям (параметрам). Основной целью работы является определение эффективности генетического алгоритма в сравнении с другими подходами по формированию программ калибровки.

Задача оптимизации. Суть инвариантного подхода заключается в формировании математической модели измерений БА, которая представляет собой либо композицию измерений триады акселерометров, приведенную к вертикальной оси географической системы координат [4–8], либо скалярное произведение вектора измерений БА на самого себя [1–3]:

$$\bar{J}_1(i) = \frac{\bar{W}(i)\bar{\eta}(i)}{\|\bar{g}\|} - 1, \qquad (1)$$

$$\bar{J}_2(i) = \frac{\bar{W}(i)\bar{W}(i)}{\|\bar{g}\|^2} - 1,$$

где $\bar{J}_{1,2}(i)$ – нормированные композиции измерений БА в i-м ИП; $\bar{W}(i) = \left(W_x(i)\ W_y(i)\ W_z(i)\right)^T$ – вектор измерений БА в i-м ИП; W_j – измерения j-го акселерометра ($j = x, y, z$); $\bar{\eta}(i) = \left(\eta_x(i)\ \eta_y(i)\ \eta_z(i)\right)^T$ – вектор, составленный из направляющих косинусов вертикали в осях приборного трехгранника в i-м ИП; η_j – направляющие косинусы вертикали относительно j-й оси приборного трехгранника ($j = x, y, z$); $\|\bar{g}\|$ – модуль вектора ускорения силы тяжести (УСТ).

Математическая модель измерений БА в i-м положении может быть приведена к следующему линейному виду:

$$J(i) = h(i)\bar{X} + \varepsilon(i) + \omega(i), (i = \overline{1, N}), \qquad (2)$$

$$h(i) = \left(\eta_x(i)\ \ \eta_y(i)\ \ \eta_z(i)\ \ \eta_x(i)^2\ \ \eta_y(i)^2\ \ \eta_z(i)^2\ \ \eta_x(i)\eta_y(i)\ \ \eta_x(i)\eta_z(i)\ \ \eta_z(i)\eta_y(i)\right),$$

$$\bar{X} = \left(\Delta_x\ \Delta_y\ \Delta_z\ \delta k_x\ \delta k_y\ \delta k_z\ \gamma_{xy}\ \gamma_{xz}\ \gamma_{zy}\right)^T,$$

где $h(i)$ – матрица измерений (это не вся матрица, а лишь ее строка); $\bar{X}$ – вектор инструментальных погрешностей БА; Δ_j – нормированное смещение нуля j-го акселерометра ($j = x, y, z$);

δk_j – погрешность масштабного коэффициента j-го акселерометра ($j = x, y, z$); $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{zy}$ – углы неортогональности осей чувствительности акселерометров; $\varepsilon(i)$ – нелинейная составляющая измерения; $\omega(i)$ – случайная составляющая измерений; N – количество измерительных положений.

В рамках данного доклада влияние нелинейной составляющей измерений $\varepsilon(i)$ считается пренебрежимо малым, а случайные составляющие измерений $\omega(i)$ – несмещенными независимыми случайными величинами, имеющими нормальный закон распределения и дисперсию σ_ω^2. Вектор $\bar{X}$ считается постоянным во времени.

Оценка вектора $\bar{X}$ может быть получена посредством метода наименьших квадратов (МНК):

$$\hat{\bar{X}} = (H^T H)^{-1} H^T \bar{J}, \tag{3}$$

$$H = \begin{pmatrix} h(1) & h(2) & \dots & h(N) \end{pmatrix}^T, \quad \bar{J} = \begin{pmatrix} J(1) & J(2) & \dots & J(N) \end{pmatrix}^T,$$

где H –матрица измерений; $\bar{J}$ – вектор измерений.

Статистические параметры (дисперсии и коэффициенты корреляции) погрешностей оценок $\hat{\bar{X}}$, полученных с помощью (3), зависят как от непосредственно дисперсии случайной составляющей измерений σ_ω^2, так и от выбора измерительных положений. В рамках данного доклада рассматривается влияние на точность только выбора измерительных положений. Следует заметить, что не любой набор ИП обеспечивает разрешимость уравнения (3). Программой калибровки будем называть только такие наборы ИП, при использовании которых это условие выполняется.

Под задачей оптимизации программы калибровки будем понимать нахождение углов ориентации $\vec{\alpha} = (\alpha_{11} \;\; \alpha_{12} \;\; \dots \;\; \alpha_{N1} \;\; \alpha_{N2})^T$, задающих ИП (рис. 1), которые обеспечивают минимум значения целевой функции Ξ:

$$\bar{\alpha}_{opt} = \arg\min \Xi(\bar{\alpha}). \tag{4}$$

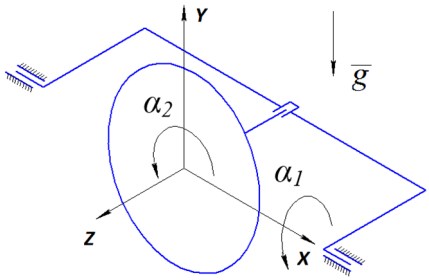


Рис. 1. Кинематическая схема задания измерительного положения

Рассматриваемую задачу выбора ИП при калибровке БА можно отнести к задачам планирования эксперимента [10], в которых для оценки точности используют целевую функцию $D = det(K)$, где $K = (H^T H)^{-1}$. В принятом случае независимости и нормальности ошибок измерений $\omega(i)$ определитель D характеризует обобщенную дисперсию ошибок оценок вектора $\hat{\bar{X}}$, полученную с помощью (3), так как матрица ковариации ошибок оценок выражается как $K \cdot \sigma_\omega^2$. Диагональные же элементы матрицы K выражают нормированные по уровню шума измерений дисперсии ошибок соответствующих элементов вектора оцениваемых параметров.

В настоящем докладе оптимизация программы калибровки проводится минимизацией целевой функции $\Xi = D$.

Алгоритм оптимизации. Для решения поставленной задачи оптимизации применяется генетический алгоритм. Генетический алгоритм – способ поиска оптимума целевой функции, основанный на модели естественного отбора Ч. Дарвина [11]. Принцип данного алгоритма основан на модификации исходной популяции (набора некоторого числа особей) с использованием методов эволюции, таких как наследование, мутация, кроссинговер с последующей селекцией.

Применительно к поставленной задаче особь – это набор ИП, определяемый количеством положений БА N и двумя углами ориентации α_1, α_2 каждого положения. Исходная популяция –

набор случайных особей, т.е. векторов, составленных из $2N$ случайных чисел с равномерным распределением из диапазона [0; 2π].

Генетический алгоритм имеет циклическую структуру. На очередном цикле алгоритма производится скрещивание каждой особи ξ исходной популяции с другой, случайно выбранной и отличной от ξ. Перед скрещиванием вторая особь подвергается мутации по следующей формуле:

$$\zeta = C_k + K_M \cdot (C_m - C_n),$$

где C_k, C_m, C_n – случайные и отличные между собой и от ξ особи исходной популяции,
K_M – коэффициент силы мутации (выбирается из отрезка [0;1]).

Скрещивание проводится следующим образом. Потомок наследует очередной генетический признак (элемент вектора) от особи-родителя ζ с вероятностью P_M (вероятность мутации), а от ξ – с вероятностью $P = 1 - P_M$. Фактически $2N$ раз разыгрывается бинарная случайная величина с математическим ожиданием P_M. Для единичных ее значений происходит наследование искаженного генетического признака от особи ζ, а для нулевых значений – наследование от ξ.

Селекция осуществляется также на каждом шаге алгоритма. В следующее поколение отбираются родители или потомки с минимальным значением целевой функции. Размер популяции при этом сохраняется. Программная реализация селекции выглядит следующим образом: общий массив родителей и потомков сортируется по возрастанию значения целевой функции, в следующее поколение отбирается первая половина этого массива. Завершение цикла происходит при выполнении, когда среднеквадратическое отклонение популяции (каждого из углов у особей) не превосходит некоторой пороговой величины ε. Это означает нахождение всех особей в окрестности точки экстремума, которая является субоптимальным решением поставленной задачи.

Следует отметить, что выбранный алгоритм дифференциальной эволюции является устойчивым по способу построения. Вне зависимости от распределения значений целевой функции среди особей в одной популяции (и предков, и потомков) отбор пройдет только половина из них, и если значение целевой функции у всех потомков окажется хуже (больше) предков, то в следующую итерацию перейдут только предки, таким образом, значение целевой функции никогда не увеличивается.

Также из-за выбора способа формирования мутации как разности двух особей нет необходимости регулировать ее величину при близости к экстремуму, так как при спуске в область минимума разница между особями в популяции тоже уменьшается.

На рис. 2 приведен характер сходимости алгоритма. Видно, что уменьшение целевой функции происходит не плавно, а имеет явно выраженные эволюционные переходы.

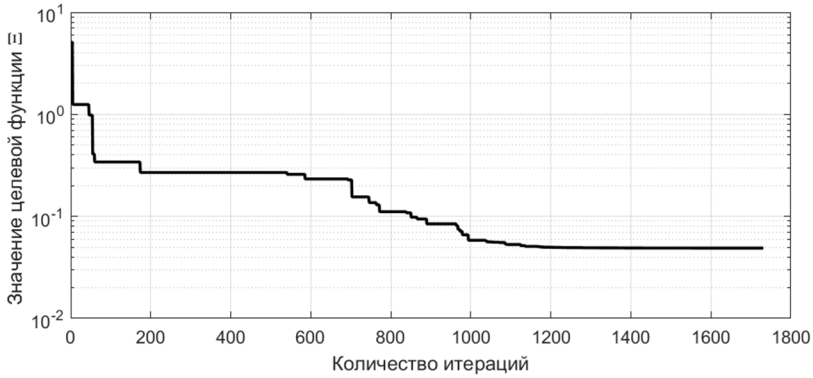


Рис. 2. Характерный график зависимости значения целевой функции

Результаты синтеза программ калибровки. Ниже приведены результаты работы алгоритма оптимизации программ калибровки из 9 и 18 ИП.

Общие параметры настройки алгоритма:

- количество особей в популяции *Np* = 100;
- коэффициент силы мутации $K_M = 0{,}85$;
- вероятность мутации $P_M = 0{,}9$;

- выход из цикла осуществлялся при достижении ε < 0,0029;
- количество измерительных положений в программах выбиралось равным 9 (минимальное возможное количество для разрешения системы (3)) и 18 (наиболее распространенные программы калибровки).

Таблица 1

Сравнительная таблица программ калибровки из 9 ИП

№	Набор ИП	D	σ		
			Δ	δk	γ
1	9 ИП, результат работы алгоритма	0,0489	0,59	0,93	1,35
2	9 ИП, рассмотренная в [8]	0,7119	0,71	0,71	2,74
3	9 ИП, рассмотренная в [5]	1,0000	0,71	0,71	2,64

Таблица 2

Сравнительная таблица программ калибровки из 18 ИП

№	Набор ИП	D	σ		
			Δ	δk	γ
1	18 ИП, результат работы алгоритма	7,8E-5	0,41	0,58	0,91
2	18 положений, рассмотренная в [5]	8,6E-5	0,41	0,53	1,00
3	18 положений, рассмотренная в [6]	1,3E-4	0,41	0,48	1,15

В таблицах 3, 4 приведены значения углов α_1, α_2 для полученных в ходе работы генетического алгоритма программ калибровки.

Таблица 3

Значения углов ориентации 9 ИП, полученных в результате работы алгоритма

№ ИП	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α_1, ^{0}	22,2	59,4	144,6	151,3	253,1	323,4	333,0	347,5	355,7
α_2, ^{0}	351,7	78,5	9,5	93,7	292,8	312,3	221,8	53,1	128,4

Таблица 4

Значения углов ориентации 18 ИП, полученных в результате работы алгоритма

№ИП	1	2	3	4	5	6	7	8	9
α_1, ^{0}	7,1	11,7	23,0	30,5	34,1	39,2	80,6	122,6	159,9
α_2, ^{0}	145,4	266,1	75,1	351,1	236,6	330,4	202,9	282,8	5,2
№ИП	10	11	12	13	14	15	16	17	18
α_1, ^{0}	206,2	267,1	309,6	318,7	322,1	332	341,3	341,8	360
α_2, ^{0}	195,7	317,6	90,8	230,0	328,8	197,3	118,8	293,8	46,7

Физическая интерпретация полученных программ калибровки может быть проиллюстрирована на примере сравнения отсортированных по возрастанию значений элементов матрицы H, соответствующих оптимизированной (рис. 3) и неоптимизированной (рис. 4) программам калибровки из 18 ИП.

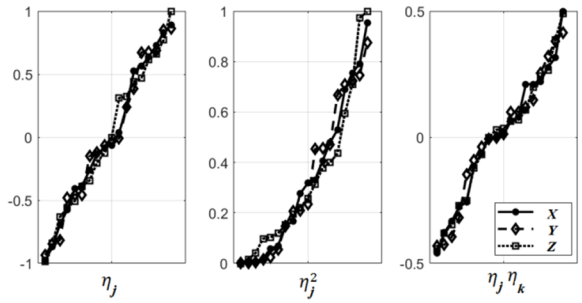


Рис. 3. Отсортированные значения матрицы H оптимизированной программы из 18 ИП

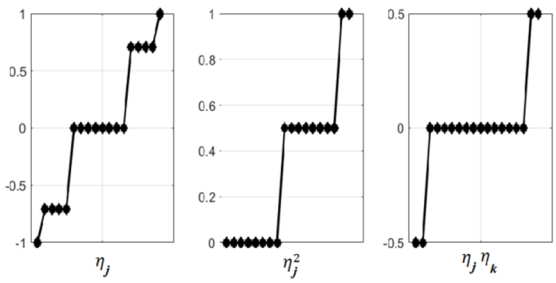


Рис. 4. Отсортированные значения матрицы *H* программы из 18 ИП, рассмотренной в [5]

Видно, что в оптимизированной программе значения элементов матрицы *H* более равномерно заполняют свою область допустимых значений, возможно, именно это и приводит к сокращению обобщенной дисперсии ошибок оценок.

Результаты математического моделирования. Для подтверждения достижения лучшего качества оценок (меньшей дисперсии оценок) ниже приводятся описание и результаты численного моделирования процедуры калибровки при выборе различных программ калибровки.

Моделирование проводилось методом Монте-Карло. В каждом испытании случайным образом задавались смещения нулевых сигналов Δ, отклонения масштабных коэффициентов δk, направляющие косинусы осей чувствительности φ относительно платформы стенда, случайные составляющие измерений ω, ошибки задания (знания) ориентации ψ и ошибка знания истинного значения модуля ускорения силы тяжести Δg. Все случайные величины задавались как несмещенные, независимые, нормально распределенные.

Количество испытаний для каждой программы калибровки было равно 20000. Задаваемые значения СКО параметров имели следующие значения: $\sigma_\Delta = 10^{-4}$ g; $\sigma_{\delta k} = 10^{-4}$ отн. ед.; $\sigma_\varphi = 10^{-4}$ рад; $\sigma_\psi = 10^{-4}$ рад; $\sigma_\omega = 10^{-5}$ g; $\sigma_{\Delta g} = 10^{-7}$ g.

В каждом испытании вычислялась ошибка оценки: разница между заданным значением параметров БА и их оценкой, полученной по МНК. По накопленному массиву ошибок вычислялись опытные СКО, на основе которых рассчитывались параметры s_Δ, $s_{\delta k}$, s_γ, аналогичные теоретическим σ_Δ, $\sigma_{\delta k}$, σ_γ, а также неравноточности. Результаты приведены в табл. 5.

Таблица 5

Сравнительная таблица результатов математического моделирования

№	Набор ИП	$s \cdot 10^5$		
		Δ, g	*Δk, отн. ед.*	*γ, рад*
1	9 ИП, результат работы алгоритма	0,59	0,94	1,35
2	9 ИП, рассмотренная в [8]	0,72	0,71	2,76
3	9 ИП, рассмотренная в [5, 6]	0,71	0,71	2,66
4	18 ИП, результат работы алгоритма	0,41	0,58	0,91
5	18 ИП, рассмотренная в [5]	0,41	0,53	1,01
6	18 ИП, рассмотренная в [7]	0,41	0,48	1,16

Видно, что СКО ошибок оценок s_Δ, $s_{\delta k}$, s_γ, полученные в ходе моделирования, близки со значениями σ_Δ, $\sigma_{\delta k}$, σ_γ, умноженными на σ_ω. Таким образом, результаты математического моделирования подтверждают полученные ранее теоретические характеристики программ калибровки.

Результаты натурного эксперимента. Для большей уверенности в полученных результатах был проведен натурный эксперимент с БА, построенным на базе маятниковых компенсационных акселерометров.

Для эксперимента были выбраны по две программы калибровки из 9 ИП и по две из 18 ИП. Дополнительно для оценки качества проведенной калибровки были набраны измерения еще в 50 тестовых положениях.

После получения оценок $\hat{\bar{X}}$ по набору ИП, соответствующему каждой программе калибровки, эти результаты были применены к тестовой выборке и получены невязки:

$$\delta J = J_{50} - H_{50}\hat{\bar{X}},$$

где J_{50} – измеренные значения модуля ускорения силы тяжести на тестовой выборке, H_{50} – соответствующая матрица измерений.

Затем был рассчитан коэффициент детерминации [12], показывающий, какую долю в дисперсии исходных измерений можно скомпенсировать с помощью полученных оценок:

$$R^2 = 1 - \frac{s_{\delta J}^2}{s_{J_{50}}^2},$$

где $s_{\delta J}^2$ и $s_{J_{50}}^2$ – СКО невязок и измеренных значений на тестовой выборке.

Опыт был повторен 4 раза, результаты приведены в табл. 6.

Таблица 6

Сравнительная таблица результатов натурного эксперимента

№	Набор ИП	Значения R^2 для четырех экспериментов			
1	9 ИП, результат работы алгоритма	0,9956	0,9958	0,9964	0,9959
2	9 ИП, рассмотренная в [8]	0,9864	0,9893	0,9842	0,9907
3	18 ИП, результат работы алгоритма	0,9973	0,9979	0,9977	0,9977
4	18 ИП, рассмотренная в [5]	0,9952	0,9977	0,9956	0,9962

Для всех четырех экспериментов верно, что оптимизированные программы дают оценки, применение которых к контрольной выборке компенсирует большую часть погрешности, нежели оценки, полученные по программам с тем же числом ИП, выбранные для сравнения.

В целом результаты натурного эксперимента подтверждают эффективность применения генетического алгоритма оптимизации для синтеза программ калибровки БА.

Заключение. Предложенный субоптимальный алгоритм синтеза программ калибровки блока акселерометров на основе генетического оптимизационного алгоритма (дифференциальной эволюции) был успешно применен для синтеза программ калибровки из 9 и 18 измерительных положений. Оценки, полученные с использованием этих программ, обладают меньшей теоретической обобщенной погрешностью. Математическое моделирование подтверждает полученные теоретические соотношения, а натурный эксперимент показывает эффективность применения полученных программ калибровки.

Рассмотренный способ синтеза программ калибровки может быть полезен в более сложных случаях (при наличии ограничений, неравноточности измерений, расширенной модели погрешностей), когда аналитическое решение может быть затруднено.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Измайлов Е.И. и др.** Скалярный способ калибровки и балансировки бесплатформенных инерциальных навигационных систем // Материалы XV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. 2008. С. 145–155.
2. **Тарановский Д.О.** Стендовая калибровка блока маятниковых поплавковых акселерометров корабельной инерциальной навигационной системы // Гироскопия и навигация. 2008. № 4 (63). С. 65.
3. **Аврутов В.В., Головач С.В., Мазепа Т.Ю.** О скалярной калибровке инерциального измерительного модуля // Материалы XIX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным системам. 2012. С. 113–118.
4. **Голован А.А., Парусников Н.А.** Математические основы навигационных систем. Часть II. Приложения методов оптимального оценивания к задачам навигации. М: Издательство Московского университета, 2008. 151 с.
5. **Акимов П.А., Деревянкин А.В., Матасов А.И.** Гарантирующий подход и l1 аппроксимация в задачах оценивания параметров БИНС при стендовых испытаниях. М.: Издательство Московского университета. 2012. 296 с.
6. **Егоров Ю.Г, Дзуев А.А., Попов Е.А.** Синтез программ калибровки блока акселерометров БИНС при инвариантном подходе // Гироскопия и навигация. 2019. №1 (104). С. 61–69.
7. **Егоров Ю.Г., Попов Е.А.** Исследование минимально избыточных программ калибровки триады акселерометров // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 6. С. 3–8.

8. **Егоров Ю.Г., Попов Е.А.** Выбор измерительных положений в задаче калибровки блока акселерометров ИНС // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб., 2018. С. 8–16.
9. **Kenneth Price, Rainer Storn**, Differential Evolution [Электронный ресурс], Dr. Dobb's Journal, 1997. URL: www.drdobbs.com/database/differential-evolution/184410166 (дата обращения: 15.01.2019).
10. **Математическая теория** планирования эксперимента / под ред. С.М. Ермакова. М.: Наука, 1983. 392 с.
11. **Charles Darwin, M.A.,** On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life, London: John Murray, Albemarle street, 1859, 502 p.
12. **Draper, N. R., Smith, H.,** Applied Regression Analysis, Wiley-Interscience, 1998, 706 p.

Y.G. Egorov (Bauman Moscow State Technical University, Moscow), G.Y. Kiryachenko, E.A. Popov (CSRI of Automatics and Hydraulics, Moscow)

SUBOPTIMAL ALGORITHM FOR ACCELEROMETER SENSOR UNIT CALIBRATION

The paper shows the results of genetic optimization algorithm appliance for strapdown calibration procedure that contents 9 and 18 sensor positions. The positive effect of the calibration procedure is verified by mathematical modeling and tests.

Д. О. ТАРАНОВСКИЙ
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

КРАТКИЙ АНАЛИЗ ЖУРНАЛЬНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ИНЕРЦИАЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МЕЖДУНАРОДНЫХ БАЗ НАУЧНОГО ЦИТИРОВАНИЯ

В докладе представлены результаты анализа цитируемости публикаций, посвященных инерциальным методам навигации и использованию гироскопических чувствительных элементов в различных применениях. Приведены данные о статьях этого направления, лидирующих по количеству цитирований в базе Scopus. Среди рассматриваемых характеристик – тематика статей и их распределение по журналам, странам и др. Проанализированы сто самых высокоцитируемых публикации за последние пять лет. В заключение приведены сведения об особенностях и цитируемости публикаций в наиболее известных журналах, специализирующихся в области навигационной тематики.

Введение. Наукометрические методы позволяют анализировать тенденции развития исследовательской деятельности различными методами [1]. Можно рассматривать количество публикуемых статей по определенным тематикам или в конкретном журнале, количество цитирований статей и др. Это позволяет выявить наиболее актуальные направления исследований. Доклад посвящен анализу цитирования публикаций по инерциальным методам навигации и использованию гироскопических чувствительных элементов в различных применениях. При этом рассматривались публикации как в журналах, специализирующихся на указанной тематике, так и в изданиях широкого спектра научных направлений.

База научного цитирования Scopus имеет наиболее широкий охват периодических научных изданий, поэтому основная часть анализа проводилась с ее использованием. В качестве основных критериев поиска было выбрано сочетание терминов "inertial", "navigation", "gyroscope" и "sensor" в названии, аннотации или ключевых словах источника. Таким образом, рассмотрение ограничивалось публикациями, посвященными инерциальным методам навигации и использованию гироскопических чувствительных элементов в связанных с навигацией применениях. Тематика глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) требует отдельного анализа. Отчасти этот вопрос затронут во второй части доклада, где проанализированы публикации наиболее известных журналов навигационной направленности.

Обзор наиболее цитируемых публикаций. Поиск дал более 15 тыс. публикаций с 1956 г. по 2020 г. Наибольшее количество цитирований – 1781 имеет статья [2], посвященная исследованиям в области автономного управления автомобилем с использованием интегрированной системы навигации. Эта же статья лидирует по количеству цитирований в год. Она дала толчок многочисленным исследованиям благодаря тому, что массивы данных, содержащие видеозаписи, данные всех датчиков и другую информацию, размещены авторами в открытом доступе на сайте Технологического университета Карлсруе, (Karlsruhe Institute of Technology, Germany).

Наиболее высокие показатели цитирований имеют статьи, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

№	Название статьи	Количество цитирований	Цитирований в год
1.	**Geiger, A., Lenz, P., Stiller, C., Urtasun, R.,** Vision meets robotics: The KITTI dataset, International Journal of Robotics Research, 2013, pp. 1231–1237	1781	**254**
2.	**Yazdi, N., Ayazi, F., Najafi, K.,** Micromachined inertial sensors, Proceedings of the IEEE, 1998, pp. 1640–1658	1513	**69**
3.	**Sandwell, D.T., Smith, W.H.F.,** Marine gravity anomaly from Geosat and ERS 1 satellite altimetry, Journal of Geophysical Research B: Solid Earth, 1997, pp. 10039–10054	1433	**62**

Наибольший интерес для понимания сегодняшней ситуации представляют публикации, вышедшие за последние 5 лет (2015–2019 гг.). Их общее число составило более 5 тыс. Наибольшее количество статей опубликовано в журналах, представленных на рис. 1. Безусловными ли-

дерами по количеству публикаций являются авторы из Китая, на которых приходится более 2,5 тыс. статей. Далее следуют США, Южная Корея и Германия. Россия занимает десятое место с 156 публикациями.

Анализ 100 наиболее цитируемых работ за рассматриваемый период времени показал, что основная часть из них опубликована двумя издателями: IEEE (38 статей) и MDPI (18 статей). Среднее количество цитирований статей первой сотни составило 96,3 (26 цитирований в год).

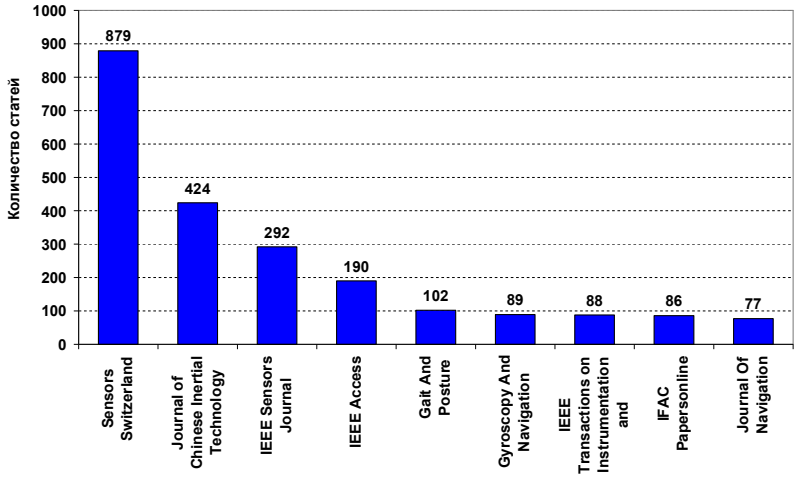
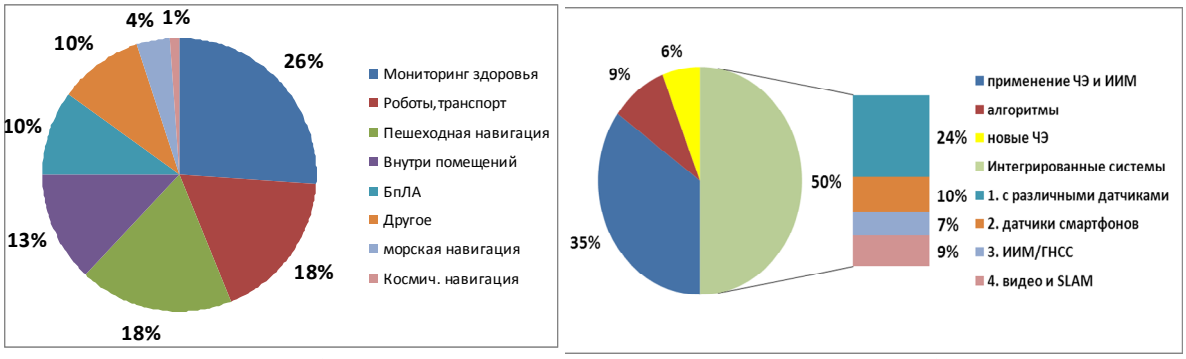


Рис. 1. Распределение статей по журналам

Распределение статей по сферам применения и по основным исследующимся в них технологиям и методам представлено на рис. 2.



а) б)

Рис. 2. Сферы применения и основные технологии и методы, рассматривающиеся в статьях

На диаграмме рис. 2, *а* видно, что значительное количество высокоцитируемых публикаций (26%) посвящено мониторингу здоровья человека, анализу его движений [3–5] и перемещений, а также навигации пешехода в различных условиях (18%). Именно с этими приложениями в значительной мере связаны работы (35%), изучающие алгоритмы и методы применения готовых чувствительных элементов (ЧЭ) и инерциальных измерительных модулей (ИИМ) (см. правую диаграмму на рис. 2), а также исследования (10%) по использованию возможностей смартфонов [6].

Основным направлением развития (около 50% статей) современной навигации, безусловно, является интеграция инерциальных датчиков с датчиками любых другими физических величин, которые могут дать дополнительную информацию (рис. 2, *б*). Интеграция инерциальных модулей с ГНСС ныне является стандартной основой таких систем и отдельно рассматривается лишь в 7% статей. Среди наиболее популярных направлений (9% статей) видеоинерциальная одометрия и методы одновременной локализации и построения карты (simultaneous localization and mapping (SLAM)) [7, 8]. Интегрированные измерительные системы играют значительную роль и в приложениях, связанных с активностью человека. В статье [9] представлен обзор исследований, в которых визуальные и инерциальные датчики используются совместно для эффективного распознавания действий человека.

Особенно актуальна задача интеграции различных датчиков при навигации внутри помещений. В [10] приведен обзор методов, применяющихся в системах пешеходной навигации.

Несколько статей посвящено системам, имеющим применение в морской навигации. Наибольший интерес в этом направлении вызвала статья о калибровке ИНС с использованием автокомпенсационного движения инерциального измерительного модуля [11].

Отдельно следует упомянуть наиболее цитируемые статьи, посвященные разработке инерциальных ЧЭ. В двух из них рассматривается гироскоп на холодных атомах [12, 13], волоконно-оптический микрогироскоп, в котором используются встречные лазеры на эффекте Бриллюэна [14], МЭМС-акселерометр [15] и др.

Анализ публикаций в тематических журналах. По рассматриваемой в данном докладе тематике издается четыре специализированных журнала, имеющие достаточно длительную историю и авторитет в научном сообществе. Была проанализирована тематика пятидесяти наиболее высокоцитируемых статей в каждом из этих них за последние пять лет (2015–2019 гг.). Распределение статей по тематике представлено в табл. 2. В скобках, после названия журнала, приведено среднее количество цитирований этих статей.

Таблица 2

Тематика публикаций специализированных журналов по навигации

Журнал (среднее кол-во цитирований статей) / Тематика статей, процент публикаций по теме	**Navigation,** Journal of the Institute of Navigation **(5,7)**	**Journal of Navigation,** Cambridge University Press **(6,4)**	**Gyroscopy and Navigation (2,7)**	**Journal of Chinese Inertial Technology (JCIT) (2,1)**
Инерциальные навигационные системы: алгоритмы и методы	–	–	**20%**	**18%**
Инерциальные ЧЭ: разработка и исследование	**4%**	**2%**	**18%**	**12%**
Интегрированные системы: разработка и применение	**16%**	**20%**	**24%**	**48%**
ГНСС	**72%**	**14%**	**10%**	–
Обработка информации в навигационных приложениях	**8%**	**12%**	**6%**	**16%**
Судовождение, Е-навигация	–	**50%**	–	–
Гравиметрия	–	–	**12%**	–
Разное	–	**2%**	**12%**	**8%**

Из таблицы видно, что основная тематика журнала Navigation связана с разработкой и применением глобальных спутниковых навигационных систем. Статьи посвящены главным образом системам GPS и BeiDou. Специализация Journal of Navigation – вопросы судовождения и развитие автоматизации управления судном, обеспечение надежности и безопасности мореплавания и другие задачи, объединяемые концепцией Е-навигации. Журнал Gyroscopy and Navigation имеет наиболее широкий охват тем статей, которые можно отнести к высокоцитируемым. Опубликованные в данном журнале статьи, связанные с разработкой инерциальных навигационных систем различного назначения, имеют больший шанс быть процитированными другими авторами, чем статьи в двух предыдущих журналах. Тем не менее среднее количество цитирований статей значительно ниже. Журнал JCIT отличается тем, что публикует статьи, посвященные широкому спектру интегрированных навигационных систем. При этом необходимо отметить, что это издание имеет весьма локальный характер, поскольку публикует статьи авторов из Китая (100%, из них лишь 1% в сотрудничестве с иностранными авторами) и цитируют его также представители национального научного сообщества (только 0,7% ссылок из статей, чьи авторы из других стран). Популярности журнала не способствует и то, что исследования выходят на китайском языке.

Выводы. Представленный в докладе краткий анализ публикаций по инерциальной технике дает общее представление о тематике наиболее актуальных статей за последние 5 лет. Результаты анализа могут быть использованы при более подробном рассмотрении отдельных групп

публикаций и для определения направлений поиска статей для составления обзоров литературы по указанным тематикам.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Yuh-Shan Ho,** The top-cited research works in the Science Citation Index Expanded, Scientometrics (2013) 94:1297–1312. DOI 10.1007/s11192-012-0837-z.
2. **Geiger, A., Lenz, P., Stiller, C., Urtasun, R.,** Vision meets robotics: The KITTI dataset, International Journal of Robotics Research, 2013, pp. 1231–1237.
3. **Filippeschi, A., Schmitz, N., Miezal, M., Bleser, G., Ruffaldi, E., Stricker, D**., Survey of Motion Tracking Methods Based on Inertial Sensors: A Focus on Upper Limb Human Motion, Sensors, 2017, 17, 1257.
4. **Taborri, J.; Palermo, E.; Rossi, S.; Cappa, P.,** Gait Partitioning Methods: A Systematic Review, Sensors, 2016, 16, 66.
5. **Sprager, S., Juric, M.B.,** Inertial Sensor-Based Gait Recognition: A Review, Sensors, 2015, 15, 22089–22127.
6. **Wang, A., Chen, G., Yang, J., Zhao, S., and Chang, C.,** A Comparative Study on Human Activity Recognition Using Inertial Sensors in a Smartphone, IEEE Sensors Journal, 2016, vol. 16, no. 11, pp. 4566-4578. DOI: 10.1109/JSEN.2016.2545708.
7. **Leutenegger, S., Lynen, S., Bosse, M., Siegwart, R., Furgale, P.,** Keyframe-based visual-inertial odometry using nonlinear optimization, International Journal of Robotics Research, 2015, pp. 314–334.
8. **Qin, T., Li ,P., and Shen, S.,** VINS-Mono: A Robust and Versatile Monocular Visual-Inertial State Estimator, IEEE Transactions on Robotics, Aug. 2018, vol. 34, no. 4, pp. 1004–1020. DOI: 10.1109/TRO.2018.2853729.
9. **Chen, C., Jafari, R., & Kehtarnavaz, N.,** A survey of depth and inertial sensor fusion for human action recognition, Multimed Tools Appl 76, 4405–4425 (2017). https://doi.org/10.1007/s11042-015-3177-1.
10. **Zheng Yang, Chenshu Wu, Zimu Zhou, Xinglin Zhang, Xu Wang, and Yunhao Liu**., Mobility Increases Localizability: A Survey on Wireless Indoor Localization using Inertial Sensors. ACM Comput. Surv., 2015, 47, 3, Article 54, 34 pages. DOI:10.1145/2676430.
11. **Wang, B., Ren, Q., Deng, Z., and Fu, M.,** A Self-Calibration Method for Nonorthogonal Angles Between Gimbals of Rotational Inertial Navigation System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, April 2015, vol. 62, no.4, pp. 2353-2362. DOI: 10.1109/TIE.2014.2361671.
12. **Dutta, I., Savoie, D., Fang, B., Venon, B., Garrido Alzar, C.L., Geiger, R., and Landragin, A.,** Continuous Cold-Atom Inertial Sensor with 1nrad/sec Rotation Stability, Phys. Rev. Lett., 116, 183003. DOI:10.1103/PhysRevLett.116.183003.
13. **Barrett, B., Antoni-Micollier, L., Chichet, L., et al.,** Dual matter-wave inertial sensors in weightlessness, Nat Commun, 7, 13786 (2016). https://doi.org/10.1038/ncomms13786.
14. **Jiang Li, Myoung-Gyun Suh, and Kerry Vahala,** Microresonator Brillouin gyroscope, Optica 4, 346-348 (2017).
15. **Zhang, H., Li, B., Yuan, W., Kraft, M., and Chang, H.,** An Acceleration Sensing Method Based on the Mode Localization of Weakly Coupled Resonators, Journal of Microelectromechanical Systems, April 2016, vol. 25, no.2, pp. 286–296. DOI: 10.1109/JMEMS.2015.2514092.

D.O.Taranovskiy (CSRI Concern Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg)

BRIEF ANALYSIS OF JOURNAL PUBLICATIONS ON INERTIAL TECHNOLOGY BASED ON INTERNATIONAL SCIENTIFIC CITATION DATABASES DATA

In the report presents the results of analysis of citation of publications devoted to inertial navigation methods and the use of gyro sensors in different applications. Provides data on articles in this science direction, leading in terms of the number of citations in the Scopus database. Among the considered characteristics: the subject of articles and their distribution by journals, countries, etc. The hundred of the most highly cited publications over the past five years are analyzed. In conclusion, data on the features and citation of publications in the most famous journals specializing in navigation are given.

Д. Г. ГРЯЗИН, Т. В. ПАДЕРИНА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург)

И. В. СЕРГАЧЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СУДОВЫХ МАГНИТНЫХ КОМПАСОВ В ВЫСОКИХ ШИРОТАХ

Доклад посвящен рассмотрению комплекса вопросов, касающихся применения главных судовых магнитных компасов в высоких широтах. К их числу следует отнести влияние низкой температуры, малого значения горизонтальной составляющей вектора магнитного поля Земли на динамические характеристики магнитного компаса. Кроме того, предложены результаты аналитических исследований работы систем коррекции, позволяющих уменьшить влияние погрешностей измерения курса от крена и ускорений на качке, которые наиболее критичны при малом значении направляющего момента картушки магнитного компаса. В докладе приводятся результаты теоретических, экспериментальных исследований и рекомендации к проектированию современных магнитных компасов.

Введение. Судовой главный магнитный компас (МК) устанавливается на борту каждого судна в соответствии с требованиями международной конвенции СОЛАС 74 [1]. Традиционно МК состоят из нактоуза и котелка, внутри которого установлена картушка с магниточувствительным элементом. В соответствии с требованиями, предъявляемыми Российским морским регистром судоходства [2] к главному МК, он должен иметь дистанционную оптическую передачу курса от картушки на индикатор, установленный перед рулевым, а также может иметь выносной дистанционный индикатор, на котором должен отражаться истинный курс судна. Нактоуз с котелком должен устанавливаться на верхнем мостике судна. МК должен вырабатывать магнитный курс без электрического питания, оптический индикатор курса и выносной цифровой индикатор должны располагаться в рулевой рубке непосредственно перед рулевым и могут использовать резервное питание в случае отключения основной энергосети судна. Известно значительное число моделей как зарубежных, так и отечественных МК, однако основными их недостатками остаются значительные погрешности при работе в высоких широтах.

Эти погрешности обусловлены влиянием внешней температуры на жидкость котелка и малого значения горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, которое формирует малый направляющий момент картушки. Указанные факторы оказывают значительное влияние на динамические характеристики МК. Кроме того, при уменьшении горизонтальной составляющей вектора магнитного поля Земли на значение вырабатываемого магнитного курса существенно сказываются погрешности от качки. Эти погрешности обусловлены несколькими причинами. Одной из них является нескомпенсированная креновая погрешность на широте плавания судна. Второй – погрешность Н.Ю. Рыбалтовского [3] от действия переносных составляющих ускорения [4], обуславливающих воздействие на магнитную систему картушки проекции вертикальной составляющей магнитного поля Земли, приводящее к ее отклонению от направления на магнитный север.

Исследование влияния температуры на переходные характеристики МК. В докладе представлена математическая модель работы магнитного компаса при рыскании судна. Показано значение влияющих факторов на динамические характеристики системы. Приведены результаты исследований влияния температуры на переходные характеристики МК. Для этого были произведены записи переходных процессов МК «Азимут 125м», опытного образца картушки МК «Азимут КМ 05Д» и компаса «Азимут 90-1» при температурах 24 и –40°С. Записи производились в режимах изменения курса на 30-40 градусов. По результатам записанных переходных процессов были построены графики, представленные на слайдах. Их анализ показывает, что переходные процессы компаса «Азимут 90-1», не предназначенного для работы в условиях низких температур, существенно возрастают. Характер переходного процесса и его

длительность у компаса «Азимут КМ-05Д» при пониженной температуре остаются близкими к значениям, полученным при комнатной температуре.

Наряду с динамическими характеристиками при выполнении экспериментальных исследований оценивалась и зона застоя картушек всех компасов. Исследования показали следующее:

- у компаса «Азимут 90-1», заполненного жидкостью ПМС-5, при температуре –40° и горизонтальной составляющей поля H = 3 мкТл застой картушки увеличивается в 3,5 раза по сравнению с нормальными условиями. При этом следует отметить, что зона застоя имеет значение 1,1°, т.е. остается в пределах 3,0°, что соответствует требованию п. 5.2.22 части V Правил по оборудованию морских судов РМРС [2] для шлюпочного компаса;
- у опытного образца картушки компаса «Азимут КМ05Д» с заполнением смесью жидкостей ПМС-5 и ПМС-1,5Р при температуре –40° и горизонтальной составляющей поля H = 3 мкТл увеличения застоя картушки по сравнению с нормальными условиями не наблюдается. При этом зона застоя имеет значение 0,3°, т.е. остается в пределах 1,0° в соответствии с требованием указанного пункта правил регистра [2] для основного компаса при значении поля H = 3 мкТл, $\Delta = 3°/H$;
- у опытного образца картушки компаса «Азимут 125м», заполненного жидкостью ПМС-5, при температуре –40° и горизонтальной составляющей поля H = 3 мкТл застой картушки увеличивается в 2 раза по сравнению с нормальными условиями. При этом зона застоя имеет значение 0,2°, т.е. остается в пределах 1,0° в соответствии с требованием указанного пункта правил регистра [2] при значении поля H = 3 мкТл, $\Delta = 3°/H$.

Исследование переходных характеристик МК в условиях изменения температур при малом значении горизонтальной составляющей магнитного поля Земли. Для оценки такого комплексного влияния внешних факторов на магнитные системы компасов были выбраны МК «Азимут 90-1» и опытный образец «Азимут КМ-05Д» как МК с наилучшей и наихудшей переходными характеристиками, полученными в результате предыдущих испытаний. МК устанавливались на стол специализированной установки, которая воспроизводила горизонтальную составляющую магнитного поля H = 3 мкТл. Регистрация измеренных значений также производилась с использованием видеокамеры при температуре котелка 24°С и –40°С после ручного разворота котелков на 20-30 градусов с одинаковой угловой скоростью. По результатам записанных переходных процессов были построены графики, представленные в докладе.

Анализ переходных процессов картушки МК «Азимут 90-1», записанный при различных температурах, показывает, что при уменьшении горизонтальной составляющей магнитного поля до значения 3 мкТл вид переходного процесса остается прежним. При этом величина перерегулирования и времени переходного процесса возрастают в 2-3 раза. Переходный процесс МК «Азимут КМ-05Д» при уменьшении горизонтальной составляющей магнитного поля до значения 3 мкТл из апериодического становится колебательным. При этом перерегулирование увеличивается в 3-5 раз, а время переходного процесса – на порядок.

В докладе отмечается, что влияние на переходные характеристики картушки МК оказывают оба фактора, но чем меньше диаметр картушки, тем меньше перерегулирование, что можно объяснить уменьшением влияния присоединенной к картушке массы жидкости.

Исследования работы систем коррекции компаса на качке. Магнитный компас с подвижной картушкой, построенный по традиционной схеме, состоит из корпуса котелка, заполненного демпфирующей жидкостью, подвешенного в двухосном кардановом подвесе, картушки с магниточувствительным элементом (МЧЭ), установленной на опоре в котелке, индукционного преобразователя, подсоединенного к МЧЭ для дистанционной передачи сигнала компаса. К недостаткам традиционного способа измерения магнитного курса, реализуемого в этих компасах, относится систематическая погрешность их показаний на качке [3], вызванная нескомпенсированной на данной широте креновой погрешностью и погрешностью Н.Ю. Рыбалтовского, вызванной переносным ускорением.

Компенсировать эту систематическую погрешность от качки можно с помощью системы коррекции, которая реализуется за счет установки на котелок МК датчика угловой скорости

(ДУС) с вертикально расположенной осью чувствительности. При этом возможно формирование систем коррекции двух типов – позиционной коррекции и коррекции по угловой скорости рыскания. В системе позиционной коррекции производится обработка выходных сигналов с индуктивного датчика магнитного курса (ДМК), подсоединенного к картушке МК и ДУС, включающая интегрирование выходного сигнала ДУС и получение сигнала, пропорционального углу рыскания. Сравнение этого сигнала с рысканием, полученным от ДМК, позволяет откорректировать выходной сигнал МК. Особенностью позиционной коррекции является целесообразность применения в этой схеме волоконно-оптического гироскопа, имеющего низкочастотный дрейф или медленно меняющуюся составляющую ухода, которые устраняется фильтром высоких частот [5].

Проведенное имитационное моделирование этой системы коррекции при различных режимах эксплуатации судна подтвердило ее эффективность при использовании ВОГ с низкочастотной составляющей ухода со среднеквадратическим отклонением (СКО) уровня σ = 3°/ч. Результаты моделирования показали, что в условиях рыскания с периодом 10-20 с и амплитудой до 5°, а также в условиях бортовой качки с периодами от 6 до 15 с и амплитудой до 22,5°, когда задаваемая динамическая погрешность МК от качки составляет 6,5°, погрешность МК с учетом работы системы коррекции не превышает 3°, что соответствует требованиями п. 5.2.1 части V Правил по оборудованию морских судов РМРС [2].

Тем не менее с точки зрения обеспечения умеренных ценовых показателей более привлекательным является применение в системе коррекции микромеханического гироскопа (ММГ).

Погрешность ММГ в отличие от ВОГ характеризуются наличием в его выходном сигнале флуктуационных составляющих типа белого шума и случайного блуждания угла, прохождение которых через интегрирующее звено в позиционной системе коррекции, безусловно, приведет к росту их дисперсий со временем. В связи с этим для использования ММГ в МК целесообразно применять не позиционную коррекцию, а коррекцию по угловой скорости рыскания. В этой системе коррекции производится дифференцирование сигналов ДМК и сравнение не углов, а угловых скоростей рыскания и формирование далее по полученным после дифференцирования сигналам и выходным данным ММГ разностного измерения, содержащего производную от погрешности МК непосредственно на фоне ухода ММГ. Дальнейшее применение в рассматриваемой системе фильтра низких частот позволяет получить искомую погрешность МК, а также минимизировать влияние ухода ММГ.

Результаты моделирования показали, что при использовании ММГ с погрешностью в виде дискретного белого шума с СКО σ = 110°/ч в условиях качек объекта, аналогичных условиям моделирования позиционной системы коррекции, когда задаваемая динамическая погрешность МК от качки составляет 6,5°, погрешность МК с учетом работы системы коррекции по угловой скорости также не превышает 3°.

Выводы. Исследования влияния внешних возмущающих факторов, характерных для работы МК в высоких широтах, показывают, что:

- характер переходных характеристик МК в значительной степени определяется конструктивными параметрами и при правильно подобранной жидкости мало изменяется при низких температурах на одной географической широте;
- уменьшение горизонтальной составляющей вектора магнитного поля Земли существенно ухудшает переходные характеристики МК, при этом снижение температуры влияет только на значение перерегулирования и приводит к его увеличению.

Учет указанных особенностей позволяет спроектировать МК, работающий в высоких широтах в условиях низких температур.

Применение ДУС для компенсации погрешности МК на качке позволяет придать ему свойства гиромагнитного компаса. Предложенные варианты систем коррекции адаптированы для применения ВОГ и ММГ.

Моделирование работы систем коррекции компаса показывает, что в условиях качки объекта и движения с заданным постоянным курсом обе системы коррекции имеют сопоставимые результаты – погрешность МК не превышает 3°.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00265

ЛИТЕРАТУРА

1. **Международная конвенция** по охране человеческой жизни на море 1974 года СОЛАС-74. С изменениями на 01.01.2016. URL: docs.cntd.ru/document/901765675.
2. **Правила по оборудованию** морских судов. Часть V. Навигационное оборудование. Российский морской регистр судоходства. СПб., 2016.
3. **Рыбалтовский Н.Ю.** Магнитно-компасное дело. Л.: Государственное издательство водного транспорта, 1954.
4. Ривкин С.С. Определение линейных скоростей и ускорений качки корабля инерциальным методом. Часть I. Линейные скорости и ускорения качки корабля. Л.: ЦНИИ «Румб», 1980.
5. **Зиненко В.М., Грязин Д.Г., Молочников А.А., Сергачев И.В., Матвеев Ю.В., Короленко И.В.** Способ измерения магнитного курса судна в высоких широтах и устройство для его реализации. Патент RU 2688900. Дата регистрации 22.05.2019.

D.G. Gryazin, I.V. Sergachev, T.V. Paderina (Concern CSRI Elektropribor, JSC)

ON THE POSSIBILITY OF USING SHIP'S MAGNETIC COMPASSES AT HIGH LATITUDES

The report is devoted to the consideration of a set of issues related to the use of the main ship's magnetic compasses at high latitudes. These include the effect of low temperature, low horizontal component of the Earth's magnetic field on the dynamic characteristics of the magnetic compass. In addition, the results of analytical studies of the operation of correction systems are proposed, which make it possible to reduce the influence of errors in measuring the course from roll and acceleration during roll, which are most critical at a small value of the guiding moment of the magnetic compass card. The report contains the results of theoretical, experimental studies and recommendations for the design of modern magnetic compasses.

Секция 3
Памяти заслуженного деятеля науки РФ И.Б. Челпанова

■ ОБРАБОТКА НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ ■

О. А. СТЕПАНОВ, М. И. ЕВСТИФЕЕВ, Ю. А. ЛИТВИНЕНКО, О. М. ЯШНИКОВА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург)

ПАМЯТИ ЗАСЛУЖЕННОГО ДЕЯТЕЛЯ НАУКИ И ТЕХНИКИ РФ ПРОФЕССОРА И. Б. ЧЕЛПАНОВА

Доклад посвящен памяти Игоря Борисовича Челпанова (1931–2020) – доктора технических наук, профессора, заслуженного деятеля науки и техники РФ, выдающегося ученого, внесшего значительный вклад в развитие современной теории обработки информации в навигационных системах.

Игорь Борисович Челпанов родился 6 сентября 1931 года в г. Ленинграде. Выпускник физико-механического факультета Политехнического института (ныне СПбПУ Петра Великого), который он окончил в 1955 году, Игорь Борисович, получив диплом механика и пронеся через всю свою жизнь эту первую любовь к профессии, активно работал в области теории управления и обработки информации [1]. В 35 лет он уже доктор наук, а в 37 – профессор кафедры механики и процессов управления, один из самых молодых профессоров в своем институте.

Выпускник кафедры «Механика и процессы управления», Игорь Борисович был учеником Анатолия Исаковича Лурье – выдающегося советского ученого в области теоретической и прикладной механики. После окончания института Челпанов остается работать на кафедре в самый яркий период ее истории, когда коллектив быстро пополняется способной молодежью и на кафедре буквально закипает жизнь, ее сотрудники вовлекаются во все выдающиеся научно-технические проекты того времени. В.А. Пальмов решает проблему распространения случайных вибраций по корпусу ракет, что позволяет получить фундаментальные результаты в области нелинейной механики деформируемых тел. А.А. Первозванский создает новое направление – исследование стохастических систем. Его книга [2] «Случайные процессы в нелинейных автоматических системах» (1962 г.) почти сразу переводится в США. В это же время И.Б. Челпанов создает вероятностную теорию комплексирования навигационных систем [3].



А.А. Первозванский, Е.П. Гильбо, В.А. Пальмов,
А.И. Лурье, И.Б. Челпанов (1979 г.)

Еще в 1961 году Анатолий Исаакович Лурье порекомендовал Челпанова руководству ЦНИИ «Электроприбор» как молодого и перспективного кандидата наук, и с тех пор судьба крепко связала Игоря Борисовича с нашим предприятием. Вклад И.Б. Челпанова в разработки «Электроприбора» трудно переоценить. Он участвовал во многих перспективных проектах, в создании бесплатформенных систем на волоконно-оптических и электростатических гироскопах, в разработке микромеханических гироскопов и, разумеется, в работах по созданию различных алгоритмов обработки информации.

В 70-х гг. при участии И.Б. Челпанова был проведен большой объем работ по статистической обработке данных для основных возмущающих воздействий: линейных и угловых скоростей качки и маневра судна, ускорений, уходов гироскопов. При простых аппроксимациях спектральных плотностей с обоснованием их качественных особенностей были оценены зависимости параметров воздействий от контролируемых условий и пределы их возможных изменений. При использовании этих характеристик в монографии [4] И.Б. Челпанова, Л.П. Несенюка и М.В. Брагинского «Расчет характеристик навигационных гироприборов» (1978) был обоснован подход к выбору структуры и параметров обратных связей гировертикали и гирокомпаса. В книге описано применение метода частотных логарифмических характеристик, позволивших получить наглядные результаты, а также соответствующие алгоритмы преобразования сигналов, представленные в виде передаточных функций, которые могли быть реализованы типовыми средствами как аналоговой, так и в то время еще слабой цифровой техники. Для всех практически интересных случаев были получены выражения для установившихся дисперсий ошибок, причем все результаты имеют простой физический смысл. Учет сведений о спектральных характеристиках случайных скоростей движения объектов и случайных составляющих скоростей уходов гироскопов при применении разработанного метода синтеза на основе метода Винера с применением логарифмических характеристик позволило решать задачи оптимизации для стационарного режима. Дальнейшее развитие эти идеи получили в работе, посвященной комбинированному применению калмановского и частотного подходов при решении задач обработки навигационной информации [5].

В 1998 году Игорь Борисович за заслуги перед отечественной наукой был удостоен почетного звания заслуженного деятеля науки и техники РФ.

Экспертное мнение И.Б. Челпанова всегда ценилось. С 1967-го по 1980 год он был членом Ученого совета ЦНИИ «Электроприбор», до последних дней входил в состав научно-методической комиссии по специальности «Обработка информации». Игорь Борисович был членом международной общественной организации «Академия навигации и управления движением» с первых дней ее основания. Он входил в состав диссертационных советов и нескольких методических комиссий, выступал экспертом в различных конкурсах, таких, например, как конкурс «УМНИК», проводимый в рамках конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» в ЦНИИ «Электроприбор».



И.Б. Челпанов – заслуженный деятель науки и техники РФ

Обширная педагогическая деятельность И.Б. Челпанова охватывала практически все ступени образования: он читал лекции бакалаврам и магистрам в своей альма-матер, Политехническом университете, преподавал в ЦНИИ «Электропорибор», готовил аспирантов и докторантов. Игорь Борисович воспитал мощную плеяду кандидатов и докторов наук (всего более 100 чело-

век). Из защитившихся под крылом И.Б. Челпанова докторов и кандидатов наук мог бы сложиться полноценный и немаленький институт. Среди его учеников немало известных электроприборовцев – Л.П.Несенюк, В.З.Гусинский и многие другие [6]. И.Б.Челпанова отличало отеческое отношение к своим ученикам, он легко и с радостью делился с ними научными результатами.

Одной из последних научно-педагогических работ И.Б. Челпанова стало учебное пособие, посвященное специальным технологиям изготовления прецизионных узлов и элементов гироскопических приборов, подготовленное коллективом авторов и вышедшее в Университете ИТМО в 2019 году [7]. С Университетом ИТМО Игорь Борисович был связан через научно-образовательный центр ЦНИИ «Электроприбор», в составе которого обеспечивалась работа базовой кафедры, а с 2018 года – Института информационно-навигационных систем (ИНС), возглавляемого академиком РАН В.Г. Пешехоновым. И.Б. Челпанов принимал активное участие в чтении лекций в рамках образовательной программы «Системы управления движением и навигация» (руководитель программы – чл.-корр. РАН, проф. О.А.Степанов). Он преподавал и курировал такие дисциплины, как «Прикладная механика», «Теория механизмов, деталей машин и приборов», «Задачи механики подвижных объектов для приборостроения», «Испытания навигационных систем и программы обработки экспериментальных данных» и многие другие. Это всегда были неординарные лекции, на которых он мог без громоздких формул, простыми словами объяснять достаточно сложный материал. У него всегда были в запасе интересные истории или примеры, которые невозможно найти ни в одном учебнике. Он учил не только предмету, но и правильному отношению к жизни, к любимому делу.

Говоря об областях интересов Игоря Борисовича, следует отметить, что он был человеком большой эрудиции и высокого творческого потенциала. Если глубоким познаниям Игоря Борисовича в разнообразных областях науки и техники удивляться не приходилось, то его широчайшие познания, например, в вопросах архитектуры, музыки и религии производили сильное впечатление. Как человек, глубоко разбирающийся в вопросах искусства и дизайна, он с легкостью помогал проводить диссертационные исследования на стыке технических и гуманитарных наук, как, например, «Задачи и методы автоматизированного проектирования орнаментов в традиционном монголо-бурятском стиле» или «Автоматизированное проектирование логотипов товарных знаков».

Будучи автором свыше 300 научных работ, среди которых 15 монографий, изданных в нашей стране и за рубежом, И.Б. Челпанов воспитал более 100 учеников, защитивших как кандидатские, так и докторские диссертации. Творческая деятельность блистательного ученого продолжалась до самых последних дней его жизни. Память об этом умном, ироничном, по-настоящему интеллигентном и добром человеке надолго сохранится в сердцах благодарных учеников, коллег и товарищей по работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Памяти И.Б. Челпанова** // Электроприбор. 2020. №6.
2. **Первозванский А.А.** Случайные процессы в нелинейных автоматических системах. М.: Физматгиз, 1962, 351 с.
3. **Челпанов И.Б.** Оптимальная обработка сигналов в навигационных системах. М.: Наука, 1967. 392 с.
4. **Челпанов И.Б., Несенюк Л.П., Брагинский М.В.** Расчет характеристик навигационных гироприборов. Л.: Судостроение, 1978. 263 с.
5. **Степанов О.А., Лопарев А.В. Челпанов И.Б.** Частотно-временной подход к решению задач обработки навигационной информации // Гироскопия и навигация. 2014. №6. С. 141–163.
6. **Памяти И.Б.Челпанова** // Новости Академии навигации и управления движением. URL: https://acanud.ru/news/2020/06/04/chelpanov_ib/.
7. **Юльметова О.С., Щербак А.Г., Челпанов И.Б.** Специальные технологии изготовления прецизионных узлов и элементов гироскопических приборов: Учебное пособие/ под ред. Валетова В.А. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. 131 с.

O.A. Stepanov, M.I. Evstifeev, Yu.A. Litvinenko, O.M. Yashnikova (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, Saint Petersburg)

IN MEMORY OF THE HONOURED WORKER OF SCIENCE AND TECHNOLOGY OF THE RUSSIAN FEDERATION, PROFESSOR I.B. CHELPANOV

The paper is devoted to the memory of Igor Chelpanov (1931–2020) – Doctor of Technical Sciences, Professor, the honoured worker of science and technology of the Russian Federation, the outstanding scientist, who made the significant contribution to the development of the modern theory of data processing in navigation systems.

К. В. ДУНАЕВСКАЯ, В. Б. КОСТОУСОВ, А. Е. ТАРХАНОВ
(Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения РАН,
г. Екатеринбург)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНОСТИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

Доклад посвящен исследованию нового метода оценивания ошибок навигации по геофизическим полям на примере трех пространственно совмещенных полей: поля глубин моря, поля аномалий силы тяжести и аномального магнитного поля. Метод основан на анализе отношения экстремальных значений функционала сопоставления и реализуется путем измерения диаметра множества уровня этого функционала. Приводятся результаты математического моделирования процесса коррекции навигационных ошибок и сравнения предложенного способа и байесовского метода оценивания.

Введение. В настоящее время придается важное значение задаче автономной навигации движущихся объектов по геофизическим полям [1, 2]. В контексте этой задачи важными являются вопросы оценки навигационной информативности геофизических полей (ГФП). Также при наличии пространственно совмещенных карт и возможности одновременного измерения этих полей представляет значительный интерес вопрос эффективности комплексирования оценок, получаемых по картам ГФП независимо друг от друга. В данной работе рассматриваются три пространственно совмещенных геофизических поля: поле глубин моря, поле аномалий силы тяжести и поле магнитных аномалий Земли – в выбранном районе Татарского пролива.

Задача корреляционно-экстремального метода коррекции навигационных параметров состоит в том, чтобы путем привязки измеренного фрагмента поля к эталонной карте уточнить требуемые параметры, например координаты (широту, долготу) носителя. Привязка измерений к эталонной карте производится методом поиска глобального экстремума (максимума или минимума) некоторого *функционала сопоставления* измеренного фрагмента и эталонных фрагментов, полученных из эталонной карты для различных гипотез об искомых навигационных параметрах. *Информативность геофизического поля* с позиций корреляционно-экстремальной навигации измеряется уровнем ошибок навигации при использовании данного метода. Источником ошибок в конечном счете, как правило, являются ошибки картографии и ошибки измерения поля. Однако чувствительность результата навигации к этим ошибкам в основном определяется градиентными характеристиками самого поля.

В докладе на примере указанных полей исследуется предложенный в [3] метод оценки ошибок корреляционно-экстремального метода навигации по карте поля, отличающийся от известного байесовского подхода [1, 2] сравнительной простотой алгоритма навигационной коррекции и оценкой информативности карты поля, для построения наиболее информативных маршрутов управляемого движения. Здесь, как и в работе [3], задача рассматривается в вероятностной постановке. На основе предложенного метода строится критерий срыва коррекции в алгоритме коррекции ошибок определения координат движущегося автономного подводного объекта. Проведено статистическое исследование точности оценивания и качества предложенного метода в сравнении с классическим байесовским подходом на примере трех геофизических полей: поля глубин моря, поля аномалий силы тяжести и поля аномалий магнитного поля.

Новый метод оценки ошибок коррекции координат по карте геофизического поля. Рассмотрим задачу коррекции ошибок навигации движущегося объекта по геофизическому полю (ГФП) [1, 2, 4].

Обозначим символом $g(\boldsymbol{x})$ эталонную карту ГФП, заданную в некоторой прямоугольной области Ω плоскости $\mathbb{R}^2$ ($\Omega \subset \mathbb{R}^2$). Для различения скалярных и векторных величин всюду ниже векторы выделяются жирным шрифтом.

Будем считать, что измерения поля производятся в точках прямолинейного отрезка, начинающегося в неизвестной точке $\boldsymbol{x}$ в заданном фиксированном направлении, которое определя-

ется единичным вектором $\boldsymbol{p}$. Модель измерения поля на борту движущегося объекта представима в виде

$$\varphi_k \triangleq \varphi_k(t_k) = g(\boldsymbol{x} + t_k\boldsymbol{p}) + \xi_k, x \in Q, k = 1, \dots m, \quad (1)$$

где φ_k – измеренное в дискретный момент t_k значение поля АСТ. Набор значений (m-вектор) $\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1, \dots \varphi_m)^T$ в дальнейшем будем называть измеренным фрагментом поля g или кратко – фрагментом.

В формуле (1) приняты следующие обозначения:

$Q \subset \Omega$ - область априорного положения начальной точки $\boldsymbol{x} \in Q$ фрагмента $\boldsymbol{\varphi}$ в области Ω задания эталонной карты g;

$\boldsymbol{x}$ – истинное положение фрагмента;

$\boldsymbol{p}$ – заданный единичный направляющий вектор трассы замеров;

$\boldsymbol{\xi} = (\xi_1, \dots \xi_m)$ – вектор искажения фрагмента.

В задаче коррекции требуется по указанным исходным данным получить в некотором смысле «хорошую» оценку $\tilde{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{\varphi})$ неизвестного вектора $\boldsymbol{x}$ и оценить точность этой оценки.

В данной работе основным предметом исследования является корреляционно-экстремальный поисковый метод коррекции навигационных ошибок [4], который дополняется новым способом оценки ошибки коррекции, основанным на анализе функционала сопоставления.

В качестве примера алгоритма коррекции рассматривается следующий квадратичный функционал сопоставления замеров и карты поля:

$$\Phi(\boldsymbol{x}) = \sum_{k=1}^{m} [g(\boldsymbol{x} + t_k\boldsymbol{p}) - \varphi_k]^2.$$

В данном случае оценка $\tilde{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{\varphi})$ определяется в результате поиска минимума ла $\Phi(\boldsymbol{x})$:

$$\tilde{\boldsymbol{x}}_{\Pi}(\boldsymbol{\varphi}) = \tilde{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{\varphi}) = \underset{x \in Q}{\operatorname{argmin}}\, \Phi(\boldsymbol{x}). \quad (2)$$

Вычисление оценки ошибки коррекции опирается на следующее неравенство:

$$\frac{\Phi(x_{min_1})}{\Phi(x_{min_2})} < P_{tr}, \quad (3)$$

где x_{min_1} – точка глобального минимума, x_{min_2} – точка второго по величине локального минимума, отстоящая от точки x_{min_1} первого минимума на достаточно далекое расстояние, P_{tr} – пороговое значение. Неравенство (3) показывает, насколько глобальный минимум в (2) ярко выражен на фоне других локальных минимумов, поскольку чем меньше отношение в (3), тем надежнее решается задача коррекции с точки зрения устойчивости к ошибкам. В этом смысле это неравенство характеризует информативность поля в районе Q. Порог P_{tr} определяется из статистического эксперимента с помощью критерия Неймана–Пирсона и соответствует минимальному уровню ошибок II-го рода при фиксированном уровне ошибок I-го рода. Здесь под ошибкой I-го рода понимается принятие ошибочного результата алгоритма за правильную коррекцию, а под ошибкой II-го рода понимается ошибочный отказ от коррекции при правильном результате работы алгоритма. В статистическом эксперименте ошибочность результата работы определялась по превышению заданного порога расстояния между истинным положением фрагмента и решением задачи (2).

При заданном пороге P_{tr} можно вычислить порог $\Phi_{tr} = \frac{\Phi(x_{min_1})}{P_{tr}}$ и затем определить диаметр следующего множества:

$$2 \cdot r_{D_{max}}(\delta) = D_{max} = diam\{x: \Phi(x) \leq \Phi_{tr}\}. \quad (4)$$

Величина D_{max} служит оценкой ошибки алгоритма коррекции, которая может быть вычислена в процессе работы алгоритма в реальном времени и использована для принятия решения о коррекции во время движения. С помощью такого показателя решающее правило коррекции выглядит следующим образом: если величина $\frac{D_{max}}{2}$ не превышает значение допустимой радиальной ошибки R_{max}, то принимается гипотеза о правильной коррекции. Само значение $\frac{D_{max}}{2}$ представляет собой оценку максимально возможной ошибки коррекции. Предлагаемый метод оценки ошибки коррекции применим и для любого другого функционала сопоставления.

Также данную задачу можно решить с применением байесовской теории нелинейной фильтрации [4]. Байесовский метод хотя и является оптимальным, но имеет два существенных недостатка, которые препятствуют его применению в системах коррекции реального времени. Во-первых, это требование знания априорной плотности $f_x(\boldsymbol{x})$ неизвестного вектора $\boldsymbol{x}$ и плотности помехи $f_{\xi}(\boldsymbol{\xi})$, причем известно, что результат оценивания сильно зависит от этих величин. Во-вторых, это неприемлемо большая трудоемкость вычислений. Поэтому байесовский подход в данной работе применяется для сравнительного анализа точности предлагаемого более практичного подхода (4) к оценке ошибки коррекции.

Для удобства анализа результатов вычислительного эксперимента векторная ошибка оценивания $\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{x} - \tilde{\boldsymbol{x}}(\boldsymbol{\varphi})$ была приведена к скалярной величине – радиальной ошибке $r(\boldsymbol{\delta}) = \sqrt{\delta^2{}_{x_1} + \delta^2{}_{x_2}}$, где $\delta^2{}_{x_1}$ и $\delta^2{}_{x_2}$ – квадраты координат вектора $\boldsymbol{\delta}$.

Стоит отметить, что для сравнения с D_{max}-оценкой байесовская оценка ошибки алгоритма коррекции вычислялась следующим образом:

$$r_{\text{Б}}(\delta) = 3 \cdot \sqrt{P_{x_1x_1} + P_{x_2x_2}}, \quad (5)$$

где $P_{x_1x_1}$ и $P_{x_2x_2}$ – компоненты ковариационной матрицы [4, п. 2.5.5.]. Предполагается, что ковариационная матрица является диагональной, в противном случае данную матрицу можно привести к таковой с помощью собственных значений.

При наличии нескольких пространственно-совмещенных карт различных геофизических полей и возможности одновременного измерения этих полей в процессе движения возможно их комплексное использование для повышения точности коррекции навигационных ошибок поисковым алгоритмом (2). Для этого будем рассматривать функционал сопоставления $\Phi(\boldsymbol{x})$ следующего вида:

$$\Phi(\boldsymbol{x}) = \sum_{i=1}^{K} \alpha_i \left(\sum_{k=1}^{m} \left[g_i(\boldsymbol{x} + t_k \boldsymbol{p}) - \varphi_k^i \right]^2 \right),$$

где K – количество используемых геофизических полей; g_i – карта i-го поля; φ_k^i – k-й отсчет измеренного фрагмента i-го поля; α_i – весовой коэффициент влияния замеров i-го поля на функционал сопоставления.

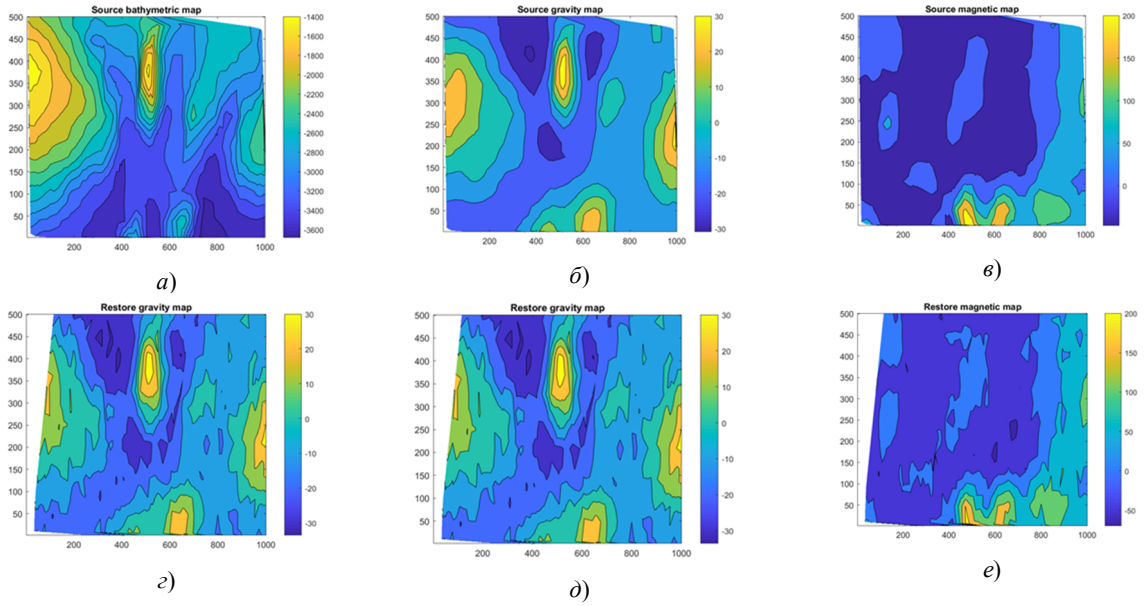
В данной работе коэффициенты α_i приняты равными обратным значениям дисперсий σ_i^2 суммарных ошибок измерения и картографии: $\alpha_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$.

В байесовском методе оценивания также нетрудно учесть возможность коррекции по нескольким геофизическим полям, если их измерения независимы между собой. В этом случае можно использовать алгоритм [4, п. 2.5.5.], где плотность $f_{\xi}(\boldsymbol{\xi})$ составной помехи $\boldsymbol{\xi} = (\xi^1, \dots \xi^K)^T = (\xi_1^1, \dots \xi_m^1, \dots \xi_1^K, \dots \xi_m^K)^T =$ представима в виде произведения K плотностей, соответствующих помехам ξ^i каждого i-го поля: $f_{\xi}(\boldsymbol{\xi}) = \prod_{i=1}^{K} f_{\xi^i}(\xi^i)$.

Описание и результаты вычислительных экспериментов. Наиболее точным и используемым на практике способом оценки информативности карт геофизических полей является метод статистического имитационного моделирования процесса коррекции навигационных ошибок, включающий многократное формирование последовательностей измерений и их привязку к эталонным картам полей.

Задача коррекции решалась с использованием данных гравиметрии, магнитометрии и батиметрии, полученных для района Татарского пролива с координатами E137º…E138º, N43,8º...N44,3º. Эти данные были предоставлены лабораториями гравиметрии и магнитометрии ТОИ ДВО РАН.

В качестве эталонных карт использовались восстановленные карты трех полей (рис. 1, *г–е*), полученные ИПМТ ДВО РАН путем моделирования траекторных измерений [5] с борта автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА). Карты были сформированы в виде матриц отсчетов, заданных на регулярной градусной сетке с шагом 0.001º по обеим осям. При этом в эксперименте модельные замеры поля формировались по исходным картам соответствующих полей (рис. 1, *а–в*).



а) *б*) *в*)

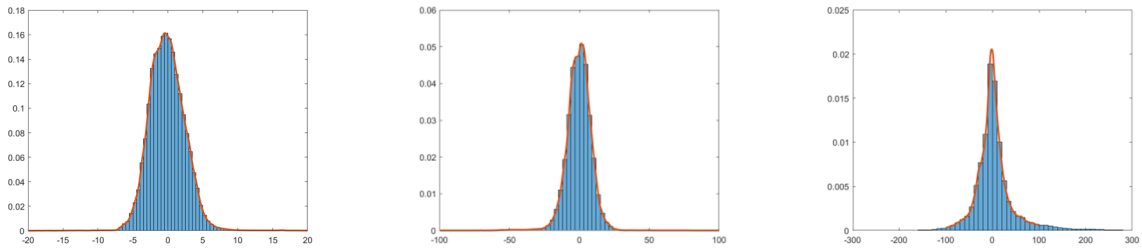
г) *д*) *е*)

Рис. 1. Фрагменты исходных карт глубин моря (*а*), поля АСТ (*б*), АГМП (*в*), карты восстановленных участков поля глубин моря (*г*), поля АСТ (*д*), АГМП (*е*)

Условия эксперимента. В зоне коррекции для каждого из трех полей, карты которых приведены на рис. 1, производилось формирование модельных замеров полей с шагом 100 м вдоль прямолинейных трасс длиною 40 км, направленных вдоль оси *X*. Коррекция проводилась по восстановленным картам, показанным на рис. 1 (*г*, *д*, *е*). Всего для каждой карты было произведено $N_э = 500$ экспериментов по коррекции ошибок навигации, при этом в каждом эксперименте генерировался вектор $\boldsymbol{x} \in Q$.

В рамках нашего вычислительного эксперимента для байесовского метода оценивания предполагалось, что $f_x(\boldsymbol{x})$ имеет гауссовскую плотность распределения, а для получения плотности $f_\xi(\boldsymbol{\xi})$ использовался метод Парзеновского окна, с помощью которого была аппроксимирована гистограмма разности исходной и восстановленной карт. Ниже приведен результат аппроксимации плотности $f_\xi(\boldsymbol{\xi})$ (рис. 2).

Для рассматриваемых геофизических полей и их комбинации в табл. 1 приведены результаты сравнения поискового и байесовского алгоритмов. Сравнение алгоритмов проводится по двум критериям: сравнение средних истинных радиальных ошибок и сравнение средних оценок ошибки алгоритма коррекции.



а) *б*) *в*)

Рис. 2. Гистограмма значений разности исходной и восстановленной карт для гравиметрии (*а*), магнитометрии (*б*) и батиметрии (*с*) и подобранная плотность распределения (обозначено красным цветом)

Таблица 1

Результаты статистического эксперимента для отдельных полей и их комбинации в случае коррекции с помощью поискового и байесовского алгоритмов

	Коррекция по полю АСТ	Коррекция по полю глубин моря	Коррекция по полю магнитных аномалий	Комплексная коррекция по трём полям
Истинная ошибка оценки: $\bar{\delta}_{\text{П}}$ / $\bar{\delta}_{\text{Б}}$, м	923 / 838	790 / 793	2033 / 1835	737 / 704
Расчетная оценка ошибки: $\bar{r}_{D_{max}}$ / $\bar{r}_{\text{Б}}$, м	928 / 881	804 / 232	2037 / 2155	789 / 330

В табл. 1 приняты следующие обозначения:

$\bar{\delta}_{\text{П}} = \bar{r}(\tilde{\boldsymbol{x}}_{\text{П}}(\boldsymbol{\varphi}) - \boldsymbol{x})$ – средняя истинная радиальная ошибка оценки поискового алгоритма, где $\tilde{\boldsymbol{x}}_{\text{П}}(\boldsymbol{\varphi})$ – решение задачи (2);

$\bar{\delta}_{\text{Б}} = \bar{r}(\tilde{\boldsymbol{x}}_{\text{Б}}(\boldsymbol{\varphi}) - \boldsymbol{x})$ – средняя истинная радиальная ошибка оценки байесовского алгоритма, где $\tilde{\boldsymbol{x}}_{\text{Б}}(\boldsymbol{\varphi})$ – байесовская оценка вектора $\boldsymbol{x}$;

$\bar{r}_{D_{max}}$ – средняя оценка ошибки поискового алгоритма, полученная предложенным методом (4);

$\bar{r}_{\text{Б}}$ – средняя радиальная расчетная оценка ошибки байесовского алгоритма, вычисляемая по формуле (5).

Заключение. Предложен новый способ оценки ошибок корреляционно-экстремального метода коррекции по карте поля АСТ, который в отличие от байесовского метода не требует знания апостериорной плотности распределения оцениваемого вектора и плотности распределения вектора ошибок измерения и не предъявляет чрезмерных требований к ресурсам бортового вычислителя.

Путем вычислительного эксперимента проведено сравнение предложенного метода оценки ошибок коррекции с байесовским методом оценивания. Показано, что предложенная оценка ошибок коррекции с помощью D_{max} (4) близка к истинной ошибке. В случае байесовского метода оценивания сильное отклонение расчетной оценки ошибки от истинной ошибки оценки, вероятно, вызвано недостаточной точностью приближения плотности ошибок картографии. Таким образом, применение байесовского метода гарантирует хорошую точность оценивания только в том случае, если плотность распределения $f_{\xi}(\boldsymbol{\xi})$ вектора ошибок измерения $\boldsymbol{\xi}$ известна с высокой точностью. Также по табл. 1 видно, что комплексирование измерений по трем полям повышает точность коррекции.

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(90). С. 102–125.
2. **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.

3. **Киселев Л.В., Костоусов В.Б., Дунаевская К.В., Тарханов А.Е.** Оценка ошибок корреляционно-экстремальной навигации по карте аномалий силы тяжести на основе траекторных измерений с борта автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. №1(31). 2020. С.13–20.
4. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 1. Введение в теорию оценивания. СПб: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 509 с.
5. **Kiselev, L.V., Medvedev, A.V., Kostousov, V.B., Tarkhanov, A.E.,** Autonomous underwater robot as an ideal platform for marine gravity surveys, Proc. of the 24-th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, CSRI «Elektropribor», 2017, pp. 605–608.

V.B. Kostousov, K.V. Dunaevskaya, A.E. Tarkhanov (IMM UB RAS, Yekaterinburg)

RESEARCH OF THE METHOD FOR INFORMATIVENESS ESTIMATION OF GEOPHYSICAL FIELDS

The report is devoted to the research of a new method for estimating navigation errors in geophysical fields using the example of three spatially matched fields: the sea depth field, the gravitational anomaly field, and the anomalous magnetic field. The method is based on the analysis of the ratio of extreme values of the matching functional and is implemented by measuring the diameter of the set of levels of this functional. The results of mathematical modeling of the navigation error correction process and comparing the proposed method with the Bayesian estimation method are presented.

Д. В. ФУРТАС, Л. И. АВГУСТОВ, А. В. НЕКРАСОВ, А. А. ДЗУЕВ
(АО «Инерциальные технологии Технокомплекса», г. Раменское)

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ АВТОНОМНОЙ НАЗЕМНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТУРОВ МЕСТНОСТИ

Системы автономной наземной навигации (САН-Н) с использованием данных о горизонтальных и вертикальных профилях земной поверхности позволяют определять текущее местоположение транспортного средства с точностью, близкой к точности картографирования.

В выполненном исследовании было произведено имитационное моделирование данной системы и проведены натурные испытания с макетом такой системы. Исследования проводились на участке автотрассы А-107 протяженностью около 40 км. Данные о положении автодороги в плане и по высоте были проверены с помощью контрольной полевой автолаборатории.

Введение. Основным средством определения пространственного положения и угловой ориентации гражданской и боевой транспортной техники является бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС). Она определяет координаты, скорость, ускорение и угловое положение аппаратов относительно вертикали местности. Главное достоинство БИНС – это его автономность, но также присутствует и недостаток – возрастающие со временем ошибки в определении навигационных параметров и параметров ориентации. Для устранения этого недостатка производится корректировка показаний БИНС по данным спутниковых и радионавигационных систем. При этом теряется главное качество БИНС – автономность.

Для того чтобы устранять накапливающееся ошибки и при этом сохранять автономность был разработан метод корректировки показаний БИНС с помощью информации о естественных физических полях Земли. Данные системы получили название – корреляционно-экстремальные навигационные системы (КЭНС).

Данные поля можно разделить на два основных типа:

1. поверхностные поля – рельеф земной поверхности, тепловой, оптический и радиолокационный контраст;
2. пространственные поля – гравитационное и магнитное поле Земли.

В настоящее время КЭНС является одной из немногих альтернатив спутниковым навигационным системам (СНС). При этом КЭНС обладают практически идентичными точностными характеристиками, универсальностью и невысокой стоимостью аппаратуры.

В настоящее время на предприятиях отечественной промышленности были разработаны КЭНС с коррекцией местоположения по рельефу земной поверхности и ведутся разработки методов навигации по магнитному и гравитационному полю Земли. На иностранных предприятиях разработаны КЭНС с коррекцией по рельефу, оптическому, радиотепловому и радиолокационному контрасту местности. Разработанные как отечественные, так и зарубежные КЭНС предназначены для корректировки летательных аппаратов. В настоящий момент была показана возможность создания КЭНС для наземной техники, но разработок алгоритмов пока не было. [1]

В связи с этим актуальным представляется разработка алгоритмов КЭНС для наземной техники с коррекцией местоположения по рельефу местности. Предлагаемый доклад посвящен алгоритму наземной КЭНС с коррекцией по горизонтальному и вертикальному профилям земной поверхности.

Принцип работы САН-Н. Положение авто- и железных дорог можно охарактеризовать угловыми параметрами – курсом и уклоном. Эти параметры контролируются на борту достаточно точно (единицы угловых минут) с помощью БИНС. Особенностью рассматриваемых объектов является их одномерность. Транспорт движется по дороге независимо от точности определения направления и координат местоположения в отличие от летательного аппарата, который движется в соответствии с показаниями навигационной системы. В теории КЭНС наработаны различные методы сравнения измеренной и эталонной информации – поисковые и беспоисковые. При области неопределенности, превышающей интервал корреляции поля, используются поисковые или рекуррентно-поисковые методы. При меньшей области неопределенности исполь-

зуются беспоисковые методы, основанные на линейной или билинейной аппроксимации поля внутри дискрета поля. [2]

С учетом известных начальных условий (координаты точки старта и высота) проводится начальная выставка ИНС. В ходе движения позиционные и угловые координаты ИНС запоминаются с определенной дискретностью в планшете. Дискретность замеров зависит от характера дороги. На прямолинейных участках дискретность может составлять десятки метров, на криволинейных – единицы метров. В каждой точке запоминаются плановые и угловые координаты ИНС. Текущее значение уклона дороги в *n*-ой точке определяется по значениям углов крена и тангажа. Указанные параметры запоминаются на интервале наблюдения, длина которого определяется информативностью профилей, точностью картографирования и ошибками измерений. В процессе движения формируются области неопределенности, размеры которых определяются погрешностью БИНС, с центрами в точках измерений поля. Далее измеренные значения углов уклона и курса сравниваются с эталонными, определяемыми по разности высот в соседних точках, полученной с карты вертикального профиля. Та траектория, для которой соответствие измеренных и эталонных данных будет максимальным, принимается за истинную.

Моделирование САН-Н. Для проверки работоспособности данного алгоритма были получены горизонтальный и вертикальный профиль дороги А107, протяженность которой составила 40 км. Дискретность по координатам горизонтального профиля составила 1 м с погрешностью не более 3 м. Дискретность по координатам вертикального профиля составила 30 м с погрешностью в определении высоты не более 3 м.

Был смоделирован маршрут, проходящий по данной дороге, и синтезированы показания датчиков при проезде по этому маршруту. На синтезированные показания датчиков были наложены ошибки картографирования и ошибки показаний датчиков. Величины наложенных ошибок определялись в соответствии с характеристиками используемой в дальнейшем БИНС и возможностями картографирования. С помощью смоделированного маршрута и возмущенных измерений датчика был протестирован реализованный алгоритм САН-Н. Поученная скорректированная траектория была сравнена с невозмущенной траекторией. Статистические характеристики данного моделирования при различных скоростных ошибках представлены в табл. 1.

Таблица 1

Статистические характеристики, полученные во время моделирования

Мат. ожидание ошибки широты, м	Мат. ожидание ошибки долготы, м	СКО ошибки широты, м	СКО ошибки долготы, м
21,6764	18,5986	0,2792	2,4535

Также было произведено моделирование коррекции только по горизонтальному профилю и только по вертикальному. Результаты представлены в табл. 2. По данным из табл. 2 видно, что алгоритм в режиме работы только по горизонтальному каналу имеет большие позиционные ошибки, поэтому его использование нецелесообразно. Режим работы по вертикальному каналу имеет высокую точность, но у режима работы сразу с двумя каналами (представлен в табл. 1) точность позиционирования выше.

Таблица 2

Статистические характеристики, полученные при различных режимах работы

Режим	Мат. ожидание ошибки широты, м	Мат. ожидание ошибки долготы, м	СКО ошибки широты, м	СКО ошибки долготы, м
Вертикальный канал	20,1905	20,9461	3,6852	9,4433
Горизонтальный канал	134,5362	337,7560	41,0113	267,7327

Натурные испытания. По указанной ранее дороге был осуществлен проезд на автомобиле с установленной в нем БИНС. Во время проезда были записаны показания датчиков БИНС, инерциальной и спутниковой траектории движения. В дальнейшем инерциальная траектория была скомпенсирована с помощью алгоритма наземной КЭНС, а результат компенсации сравнен с траекторией, полученной от СНС.

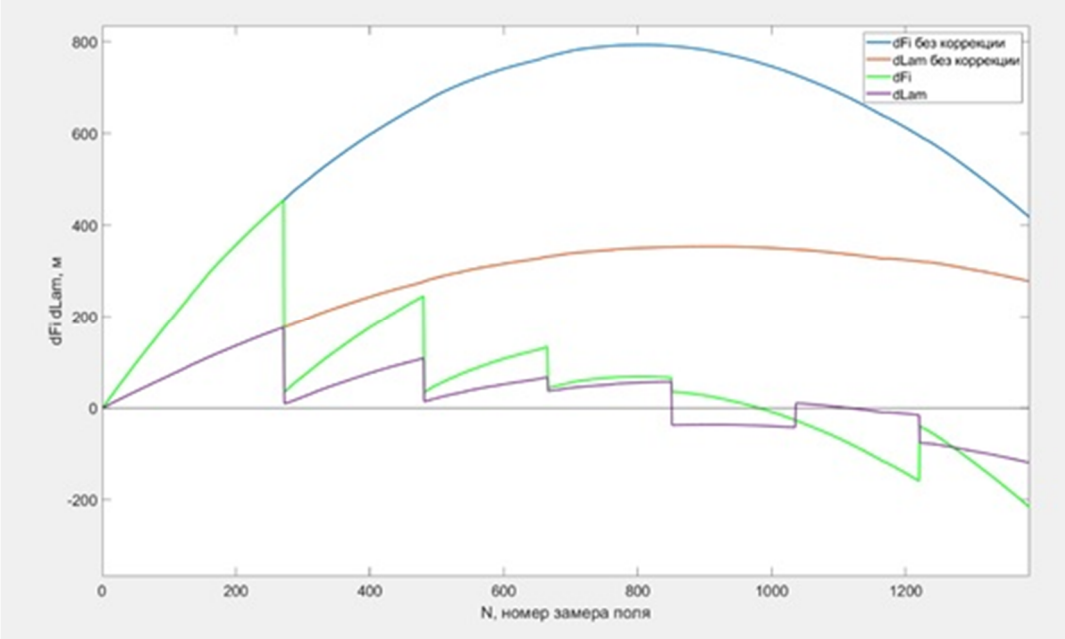


Рис. 1. Позиционные ошибки БИНС в автономном и корректируемом режимах

На рис. 1 представлены полученные во время тестового проезда ошибки широты и долготы в автономном режиме и ошибки, полученные с помощью коррекции КЭНС автономного решения. Замеры поля происходили с дискретностью, равной дискретности вертикального профиля.

Ошибки БИНС в автономном режиме имеют вид шулеровских колебаний с нарастающей во времени амплитудой. В корректируемом режиме ошибки списываются по мере накопления с постоянной составляющей, зависящей от ошибок по скорости. В данном случае значения постоянной и случайной ошибок в оценках местоположения приведены в табл. 3.

Таблица 3

Статистические характеристики полученные во время испытания

Параметры ошибок / Длина траектории (км)	Мат. ожидание ошибки широты, м	Мат. ожидание ошибки долготы, м	СКО ошибки широты, м	СКО ошибки долготы, м
40	37,1729	15,0303	67,9049	48,8636

Заключение. В данном докладе была рассмотрена САН-Н с использованием вертикального и горизонтального профилей местности. Особенностью данной системы является использование инерциальной системы в двух режимах: как датчика координат, скорости и углового положения объекта и как датчика вертикального профиля местности по данным тангажа и крена и горизонтального профиля траектории движения по данным курсового канала.

В ходе проведенного имитационно моделирования было установлено, что алгоритм функционирует корректно и обеспечивает погрешность навигации (позиционная ошибка) в пределах принятой дискретности карты (30 м.). Также были протестированы и определена точность работы трех разных режимов работы данного алгоритма: только по вертикальному профилю, только по горизонтальному и по обоим сразу.

В ходе натурных испытаний автомобиль с БИНС и СНС проехал по заранее выбранному маршруту. После этого инерциальные данные были скорректированы с помощью алгоритма САН-Н и сравнены с данными, полученными от СНС. Результаты эксперимента показывают возможность использования данного алгоритма в реальных условиях.

Для того чтобы уменьшить позиционные ошибки БИНС в автономном режиме, было решено привлечь информацию с одометра. Комплексная обработка данных с КЭНС и одометра позволит увеличить точность позиционирования при малых скоростях и при стоянках подвижного объекта, так как в эти моменты алгоритм КЭНС имеет наибольшие ошибки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Джанджгава Г.И., Августов Л.И.** Навигация по геополям. Научно-методические материалы. Москва: ООО Научтехлитиздат, 2018.
2. **Августов Л.И., Бабиченко А.В.** Наземная навигация по контурам местности // Сборник тезисов докладов на IAC. 2018.

D.V. Furtas, A.V. Nekrasov, A.A. Dzuev (JSC Inertial Technologies of Technocomplex, Rameskoye), L.I. Avgustov (JSC Ramenskoye Design Company, Rameskoye)

CORRECTION ALGORITHM OF AUTONOMOUS GROUND NAVIGATION SYSTEM BY USING TERRAIN CONTOURS

Autonomous ground navigation systems, using data on the horizontal and vertical profiles of the earth's surface, make it possible to control the current location of the vehicle with an accuracy close to that of mapping.

In the completed research, simulation modeling of this system was carried out and field experiments were carried out with a model of such a system. The research was carried out on a section of the A-107 highway with a length of about 40 km. The data on the position of the road in the horizontal and in height were checked using the control field auto laboratory.

О. А. СТЕПАНОВ, А. С. НОСОВ, А. Б. ТОРОПОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТОЧНЕНИЯ КООРДИНАТ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДАННЫХ О НЕСКОЛЬКИХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ

Рассматривается задача уточнения показаний навигационной системы при одновременном использовании данных о нескольких геофизических полях. Предлагается ряд характеристик, позволяющих сопоставлять траектории с позиций обеспечения эффективности решения задачи уточнения координат при комплексной обработке данных о нескольких полях. Обсуждается возможность применения приближенной процедуры их расчета. На примере решения задачи коррекции морской навигационной системы по данным о гравитационном поле и поле рельефа дна иллюстрируется целесообразность использования рассматриваемых характеристик для оценки эффективности комплексирования данных о геофизических полях.

Введение. В настоящее время навигационные системы (НС) со средствами коррекции по геофизическим полям (ГФП) Земли применяются для широкого класса подвижных объектов [1–8]. При уточнении координат здесь может быть использована информация о поле рельефа, аномалии силы тяжести (АСТ), магнитном и других полях, которая обычно представляется в виде цифровой карты. Уточнение координат осуществляется на основе сопоставления измеренных и вычисленных с использованием карты значений одного или нескольких полей. Одна из отличительных особенностей задачи навигации по ГФП связана с существенной зависимостью точности ее решения от изменчивости используемого при коррекции участка поля [5]. Это в свою очередь порождает задачу оценки навигационной информативности ГФП и задачу выбора наиболее информативных траекторий движения объекта, т. е. траекторий, вдоль которых обеспечивается наилучшее уточнение координат. Вопросы выбора информативных траекторий ранее обсуждались в основном применительно к решению задачи навигации по одному ГФП [9–17]. В тоже время известно, что одновременное использование двух и более ГФП позволяет повысить точность коррекции и сократить время обсервации, что особенно актуально для систем навигации по ГФП первого типа, в которых используются скалярные измерения поля (например, при измерении АСТ гравиметром или использовании однолучевого эхолота/высотомера) [18–22].

Целью работы является исследование эффективности уточнения координат морского подвижного объекта при использовании данных о нескольких ГФП.

Постановка задачи. Предполагается, что решается задача уточнения плоских координат морского подвижного объекта, выработанных по данным НС. Показания НС представим в виде $\mathbf{y}_i^{NS} = \mathbf{X}_i + \mathbf{\Delta}$, где $\mathbf{y}_i^{NS} = \left[y_1^{NS} \quad y_2^{NS} \right]_i^T$ – фиксированные известные показания НС в дискретные моменты времени; $i = \overline{1 \ldots I}$; $\mathbf{\Delta} = \left[\Delta_1 \quad \Delta_2 \right]^T$ – погрешности определения координат, которые считаются неизменными за время проведения обсервации; $\mathbf{X}_i = \left[X_1 \quad X_2 \right]_i^T$ – истинные координаты объекта. Тогда задачу уточнения координат с использованием нескольких ГФП можно свести к задаче оценивания неизвестного вектора $\mathbf{\Delta}$ по m-мерным векторным измерениям [5, 8]:

$$\mathbf{y}_i = \phi\left(\mathbf{y}_i^{NS} - \mathbf{\Delta}\right) + \mathbf{\varepsilon}_i \equiv \phi_i\left(\mathbf{\Delta}\right) + \mathbf{\varepsilon}_i, \tag{1}$$

где $\mathbf{y}_i = \left[y_1 \quad \ldots \quad y_m \right]_i^T$ – измерения m различных геофизических полей, $\phi(\bullet)$ – m-мерная нелинейная вектор-функция, описывающая с помощью заданных карт зависимости используемых полей от координат $\mathbf{X}_i$; $\mathbf{\varepsilon}_i$ – m-мерный вектор погрешностей измерителей. Будем считать, что вектор $\mathbf{\Delta}$ и погрешности измерений $\mathbf{\varepsilon}_i$ являются случайными с известными статистическими свойствами. В указанной постановке задача оценивания вектора $\mathbf{\Delta}$ может решаться в рамках байесовского подхода с использованием оптимальных нелинейных алгоритмов, основанных,

например, на методе сеток или методе Монте-Карло. Помимо оценки $\hat{\mathbf{\Delta}}_i$ эти алгоритмы, как известно, позволяют рассчитать условную $\breve{P}_{\Delta_i}$ и безусловную $\hat{P}_{\Delta_i}$ матрицы ковариаций погрешностей НС [2, 5, 23, 24].

При оценке информативности и выборе траекторий, рекомендованных для коррекции, наиболее естественным представляется ориентироваться на ожидаемую точность определения координат, которая количественно характеризуется безусловной матрицей ковариаций или соответствующим ей эллипсом погрешностей. Он, как известно, описывается большой *a* и малой *b* полуосями и дирекционным углом τ [25]. Так, в работе [22] при оценке эффективности комплексирования полей предлагалось использовать следующие характеристики, основанные на использовании диагональных элементов матрицы ковариаций $\sigma^2_{\Delta_1}, \sigma^2_{\Delta_2}$ и параметров среднеквадратического эллипса погрешностей:

- площадь эллипса $S = \pi ab$;
- величина большей полуоси эллипса *a*;
- величина радиальной погрешности определения местоположения $D = \sqrt{\sigma^2_{\Delta_1} + \sigma^2_{\Delta_2}}$.

Заметим, что процедура вычисления безусловной матрицы ковариаций достаточно трудоемка, поскольку обычно это осуществляется с помощью метода статистических испытаний и многократного решения нелинейной задачи фильтрации. В связи с этим широкое применение при анализе точности вообще и оценке информативности при использовании конкретных ГФП в частности получили методы, основанные на вычислении нижней границы по Рао–Крамеру [2, 12, 16, 18, 23]. Для случая использования нескольких полей можно предложить еще более простой вариант, который и обсуждается в настоящей работе.

Известно, что эффективность решения задачи коррекции по ГФП в значительной степени зависит от свойств полей, определяемых значениями и направлениями их градиентов, и ожидаемым уровнем σ_ε – среднеквадратических погрешности (СКП) для суммарных погрешностей карты и измерителя $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ [7, 18]. В частности, соотношение $\alpha = \sigma_\varepsilon / \overline{h}$, в котором $\overline{h}$ – среднее значение модуля градиента поля вдоль анализируемой траектории в пределах области неопределенности $\mathbf{\Delta}$, приближенно характеризует точность навигационного решения для одного поля. При этом величина угла θ между направлениями градиента для используемых полей и соотношение $\alpha = \sigma_\varepsilon / \overline{h}$ определяют эффективность их комплексирования [2, 18]. Известно, что при использовании измерений двух полей наилучшая точность достигается при примерно равных величинах α для каждого поля и значении угла θ, близком к 90° [2, 18]. Именно эти особенности учитываются при реализации предлагаемой приближенной процедуры оценки информативности траектории, которая основана на учете значений градиентов и их направлений для различных полей и не требует реализации нелинейных алгоритмов вычисления потенциальной точности. Предлагаемая процедура заключается в следующем. Для каждого j-го поля и заданной траектории с учетом области априорной неопределенности вычисляются средний градиент $\overline{h}_i^j = \sqrt{\left(H_{1i}^j\right)^2 + \left(H_{2i}^j\right)^2}$ и его направление, задаваемые вектором осредненных градиентов по направлениям осей абсцисс и ординат, – $H_i^j = \left[H_1^j \quad H_2^j \right]_i$. Затем формируются *m*-мерные «измерения» $\tilde{\mathbf{z}}_i = \left[\tilde{z}_1 \quad \ldots \quad \tilde{z}_m \right]^T$, представляемые в виде

$$\tilde{\mathbf{z}}_i = \mathbf{H}_i \Delta + \tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_i, \tag{2}$$

где $\mathbf{H}_i = \left[H^1, \ldots, H^m \right]_i^T$ – матрица размерности *m*×2, строки которой определяют градиенты соответствующих полей, осредненные вдоль заданной траектории с учетом размеров области априорной неопределенности координат; $\tilde{\boldsymbol{\varepsilon}}_i$ – *m*-мерный вектор суммарных погрешностей с независимыми между собой компонентами и соответствующим СКП σ^j, характеризующим ожидаемый уровень погрешностей карты и измерителя для каждого поля. Далее вычисляется матрица $\tilde{P}_{\Delta_i}$, определяющая точности оценивания вектора Δ по измерениям (2), и затем рассчитываются описываемые выше характеристики, аналогичные полученным из безусловной

матрицы ковариаций погрешностей НС $\widehat{P}_{\Delta_i}$. Рассмотрим пример, в котором рассчитаем и сопоставим обсуждаемые характеристики, для трех вариантов их расчета: с использованием безусловной матрицы ковариаций $\widehat{P}_{\Delta_i}$; с использованием матрицы, характеризующей нижнюю границу точности $\underset{\sim}{P}_{\Delta_i}$, и матрицы $\tilde{P}_{\Delta_i}$, полученной согласно описанной процедуре.

Пример. Предположим, что задача уточнения плоских координат морского подвижного объекта решается с использованием измерений относительного гравиметра и однолучевого эхолота. Модель суммарных погрешностей карт и измерителей $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ зададим в виде дискретных белошумных составляющих $\mathbf{v}_i = \begin{bmatrix} v_1 & v_2 \end{bmatrix}_i$, значения СКП которых представлено в табл. 1.

Для расчета и сопоставление матриц $\widehat{P}_{\Delta_i}$, $\tilde{P}_{\Delta_i}$ с использованием пакета GsTools [26] был смоделирован навигационный геофизический полигон с размерами 8×8 км, содержащий информацию о поле АСТ и поле рельефа. Изолинии соответствующих полей представлены на рис. 1. На указанном полигоне для анализа были выбраны две прямолинейные траектории, показанные сплошной и пунктирной линией. Стрелками отмечено направление движения по каждой из траекторий. При выполнении расчетов также были заданы параметры погрешностей НС и интервал получения измерений.

Таблица 1

Параметры моделирования

Параметр	Обозначение	Значение
Интервал получения измерений	d	100 м
Априорные СКП выработки координат НС	$\sigma_{\Delta_1}, \sigma_{\Delta_2}$	1000 м
СКП суммарной погрешности карты АСТ и гравиметра	σ^g	1 мГал
СКП суммарной погрешности карты глубин и эхолота	σ^d	18 м

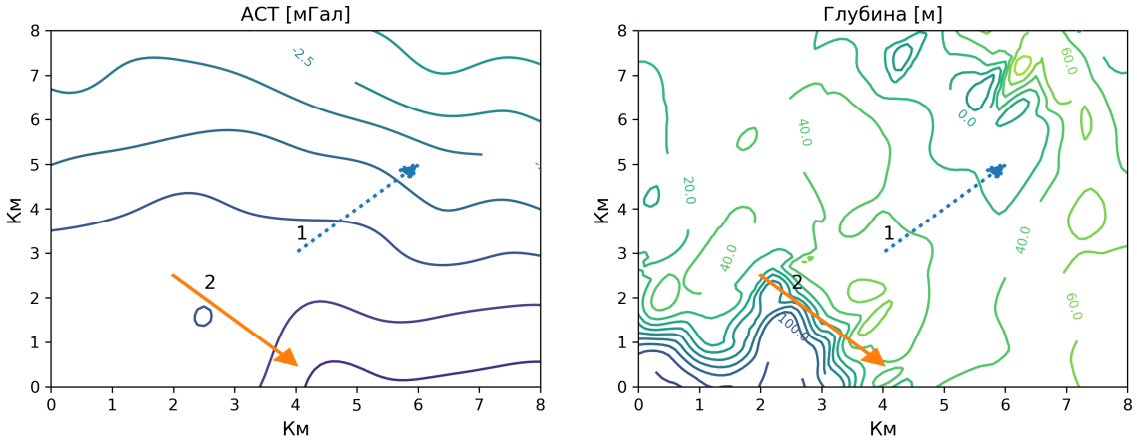


Рис. 1. Изолинии геофизических полей и анализируемые траектории

Проанализируем в первую очередь эффект от одновременного использовании данных о поле АСТ и поле рельефа дна, визуально сопоставив среднеквадратические эллипсы погрешностей, полученные из безусловной матрицы ковариаций $\widehat{P}_{\Delta_i}$ для двух траекторий. Для трех возможных вариантов использования измерений они представлены на рис. 2. Для каждого из рассматриваемых положений на траекториях дополнительно укажем градиент соответствующего поля. Длина представленных векторов градиента при этом соответствует отмасштабированной величине $\alpha_i^j = \sigma_\varepsilon / \overline{h}_i^j$.

Из представленных графиков можно заметить, что комплексное использование измерений для обеих траекторий позволяет существенно снизить погрешности навигационного решения, по сравнению с использованием данных только об одном поле. Для первой траектории это проявляется более явно: угол между направлениями градиента близок к 90°, а значения модулей

градиентов близки между собой. Для второй траектории в большей степени проявляется эффект от уточнения координат за счет использования поля рельефа дна. Это согласуется как с представленными значениями градиента, так и с изолиниями полей, показанными на рис. 1.

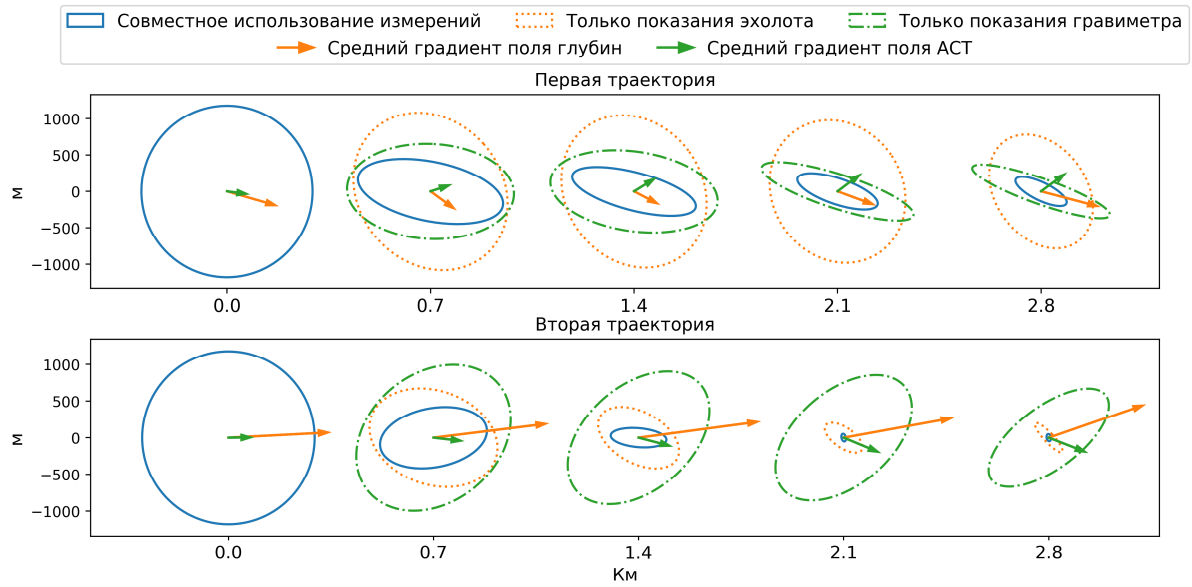


Рис. 2. Среднеквадратические эллипсы погрешности, соответствующие безусловной матрице ковариаций, рассчитанные с использованием данных только эхолота (оранжевые точки), только гравиметра (зеленый пунктир) и при одновременном их использовании (синяя сплошная линия)

Перейдем теперь к сопоставлению характеристик, рассчитанных согласно трем упомянутым выше способам их расчета. На рис. 3 и 4 для двух траекторий представлены графики радиальной среднеквадратической погрешности, величины большой полуоси и площади среднеквадратического эллипса погрешностей, полученные из безусловной матрицы ковариаций $\widehat{P}_{\Delta_i}$, матрицы ковариаций $\tilde{P}_{\Delta_i}$, рассчитанной согласно рассматриваемой упрощенной процедуре, а также матрицы $P_{\underset{\sim}{\Delta_i}}$, характеризующей нижнюю границу точности по Рао–Крамеру [18]. По оси абсцисс отложена длина пройденной траектории обсервации.

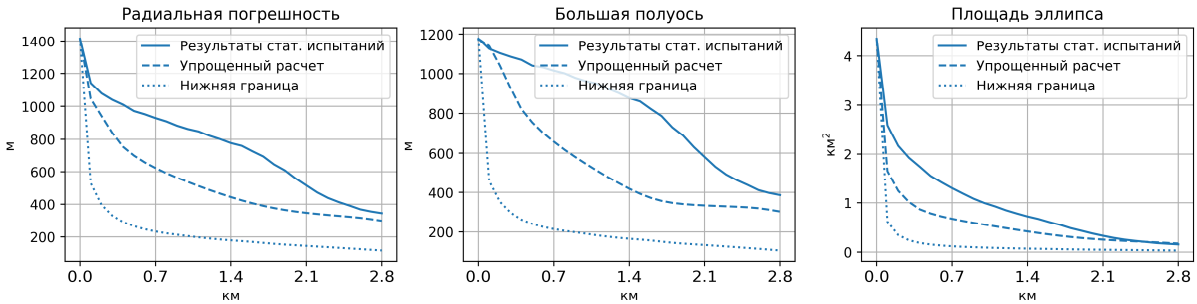


Рис. 3. Характеристики точности для первой траектории

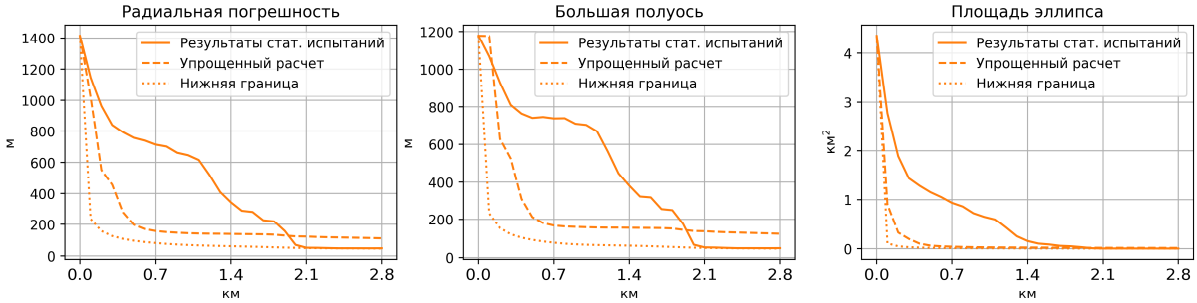


Рис. 4. Характеристики точности для второй траектории

В табл. 2 приведены численные результаты, соответствующие графикам на рис. 3, 4. Последовательность значений в столбцах таблицы соответствуют порядку графиков.

Таблица 2

Численные значения характеристик точности

Траектория		Пройденное расстояние (м)				
		0	700	1400	2100	2800
1	Результаты стат. испытаний	1414[1] / 1177[2] / 4.35[3]	929.1 / 1015.2 / 1.29	776.7 / 876.5 / 0.718	515.5 / 580.3 / 0.324	344.9 / 386.6 / 0.151
	Упрощенный расчет	1414 / 1177 / 4.35	623.0 / 658.3 / 0.66	443.8 / 418.9 / 0.411	347.0 / 333.9 / 0.247	298.0 / 303.0 / 0.168
	Нижняя граница точности	1414 / 1177 / 4.35	232.5 / 213.7 / 0.11	179.3 / 165.7 / 0.068	146.2 / 134.7 / 0.045	118.6 / 107.7 / 0.030
2	Результаты стат. испытаний	1414 / 1177 / 4.35	714.0 / 737.7 / 0.93	342.0 / 381.5 / 0.155	51.8 / 53.0 / 0.005	48.4 / 49.0 / 0.004
	Упрощенный расчет	1414 / 1177 / 4.35	157.3 / 167.5 / 0.04	139.0 / 155.7 / 0.025	122.5 / 137.5 / 0.019	111.4 / 124.2 / 0.016
	Нижняя граница точности	1414 / 1177 / 4.35	81.6 / 77.7 / 0.01	61.5 / 62.3 / 0.007	49.9 / 50.4 / 0.005	46.6 / 47.0 / 0.004

[1]Радиальная среднеквадратическая погрешность; [2]большая полуось среднеквадратического эллипса; [3]площадь среднеквадратического эллипса.

Анализ всех трех описанных выше характеристик, рассчитанных с использованием безусловной матрицы ковариаций $\tilde{P}_{\Delta_i}$, показывает, что при сопоставлении двух траекторий предпочтение следует отдать второй траектории, на которой обеспечиваются более высокие точности определения координат при комплексировании полей. Аналогичный вывод следует и при анализе тех же самых характеристик, рассчитанных упрощенно с использованием матриц $\tilde{P}_{\Delta_i}$ и $P_{\underset{\sim}{\Delta_i}}$. При этом можно подчеркнуть, что для второй траектории безусловные характеристики точности практически достигают значений, соответствующих нижней границе. Очевидно, что нахождение упрощенных характеристик, позволяющих проводить сопоставление траекторий с точки зрения эффективности их использования при комплексной обработке данных о двух полях, требует значительно меньшего объема вычислений по сравнению с их вычислением с использованием безусловной матрицы ковариаций. При этом следует иметь в виду, что при решении задачи выбора траектории приходится осуществлять перебор значительного их числа. Таким образом, приведенные результаты позволяют сделать вывод о целесообразности использования предлагаемых характеристик при сопоставлении траекторий и решении задачи их выбора.

Следует также обратить внимание на значительное уменьшение эллипса, соответствующего комплексному использованию полей, по сравнению со случаем их раздельного использования для второй траектории. Анализ показал, что такой эффект имеет место в силу многоэкстремального характера апостериорной плотности с «ложными» экстремумами при решении задачи только по полю рельефа дна. Привлечение же данных по второму полю АСТ позволяет, по сути, избавиться от этих «ложных» экстремумов в апостериорной плотности.

Заключение. Рассмотрены характеристики, позволяющие сопоставлять траектории, используемые при решении задачи навигации по данным о нескольких геофизических полях с позиций точности определения координат, достигаемой при их комплексной обработке. Обсуждена возможность применения приближенной процедуры расчета рассматриваемых характеристик. На примере решения задачи коррекции морской навигационной системы по данным о гравитационном поле и поле рельефа проиллюстрирована целесообразность применения рассматриваемых характеристик и приближенной процедуры их вычисления. В частности, эта процедура может быть использована и при анализе эффективности комплексного использования различных составляющих гравитационного поля.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00627)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Белоглазов И.Н., Казарин С.Н., Косьянчук В.В.** Обработка информации в иконических системах навигации, наведения и дистанционного зондирования местности. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 368 с.
2. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 370 с.
3. **Современные методы и средства** измерения параметров гравитационного поля Земли / ред. В.Г. Пешехонов, О.А. Степанов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
4. **Джанджгава Г.И., Августов Л.И.** Навигация по геополям. Москва: Научтехлитиздат, 2018. 296 с.
5. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1. Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация. 2015. Т. 23. № 3. С. 102–125.
6. **Melo, J., Matos, A.,** Survey on advances on terrain based navigation for autonomous underwater vehicles, Ocean Engineering, 2017, vol. 139, pp. 250–264.
7. **Степанов О.А., Носов А.С.** Алгоритм коррекции навигационной системы по данным карты и измерителя, не требующий предварительного оценивания значений поля вдоль пройденной траектории // Гироскопия и навигация. 2020. № Принято к публикации.
8. **Степанов О.А., Носов А.С., Торопов А.Б.** О классификации алгоритмов решения задачи навигации по геофизическим полям // Труды XXVII международной конференции по интегрированным навигационным системам. Санкт-Петербург, 2020. С. 11.
9. **Bar-Gill, A., Ben-Ezra, P., Bar-Itzhack, I.Y.,** Improvement of terrain-aided navigation via trajectory optimization, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1994, vol. 2, no. 4, pp. 336–342.
10. **Paris, S., Le Cadre, J.-P.,** Planning for terrain-aided navigation, Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion, FUSION 2002 (IEEE Cat.No.02EX5997), 2002, vol. 2, pp. 1007–1014.
11. **Feng, H. et al.,** Data map characteristic in aided navigation, PLANS 2004, Position Location and Navigation Symposium, IEEE, 2004, pp. 771–774.
12. Бикеева М.М. Выбор информативных траекторий в задаче корреляционно-экстремальной навигации // VIII конференция молодых ученых «Навигация и управление движением». Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2006. С. 192–196.
13. **Reynaud, S., Louis, C.,** A universal navigability map building approach for improving Terrain-Aided-Navigation accuracy, Proceedings of IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, IEEE, 2010, pp. 888–896.
14. **Wang, B. et al.,** The Gravity Matching Area Selection Criteria for Underwater Gravity-Aided Navigation Application Based on the Comprehensive Characteristic Parameter, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, vol. 21, no. 6, pp. 2935–2943.
15. **Berdyshev, V.I., Kiselev, L.V., Kostousov, V.B.,** Mapping Problems of Geophysical Fields in Ocean and Extremum Problems of Underwater Objects Navigation, IFAC-PapersOnLine, 2018, vol. 51, no. 32, pp. 189–194.
16. **Носов А.С., Степанов О.А., Торопов А.Б.** Навигационная информативность геофизических полей и выбор траекторий в задаче уточнения координат с использованием карты // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 5. С. 74–92.
17. **Дунаевская К.В., Киселев Л.В., Костоусов В.Б., Тарханов А.Е.** Оценка ошибок корреляционно-экстремальной навигации по карте аномалий силы тяжести на основе траекторных измерений с борта автономного подводного робота // Подводные исследования и робототехника. 2020. Т. 31. № 1. С. 13–20.
18. **Степанов О.А.** Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах. Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 1993. 85 с.
19. **Teixeira, F.C., Pascoal, A.M.,** Geophysical navigation of autonomous underwater vehicles, IFAC Proceedings Volumes, 2007, vol. 40, no. 17, pp. 117–122.
20. **Kato, N., Shigetomi, T.,** Underwater Navigation for Long-Range Autonomous Underwater Vehicles Using Geomagnetic and Bathymetric Information, Advanced Robotics, 2009, vol. 23, no. 7–8, pp. 787–803.
21. **Сазонова Т.В.** Сравнительные исследования методов экстремальной коррекции навигационных параметров по магнитному и гравитационному полям Земли для воздушных судов и необитаемых подводных аппаратов // Материалы XXX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов НН Острякова. 2016. С. 403–411.
22. **Носов А.С., Васильев В.А.** Анализ эффективности алгоритма комплексной обработки измерений в задаче уточнения координат с использованием датчика и карты поля // Материалы XXI конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». Санкт-Петербург, 2019. С. 293–295.
23. **Bergman, N.,** Recursive Bayesian estimation: Navigation and tracking applications, Sweden, Linkoping University, 1999, 219 p.
24. **Gustafsson, F. et al.,** Particle filters for positioning, navigation, and tracking, IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, vol. 50, no. 2, pp. 425–437.
25. **Степанов О.А.** Методы обработки измерительной информации. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2017. 196 с.
26. **Müller, S., Schüler, L.,** GSTools: Reverberating Red, Zenodo, 2019.

O.A. Stepanov, A.S. Nosov, A.B. Toropov (Concern CSRI Elektropribor, JSC; ITMO University, Saint-Petersburg, Russia)

EFFICIENCY ANALYSIS OF MAP-AIDED NAVIGATION USING MULTIPLE GEOPHYSICAL FIELDS

The problem of map-aided navigation with the simultaneous use of multiple geophysical fields is considered. Several characteristics are proposed that make it possible to compare trajectories from the standpoint of navigation accuracy. The procedure for their approximate calculation is discussed. The considered characteristics are analyzed and compared using the example of marine map-aided navigation using the data on the gravity and terrain fields.

Е. А. РЫБАКОВ,
(Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, Менделеево)

Р. У. ТИТОВ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ ПО ДАННЫМ О ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОРТОГОНАЛЬНЫХ РАЗЛОЖЕНИЙ

Исследуются возможность и эффективность синтеза экономичного в вычислительном отношении алгоритма решения задачи уточнения координат по данным карты и измерителя поля на основе ортогонального разложения сопоставляемых измеренной и вычисляемой по данным карты реализаций поля. На примере использования гравитационного поля приводятся результаты моделирования в зависимости от вида ортогонального разложения и числа членов ряда. Оценивается эффективность алгоритма путем сопоставления точности, достигаемой с его использованием, с точностью оптимального байесовского алгоритма. Оцениваются вычислительные затраты при реализации алгоритма.

Введение. В последнее время возрастает интерес к навигационным системам, основанным на использовании информации о различных геофизических полях [1–4]. Для решения такого рода задач предложен широкий спектр алгоритмов навигации по геофизическим полям, основанных на сопоставлении измеренных и вычисленных с использованием карты реализаций полей [4, 5], однако вопрос построения экономичных в вычислительном отношении алгоритмов сохраняет свою актуальность [5–9].

В работе [7] отмечается, что среди широкого многообразия алгоритмов можно выделить класс алгоритмов, в которых с целью их упрощения предполагается предварительная обработка измерений. Так, например, в работе [8] описан алгоритм, основанный на предварительной обработке реализации поля для снижения погрешностей измерения и последующего упрощения алгоритма. Еще один вариант упрощенных алгоритмов рассмотрен в работе [9]. Предлагаемый там алгоритм основан на разложении реализации поля по ортогональным функциям Хаара и последующем отыскании аналога такого разложения на карте с помощью алгоритма случайного леса. В настоящей работе производится исследование точности алгоритма такого типа в зависимости от выбранного базиса ортогональных функций и количества членов ряда. В работе рассматриваются различные ортогональные базисы, такие как тригонометрический, Хаара, Чебышева и другие, анализируется зависимость точности, достигаемой с помощью рассматриваемого алгоритма, от количества слагаемых в разложении поля по каждому базису. Результаты сравниваются с байесовским оптимальным алгоритмом.

Кроме того, в докладе по сравнению с предыдущей работой представлено обобщение данного алгоритма для задачи на плоскости. Апробация обсуждаемых алгоритмов выполнялась с использованием измерений гравитационного поля Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Современные методы и средства** измерения параметров гравитационного поля Земли / ред. В.Г. Пешехонов, О.А. Степанов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
2. **Джанджгава Г.И., Августов Л.И.** Навигация по геополям. М.: Научтехлитиздат, 2018. 296 с.
3. **Денисенко О.В., Фатеев В.Ф.** Дорожная карта: методы и средства автономной навигации по гравитационному полю // Навигация по гравитационному полю земли и ее метрологическое обеспечение. Доклады научно-технической конференции. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017. С. 5–16.
4. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1. Обзор алгоритмов // Гироскопия и навигация. 2015. Т. 90. №3. С. 102–125.
5. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофи-зическим полям. Ч. 2. Современные тенденции развития // Гироскопия и навигация. 2015. Т. 91. №4. С. 147–159.
6. **Степанов О.А., Носов А.С.** Алгоритм коррекции навигационной системы по данным карты и измерителя, не требующий предварительного оценивания значений поля вдоль пройденной траектории // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 1–21.

7. **Степанов О.А., Носов А.С., Торопов А.Б.** О классификации алгоритмов решения задачи навигации по геофизическим полям // Сборник материалов XXVII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам. 2020. С. 326–336.
8. **Stepanov, O.A., Nosov, A.S.,** A two-stage algorithm for estimation of unknown parameters using nonlinear measurements, 21st IFAC World Congress, 2020.
9. **Рыбаков Е.А., Титов Р.У.** Решение задачи навигации по гравитационному полю с использованием ортогонального разложения Хаара // Сборник трудов XXII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» (с международным участием). СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020.

E.A. Rybakov (State scientific center of Russian Federation VNIIFTRI, Mendeleevo),
R.U. Titov (ITMO University, St. Petersburg)

ALGORITHM FOR SOLVING THE NAVIGATION PROBLEM USING ORTHOGONAL EXPANSIONS OF GEOPHYSICAL FIELDS

The possibility and efficiency of a computationally economical algorithm for solving the problem of specifying coordinates from the map data and measurements is discussed. Algorithm based on comparing the orthogonal decomposition of the map and measurements. The results of modeling are given on the example of using the gravitational field and the relief field, the performance of the proposed algorithm and the dependence of the results obtained on the type of orthogonal representation, the number of members and the method used for comparing realizations. The efficiency of the algorithm is estimated by comparing it with the accuracy of the optimal Bayesian algorithm. The computational costs of the algorithms are estimated.

А. В. МОТОРИН, Д. А. КОШАЕВ, О. А. СТЕПАНОВ, О. М. ЯШНИКОВА
(Университет ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ И СГЛАЖИВАНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТ ВОЗМУЩЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ВЕКТОРНОЙ ГРАВИМЕТРИИ

Приводятся результаты фильтрации и сглаживания горизонтальных компонент вектора возмущения силы тяжести при решении задачи векторной гравиметрии с морского объекта в условиях неопределенности интервала корреляции для модели вектора возмущения силы тяжести. Для решения задачи применен многоальтернативный фильтр, позволяющий идентифицировать постоянные неизвестные параметры модели в процессе решения. Обсуждается возможность идентификации и получения решения задачи при изменчивости параметров и их описании с помощью квазидетерминированной функции.

Введение. Вследствие сложного характера поверхности и внутреннего строения Земли вектор ускорения действительной силы тяжести не совпадает с вектором ускорения нормальной силы тяжести, рассчитанным для принятой модели Земли. Разность между ними характеризуется вектором возмущения силы тяжести (ВВСТ) [1]. Горизонтальные компоненты ВВСТ обычно определяются совокупностью двух углов отклонения: в плоскостях меридиана и первого вертикала [1, 2]. Географические карты этих углов востребованы при решении широкого круга прикладных задач, в частности в задачах навигации, как источник дополнительной корректирующей информации [2].

Известны различные методы определения горизонтальных компонент ВВСТ на подвижном основании, в том числе и на морском объекте [2–7]. Наибольшую известность получили гравиметрический метод, основанный на измерении аномалии силы тяжести, и астрономо-геодезический метод, основанный на сравнении астрономических и геодезических координат, а также его модификация – инерциально-геодезический метод. Кроме того, существуют методы и их комбинации, основанные на измерении вторых производных геопотенциала (метод гравитационной градиентометрии), измерении высоты траектории (метод спутниковой или самолетной альтиметрии) и использовании глобальных моделей гравитационного поля Земли (метод слежения «спутник–спутник» и другие спутниковые методы) [2, 7]. Однако для построения карт удаленных районов Земли и районов с сильной изменчивостью гравитационного поля наиболее широкое распространение получил инерциально-геодезический метод, основанный на определении горизонтальных компонент ВВСТ с использованием разницы в астрономических и географических координатах, вырабатываемых соответственно инерциальной (ИНС) и спутниковой (СНС) навигационными системами [5–7]. В отличие от традиционного астрономо-геодезического метода в инерциально-геодезическом ИНС вырабатывает как координаты, так и их производные, что позволяет использовать разностные скоростные измерения [5–7]. Эффективность решения такой задачи при различных моделях горизонтальных компонент ВВСТ, а также ее чувствительность анализировались ранее [5–11]. В частности, в работах [10, 11] отмечается выигрыш на уровне 70% в точности оценивания компонент ВВСТ при использовании алгоритмов сглаживания по сравнению с алгоритмами фильтрации, а также выявлена чувствительность алгоритмов оценивания к неточностям задания модели ВВСТ.

Целью настоящей работы является дальнейшее развитие стохастических алгоритмов оценивания горизонтальных компонент ВВСТ, т.е. построение алгоритмов фильтрации и сглаживания для решения задачи векторной гравиметрии с морского объекта в условиях неопределенности в знании параметров, характеризующих изменчивость ВВСТ. В частности, в докладе анализируется точность многоальтернативного фильтра, позволяющего идентифицировать интервал корреляции в модели ВВСТ непосредственно в ходе решения задачи, что создает предпосылки для реализации достаточно простого варианта решения задачи сглаживания.

Постановка и решение задачи оценивания ВВСТ. В настоящей работе задача оценивания горизонтальных компонент ВВСТ при использовании инерциально-геодезического метода ре-

шается в рамках стохастической постановки [3–7]. Как отмечалось, суть задачи состоит в сравнении астрономических широты и долготы, ϕ, λ, вырабатываемых высокоточной ИНС, и географических широты и долготы B, L, вырабатываемых СНС. В отсутствие погрешностей этих систем можно записать:

$$\begin{aligned} \phi - B &= -\xi, \\ (\lambda - L) &= \eta / \cos B, \end{aligned} \tag{1}$$

где ξ – горизонтальная компонента ВВСТ в проекции на плоскость меридиана; η – горизонтальная компонента ВВСТ в проекции на плоскость первого вертикала [5–9]. Однако на практике в разностные измерения (1) входят погрешности ИНС, вызванные дрейфом ее чувствительных элементов, и погрешности СНС. Поэтому по разностным измерениям (1) решается задача оценивания вектора состояния, который формируют модели погрешностей ИНС, ее чувствительных элементов, небелошумные погрешности СНС и непосредственно вводимые стохастические модели горизонтальных компонент ВВСТ.

Используемая модель погрешностей СНС по координатам места включала белый шум и коррелированную составляющую, описываемую марковским процессом первого порядка с интервалом корреляции 1 ч. Погрешность СНС по скорости описывалась белым шумом. Рассматривался дифференциальный фазовый режим с исключением целочисленной неоднозначности с СКО погрешности 3 см по координатам и 3 см/с по скорости аналогично работам [10, 11]. Модель погрешностей ИНС, построенной на гироскопах с уровнем точности 10^{-4}°/ч и акселерометрах с уровнем точности 1 угл.с., была адаптирована из описанной в [12, 13]. Модели изменчивости горизонтальных компонент ВВСТ при равномерном движении по траектории были приняты аналогичными приведенным в [8] со спектральными плотностями:

$$S_\eta(\omega) = \frac{4\alpha\sigma^2\omega^2}{(\omega^2+\alpha^2)^2}; \quad S_\xi(\omega) = \frac{2\alpha\,\sigma^2}{\omega^2+\alpha^2}; \tag{2}$$

$$\alpha_\varepsilon = \frac{V}{2{,}3d}, \qquad \sigma_\varepsilon = 15\ угл.\text{с},$$

где σ^2, α, d – дисперсия, коэффициент затухания и радиус корреляции горизонтальных компонент ВВСТ. Отметим, что в работе рассматривается вариант сильнорасчлененного поля со среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma = 15$ угл.с. Особенность рассматриваемой задачи заключалась в том, что радиус корреляции *d,* характеризующий изменчивость ВВСТ, считался неизвестным, что порождает нелинейный характер задачи оценивания. Построенный на основе методов многоальтернативной фильтрации алгоритм [14–17], уже применявшийся для решения задачи оценивания аномалии силы тяжести, позволяет определить этот параметр и решить задачу фильтрации относительно горизонтальных компонент ВВСТ и других неизвестных, входящих в вектор состояния. Погрешность оценивания этого параметра и расчетное СКО фильтра приведены на рис. 1.

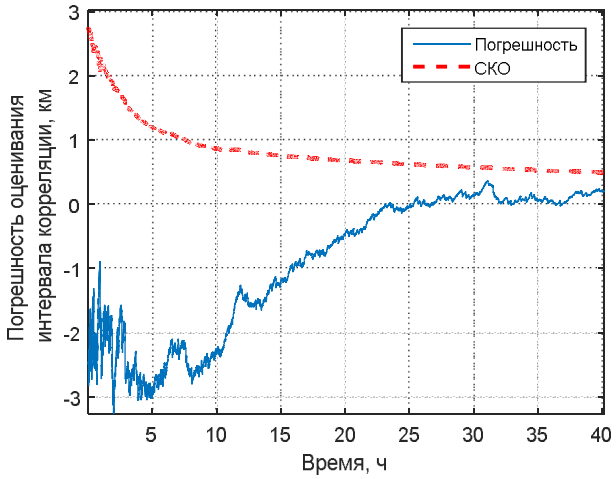


Рис. 1. Реализация погрешности оценивания интервала корреляции *d* и расчетное СКО

Условие постоянства параметров модели позволяет достаточно просто реализовать решение в режиме сглаживания с использованием полученных по результатам фильтрации оценок параметра модели и стандартных линейных калмановских алгоритмов [18, 19]. Таким образом, использование многоальтернативного фильтра позволяет уточнить интервал корреляции, к которому чувствительны алгоритмы сглаживания [11]. Отметим, что существует возможность задания изменчивости радиуса корреляции d путем представления его в виде функции времени с неизвестными случайными постоянными параметрами – так называемого квазидетерминированного процесса [19]. Такое описание создает предпосылки для решения задачи оценивания ВВСТ в режиме сглаживания при изменчивом радиусе корреляции с использованием тех же алгоритмов.

Заключение. Задача оценивания горизонтальных компонент ВВСТ сформулирована и решена как нелинейная задача стохастической фильтрации и сглаживания в условиях неопределенности в знании интервала корреляции горизонтальных компонент ВВСТ. Проведено моделирование, показавшее возможность получения его оценок наряду с оценками компонент ВВСТ с использованием многоальтернативного фильтра. Кратко описан алгоритм реализации режима сглаживания горизонтальных компонент ВВСТ по результатам определения параметров модели ВВСТ при условии постоянства последних. Обсуждена возможность идентификации и получения решения задачи оценивания горизонтальных компонент ВВСТ при изменчивости оцениваемого параметра модели и его описании с помощью квазидетерминированной функции.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ 18-19-00627.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Елагин А.В.** Теория фигуры Земли. Учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2012. 174 с.
2. **Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли** / ред. В.Г. Пешехонов, О.А. Степанов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
3. **Несенюк Л.П., Старосельцев Л.П., Бровко Л.Н.** Определение уклонений отвесных линий с помощью инерциальных навигационных систем. Из книги «Памяти профессора Л.П. Несенюка. Избранные труды и воспоминания» // Вопросы кораблестроения. 1980. №46. С. 16–22.
4. **Анучин О.Н.** Инерциальные методы определения параметров гравитационного поля Земли на море: дис. ... докт. техн. наук. Санкт-Петербург, 1992. 425 с.
5. **Дмитриев С.П.** Инерциальные методы в инженерной геодезии. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1997. 208 с.
6. **Емельянцев Г.И., Блажнов Б.А., Степанов А.П.** О возможности определения УОЛ в высоких широтах с использованием прецизионного инерциального модуля и двухантенной спутниковой аппаратуры // Гироскопия и навигация. 2015. № 3. С. 72–81.
7. **Конешов В.Н., Евстифеев М.И., Челпанов И.Б., Яшникова О.М.** Методы определения уклонений отвесной линии на подвижном основании // Гироскопия и навигация. 2016. Т. 24. №. 3. С.75–95.
8. **Li, X., Jekeli, C.,** Ground-vehicle INS/GPS vector gravimetry, Geophysics, 2008, vol. 73, no. 2, pp. I1–I10.
9. **Старосельцев Л.П., Яшникова О.М.** Оценка погрешностей определения параметров сильно аномального гравитационного поля Земли // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. №3. С. 533–540.
10. **Степанов О.А., Кошаев Д.А., Моторин А.В., Носов А.С., Яшникова О.М.** Исследование алгоритмов оценивания вектора возмущения силы тяжести на подвижном основании // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова. 2018. С. 201–209.
11. **Stepanov, O.A., Koshaev, D.A., Yashnikova, O.M., Motorin, A.B., Staroseltsev, L.P.,** Sensitivity of Algorithms for Estimating the Gravity Disturbance Vector to its Model Uncertainty, 5th IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements, TG-SMM 2019.
12. **Емельянцев Г.И., Степанов А.П.** Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2016.
13. **Markley, F.L. and Crassidis, J.L.,** Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control, New York, NY: Springer Verlag, 2014.
14. **Lainiotis, D.G.**, Partitioning: A unifying framework for adaptive systems, II: Control, Proc. IEEE, 1976, vol. 64, no. 8, pp. 1182–1198.
15. **Sarkka, S.,** Bayesian Filtering and Smoothing. Cambridge University Press, 2013.
16. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации при решении задач обработки навигационной информации, 3 изд. Санкт-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2003.
17. **Моторин А.В., Степанов О.А., Кошаев Д.А.** Идентификация параметров модели аномалии в задаче авиационной гравиметрии методами нелинейной фильтрации // Гироскопия и навигация. 2015. №3 (90), С. 95–101.

18. **Rauch, H.E., Tung, F., and Striebel, C.T.**, Maximum likelihood estimates of linear dynamic systems, Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. J., 1965, vol. 8, no. 3, pp. 1445–1450.
19. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч. 2. Введение в теорию фильтрации. СПб.: Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 417 с.

A.V. Motorin D.A. Koshaev, O.A. Stepanov, O.M. Yashnikova (CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University St. Petersburg, Russia)

MODEL IDENTIFICATION AND SMOOTHING ALGORITHMS FOR THE HORIZONTAL COMPONENTS OF GRAVITY DISTURBANCE VECTOR AND VECTOR GRAVIMETRY

Paper presents the results of filtering and smoothing for the horizontal components of the gravity disturbance vector. Solution of the problem is considered under conditions of marine survey and unknown correlation interval and other parameters in the model of gravity disturbance vector. To solve the problem, a multiple model filter was applied, which identify constant unknown parameters of the model along with the gravity disturbance vector estimation. Paper also considers the possibility of solution to identification and estimation problem under conditions of varying model parameters, which changes in accordance with the known quasi-deterministic function.

Д. А. КОШАЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

РЕКУРРЕНТНОЕ ПОСТРОЕНИЕ СГЛАЖИВАЮЩИХ СПЛАЙНОВ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ДАННЫХ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Представлен метод оценивания коэффициентов одномерного кубического B-сплайна со штрафом на вторую производную – так называемого сглаживающего сплайна. Метод основан на применении рекуррентных процедур калмановской фильтрации и сглаживания. Он, в отличие от известных аналогов, не требует предварительного расчета моделей на всем интервале решения. Эта особенность облегчает адаптивное по отношению к параметру сглаживания построение сплайна. Показано, что разработанный метод может применяться и для построения двумерного сглаживающего сплайна в виде тензорного произведения одномерных кубических B-сплайнов со штрафом на вторые частные производные. Приводятся примеры использования предложенных решений для аппроксимации данных профильной и площадной гравиметрической съемки.

Введение. Сглаживающие полиномиальные сплайны являются удобным инструментом для камерального оценивания процессов с учетом ограничений на их изменчивость. Особенно широко применяются кубические сплайны со штрафом на вторую производную. Сглаживающие сплайны могут служить разумной альтернативой фильтрам, требующим описать процесс в виде стохастических дифференциальных уравнений. Такие уравнения не всегда известны, как, например, при обработке данных гравиметрической съемки [1].

Первоначально для построения сглаживающих полиномиальных сплайнов были разработаны нерекуррентные методы [2–4]. Затем появились более экономичные рекуррентные методы на базе процедур калмановской фильтрации и сглаживания [5, 6]. Но для их реализации требуется предварительно определить модели вектора состояния для всех шагов предстоящего решения. Это не рационально, когда параметр сглаживания не задан и нужно проверить множество сплайнов с различными гипотезами об этом параметре. Неудачные гипотезы могут быть отбракованы на промежуточных шагах построения сплайна, и тогда часть предварительно вычисленных для всего решения моделей остается невостребованной.

В настоящем докладе представлен рекуррентный метод построения одномерного сглаживающего B-сплайна, в котором модели вектора состояния вычисляются пошагово по мере обработки измерений. При неопределенном заранее параметре сглаживания предлагается адаптивное решение с вычислением апостериорных вероятностей гипотез об этом параметре. Предусматривается изменчивость параметра сглаживания. Представляется, что апостериорные вероятности позволяют более объективно оценить достоверность параметра сглаживания по сравнению с применяемыми для этих целей критериями обобщенной перекрестной проверки, несмещенного риска, обобщенной функции правдоподобия [6–11].

Вместе с тем рассматривается двумерный сглаживающий сплайн в виде тензорного произведения одномерных кубических B-сплайнов со штрафом на вторые частные производные. Известны нерекуррентные трудоемкие методы построения такого сплайна [10, 12]. В докладе речь идет об определении коэффициентов двумерного сглаживающего сплайна путем последовательного применения рекуррентного метода для одномерного случая.

Приводятся полученные на основе моделирования результаты предлагаемых решений в задаче оценивания аномалии силы тяжести на профиле и на полигоне.

1. Рекуррентное оценивание коэффициентов одномерного сглаживающего сплайна при заданном параметре сглаживания. Кубический B-сплайн для скалярной переменной $x \in [x_0; x_n]$ имеет вид [4] $s(x)=\sum_{i=1}^{n+3}\beta_i B(x \mid x_{i-4},...,x_i)$, где $B(x \mid x_{i-4},...,x_i)$ – базисные кубические сплайны, x_i – заданные узлы, такие что $x_{-3}=x_{-2}=x_{-1}=x_0$, $x_n=x_{n+1}=x_{n+2}=x_{n+3}$, $x_i=x_{i-1}+\Delta x_i$, $\Delta x_i>0$, $i=\overline{1,n}$, $\beta_i, i=\overline{1,n+3}$ – неизвестные коэффициенты, $n \geq 3$. Пусть имеются

измерения $z_i = s_i + v_i,\ i=\overline{1,n}$, где $s_i = s(x_i)$, v_i – центрированная гауссовская чисто случайная помеха с известной дисперсией $r_i > 0$. Требуется определить коэффициенты $\beta_i, i=\overline{1,n+3}$ сплайна $s(x)$, минимизирующие критерий [2–4] $J = \sum_{i=0}^{n}(z_i - s_i)^2 / r_i + \int_{x_0}^{x_n} \lambda(x) s''(x)^2 dx$, где $\lambda(x)$ – заданный параметр сглаживания, принимающий на интервалах $[x_{i-1}; x_i), i=\overline{1,n}$ в общем случае различные постоянные значения $\lambda_i > 0$. Такой сплайн называется сглаживающим.

Алгоритм рекуррентного оценивания коэффициентов $\beta_i, i=\overline{1,n+3}$ основан на представлении значений $s_i = s(x_i),\ \ddot{s}_i = \ddot{s}(x_i)$ и интеграла в критерии J в виде $s_0 = \beta_1,\quad s_n = \beta_{n+3},\quad s_i = C_i^1\beta_{i+1} + C_i^2\beta_{i+2} + C_i^3\beta_{i+3},\ i=\overline{1,n-1},\quad s_i'' = D_i^1\beta_{i+1} + D_i^2\beta_{i+2} + D_i^3\beta_{i+3}$, $\int_{x_0}^{x_n}\lambda(x)s''(x)^2dx = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{n}\lambda_i\Delta x_i \begin{pmatrix} s_{i-1}'' \\ s_i'' \end{pmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_{i-1}'' \\ s_i'' \end{pmatrix}$. Здесь коэффициенты $C_i^l, D_i^l, l=1,2,3$ зависят от длины интервалов между узлами Δx_i. Они определяются с помощью аналитических выражений, вытекающих из рекуррентного алгоритма Кокса де Бура для базисных сплайнов. Опираясь на приведенные выражения, можно показать, что минимизация J сводиться к задаче оптимального стохастического сглаживания вектора состояния $b_i = (\beta_i, \beta_{i+1}, \beta_{i+2}, \beta_{i+3})^{\mathrm{T}},\ i=\overline{1,n}$ на закрепленном интервале. Она решается с использованием фильтра Калмана (ФК), обрабатывающего измерения в прямом времени, и уравнений Рауха–Тюнга–Штрибеля [13], решаемых в обратном времени с применением сохраненных на каждом шаге результатов ФК. Ниже приводится описание ФК.

В качестве обратной априорной ковариационной матрицы вектора b_1 выступает $\frac{\lambda_1\Delta x_1}{6} D_{01}^{\mathrm{T}} \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} D_{01}$, где $D_{01} = \begin{pmatrix} D_0^1 & D_0^2 & D_0^3 & 0 \\ 0 & D_1^1 & D_1^2 & D_1^3 \end{pmatrix}$. Априорная оценка для b_1 нулевая. При $i=1$ выполняется обработка двумерного вектора измерений $z_{01} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_1^1 & C_1^2 & C_3^3 \end{pmatrix} b_1 + \begin{pmatrix} v_0 \\ v_1 \end{pmatrix}$. Уравнение формирующего фильтра для $b_i, i=\overline{2,n}$ имеет вид $b_i = \left(\begin{array}{c|c} \mathrm{O}_{3\times1} & E_{3\times3} \\ \hline 0 & -\left(2D_{i-1}^1 \quad D_i^1 + 2D_{i-1}^2 \quad D_i^2 + 2D_{i-1}^3\right)/D_i^3 \end{array}\right) b_{i-1} + \left(\begin{array}{c} \mathrm{O}_{3\times1} \\ \hline w_i \end{array}\right)$, в котором E, O – единичная и нулевая матрицы соответствующих размерностей, w_i – центрированный гауссовский белый шум с дисперсией $q_i = 12/[\lambda_i\Delta x_i (D_i^3)^2]$. При $i \geq 2$ помимо реальных измерений $z_i = \begin{pmatrix} 0 & C_i^1 & C_i^2 & C_i^3 \end{pmatrix} b_i + v_i,\ i=\overline{2,n-1}$ и $z_n = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} b_n + v_n$ обрабатываются фиктивные измерения $z_i^* = s_i'' + v_i^* = \begin{pmatrix} 0 & D_i^1 & D_i^2 & D_i^3 \end{pmatrix} b_i + v_i^*$, где v_i^* считается некоррелированной с w_i и v_i центрированной гауссовской чистослучайной помехой с дисперсией $r_i^* = 4/(\lambda_i\Delta x_i)$. В уравнении для оценки фильтрации подставляются $z_i^* = 0,\ i=\overline{1,n}$.

Оценка значения сплайна $s(x)$ и дисперсия ее ошибки для $x \in [x_{i-1}; x_i],\ i=\overline{1,n}$ определяются как $\hat{s}(x) = \mathbb{B}_i(x)\hat{b}_i,\ \sigma_s^2(x) = \mathbb{B}_i(x)P_i\mathbb{B}_i^{\mathrm{T}}(x)$, где $\hat{b}_i, P_i$ – оценка сглаживания вектора b_i коэффициентов сплайна и ковариационная матрица ее погрешности, $\mathbb{B}_i(x) = [B(x \mid x_{i-4}, \ldots, x_i), B(x \mid x_{i-3}, \ldots, x_{i+1}), B(x \mid x_{i-2}, \ldots, x_{i+2}), B(x \mid x_{i-1}, \ldots, x_{i+3})]$.

2. Построение одномерного сглаживающего сплайна при неопределенном параметре сглаживания. Если значение параметра сглаживания λ заранее не определено, возникает задача адаптивного оценивания коэффициентов сплайна, которая может быть решена на основе мно-

гоальтернативного подхода [14, 15], предполагающего реализацию банка ФК с применением представленных выше выражений для гипотез $\lambda_i = \lambda_i^\ell,\ \ell = \overline{1,L}$ (ℓ – номер гипотезы). При этом апостериорные, т.е. условные по отношению к измерениям z_i, вероятности гипотез вычисляются исходя из выражений $p_i^\ell = \mathbf{P}(\lambda = \lambda^\ell \mid \bar{z}_i) \propto \prod_{u=2}^{i} \mathbf{f}(z_u \mid \bar{z}_{u-1}, \lambda = \lambda^\ell) \propto \exp(-\frac{1}{2}\sum_{u=2}^{i}(\vartheta_u^\ell)^2 / \Theta_u^\ell) \Big/ \sqrt{\prod_{u=2}^{i}\Theta_u^\ell}$, где $\mathbf{f}(\cdot\,|\,\cdot)$ – условные плотности вероятности, $\bar{z}_1 = z_{01}$, $\bar{z}_i = (\bar{z}_{i-1}^{\mathrm{T}}, z_i)^{\mathrm{T}}$ при $i \geq 2$, $\vartheta_i^\ell, \Theta_i^\ell$ – невязка измерения z_i, полученная ФК в предположении, что $\lambda_i = \lambda_i^\ell$, и дисперсия этой невязки. Априорные вероятности всех гипотез считаются одинаковыми. Здесь учтено, что обратная ковариационная матрица невязки измерения z_{01} нулевая для всех ℓ. В ФК на каждом шаге $i \geq 2$ сначала отдельно обрабатывается z_i^*, а затем – z_i. В ходе решения гипотезы, для которых p_i^ℓ превышает заданный порог, вместе с соответствующими ФК отбрасываются. Это ускоряет получение адаптивного решения, тем более что оно, в отличие от известных рекуррентных методов, не требует предварительного вычисления моделей для ФК на всех *n* шагах.

По оценкам $\hat{b}_i^\ell$ коэффициентов сплайна и ковариационным матрицам $P_i^\ell, i = \overline{1,n+3}$, которые соответствуют оставшимся в рассмотрении гипотезам о значении параметра сглаживания λ, вычисляются средневзвешенные значения $\hat{b}_i, P_i,\ i = \overline{1,n+3}$. При этом в качестве весов выступают апостериорные вероятности гипотез в конечной точке p_n^ℓ. Далее по $\hat{b}_i, P_i,\ i = \overline{1,n+3}$ с применением приведенных в конце раздела 1 выражений вычисляются значения средневзвешенного сплайна $\hat{s}(x)$ и дисперсии его погрешности $\sigma_s^2(x)$ для любых *x*.

Для примера рассмотрим задачу оценивания аномалии силы тяжести (АСТ) [1] с помощью сглаживающего сплайна при неопределенном заранее параметре сглаживания. В роли измерений z_i здесь выступают значения АСТ, полученные по данным аэрогравиметрической съемки на галсе длиной 400 км при частоте данных 1 Гц и скорости полета 50 м/с. Переменная *x* – это длина пути вдоль галса. Расстояние между узлами сплайна Δx_i =50 м для всех $i = \overline{1,n}$, *n*=8000. Среднеквадратическое отклонение (СКО) помех измерений $\sqrt{r_i}$ =1 мГал. Требуется аппроксимировать измерения АСТ сглаживающим сплайном. Параметр сглаживания не задан. В примере использована реализация АСТ, промоделированная в виде нестационарного случайного процесса на основе модели Джордана [16] при СКО 30 мГал и интервале корреляции, который меняется по линейному закону в зависимости от длины пути вдоль галса. При этом СКО градиента АСТ вначале галса составляет 1 мГал/км, а в конце галса – 5 мГал/км. Реализация профиля АСТ приведена на рис. 1.

Были получены два решения: с постоянным и линейно меняющимся параметром сглаживания. В первом решении с $\lambda_i = \mathrm{const}$ возможные значения параметра сглаживания определяются одномерной сеткой значений λ^ℓ, во втором решении с $\lambda_i = [(n-i)\lambda_1 + (i-1)\lambda_n]/(n-1)$ – двумерной сеткой $\lambda_1^\ell, \lambda_n^\ell,\ \ell = \overline{1,L}$. Рис. 2 дает представление о распределении апостериорных вероятностей p_n^ℓ гипотез о параметре сглаживания на последнем шаге. Здесь построены графики огибающих для отношения p_n^ℓ к максимальной из них. Обращаем внимание, что распределение p_n^ℓ в обоих решениях имеет одноэкстремальный характер. Во втором решении наиболее вероятное значение λ_1^ℓ намного превышает наиболее вероятное значение λ_n^ℓ. Это логично, поскольку АСТ в начале галса изменяется медленнее. В то же время разброс апостериорных вероятностей по оси λ_1^ℓ значительно больше, чем по оси λ_n^ℓ. Справедливо приближенное соотношение $\sqrt{\hat{\lambda}} \approx (\sqrt{\hat{\lambda}_1} + \sqrt{\hat{\lambda}_n})/2$ между наиболее вероятными значениями параметра сглаживания в первом $\hat{\lambda}$ и втором $\hat{\lambda}_1, \hat{\lambda}_n$ решениях.



Рис. 1. Профиль аномалии силы тяжести в виде нестационарного процесса

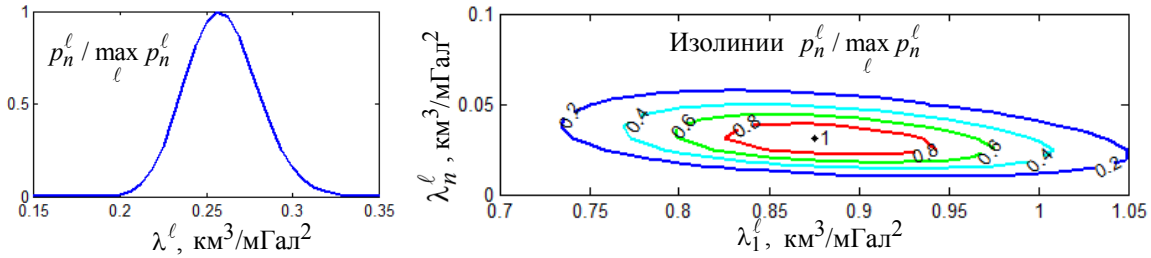


Рис. 2. Распределение финальных апостериорных вероятностей гипотез о параметре сглаживания. Слева при постоянном параметре сглаживания. Справа при линейно меняющемся

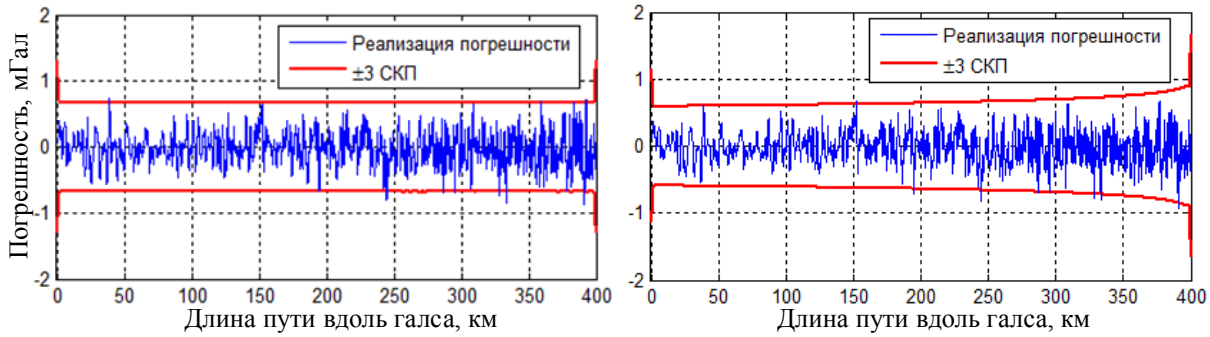


Рис. 3. Погрешности оценок профиля аномалии силы тяжести с утроенными расчетными СКП. Слева – при постоянном параметре сглаживания. Справа – при линейно меняющемся

На рис. 3 представлены графики погрешностей оценивания профиля АСТ с дискретностью 5 м в сопровождении утроенных среднеквадратических погрешностей (СКП), рассчитанных по ковариационным матрицам P_i^ℓ. Видно, что в первом решении СКП не передает увеличение уровня реальных погрешностей с ростом длины пути, тогда как во втором решении СКП вполне адекватно отражает изменение уровня погрешностей. В обоих решениях заметны всплески погрешностей в начале и в конце галса – это проявление обычного для задач сглаживания краевого эффекта.

Полученные результаты демонстрируют работоспособность алгоритма построения одномерного сглаживающего сплайна с многоальтернативным представлением параметра сглаживания. Несколько предпочтительнее выглядит решение, которое предусматривает изменение параметра сглаживания, поскольку в нем расчетные СКП лучше согласуются с реальной точностью.

Следует добавить, что рассчитанный по результатам 1-го решения сплайн (для $\lambda_i = \text{const}$) незначительно отличается от сплайна, который получается с применением MATLAB-функции построения сглаживающих сплайнов csaps [17] при использовании наиболее вероятного значения параметра сглаживания $\lambda \approx 0{,}26$ км^3/мГал^2 (см. рис. 2, слева). Функция csaps работает только с заданными во входных аргументах параметрами сглаживания и не определяет СКП.

В рассмотренном примере АСТ можно также оценить с помощью банка ФК [14, 15], настроенных на стохастические уравнения модели Джордана при различных гипотезах об интервале корреляции. Но такое решение предполагает, что структура модели АСТ известна. Представленные решения в этом смысле являются более универсальными.

3. Оценивание коэффициентов двумерного сглаживающего сплайна. Рассмотрим сплайн двух переменных $x \in [x_0; x_n]$ и $y \in [y_0; y_n]$, представленный как тензорное произведение одномерных кубических B-сплайнов $s(x,y)=\sum_{i=1}^{n+3}\sum_{j=1}^{m+3}\beta_{i,j}B(x \mid x_{i-4},...,x_i)B(y \mid y_{j-4},...,y_j)$, где y_j – узлы со свойствами, аналогичными x_i, $\beta_{i,j}, i=\overline{1,n+3}, j=\overline{1,m+3}$ – неизвестные коэффициенты, $n \ge 3, m \ge 3$. Измерения представляют собой $z_{i,j}=s_{i,j}+v_{i,j}$, где $i=\overline{0,n}, j=\overline{0,m}$, $s_{i,j}=s(x_i,y_j)$, $v_{i,j}$ – центрированная гауссовская чисто случайная помеха с известной дисперсией $r_{i,j}>0$. Требуется найти коэффициенты $\beta_{i,j}, i=\overline{1,n+3}, j=\overline{1,m+3}$, минимизирующие критерий [12]:

$$J=\sum_{i=0}^{n}\sum_{j=0}^{m}(z_{i,j}-s_{i,j})^2 / r_{i,j}+\int_{x_0}^{x_n}\int_{y_0}^{y_m}\lambda(x,y)[s''_{xx}(x,y)^2+s''_{yy}(x,y)^2]\,dy\,dx,$$

где $\lambda(x,y)$ –параметр сглаживания.

Точное решение такой задачи требует обращения матрицы размерности $(n+3)(m+3)\times(n+3)(m+3)$, что вызывает сложности при больших n и m. Экономичное приближенное решение может быть получено с помощью двухэтапной процедуры.

На 1-м этапе для каждого $j=\overline{0,m}$ выполняется оценивание коэффициентов $\tilde{\beta}_i(y_j), i=\overline{1,n+3}$ сплайна одной переменной $x-$ $s(x,y_j)=\sum_{i=1}^{n+3}\tilde{\beta}_i(y_j)B(x \mid x_{i-4},...,x_i)$. Это делается с помощью описанного в разделе 1 метода по исходным $z_{i,j}, i=\overline{0,n}$ и фиктивным $z^*_{i,j}=s''_{xx}(x_i,y_j)+v^*_{i,j}, i=\overline{2,n}$ измерениям с учетом выражений $s_{0,j}=\tilde{\beta}_1(y_j)$, $s_{n,j}=\tilde{\beta}_{n+3}(y_j)$, $s_{i,j}=C_i^1\tilde{\beta}_{i+1}(y_j)+C_i^2\tilde{\beta}_{i+2}(y_j)+C_i^3\tilde{\beta}_{i+3}(y_j), i=\overline{1,n-1}$, $s''_{xx}(x_i,y_j)=D_i^1\tilde{\beta}_{i+1}(y_j)+D_i^2\tilde{\beta}_{i+2}(y_j)+D_i^3\tilde{\beta}_{i+3}(y_j)$. В результате формируются оценки $\hat{\tilde{b}}_i(y_j)$ значений вектора состояния $\tilde{b}_i(y_j)=\left(\tilde{\beta}_i(y_j),\tilde{\beta}_{i+1}(y_j),\tilde{\beta}_{i+2}(y_j),\tilde{\beta}_{i+3}(y_j)\right)^{\mathrm{T}}$ для $i=\overline{1,n}$ и ковариационные матрицы $\tilde{P}_i(y_j)$ их погрешностей.

На 2-м этапе для каждого $i=\overline{1,n+3}$ выполняется оценивание коэффициентов $\beta_{i,j}, j=\overline{1,m+3}$ сплайна одной переменной $y-\tilde{\beta}_i(y)=\sum_{j=1}^{m+3}\beta_{i,j}B(y \mid y_{j-4},...,y_j)$. С этой целью снова привлекается метод из раздела 1. В качестве реальных измерений здесь выступают оценки $\hat{\tilde{\beta}}_i(y_j)=\tilde{\beta}_i(y_j)+\tilde{v}_{i,j}, j=\overline{0,m}$, взятые из полученных на 1-м этапе $\hat{\tilde{b}}_i(y_j)$. Для истинных значений $\tilde{\beta}_i(y_j)$ используются выражения $\tilde{\beta}_i(y_0)=\beta_{i,1}$, $\tilde{\beta}_i(y_m)=\beta_{i,m+3}$, $\tilde{\beta}_i(y_j)=\tilde{C}_j^1\beta_{i,j+1}+\tilde{C}_j^2\beta_{i,j+2}+\tilde{C}_j^3\beta_{i,j+3}, j=\overline{1,m-1}$. Дисперсиями помех $\tilde{v}_{i,j}$ служат дисперсии погрешностей оценок $\hat{\tilde{\beta}}_i(y_j)$, извлеченные из ковариационных матриц $\tilde{P}_i(y_j)$. Корреляция между $\tilde{v}_{i,j}$ для разных i в расчет не принимается. Фиктивные измерения на данном этапе представляют собой $\tilde{z}^*_{i,j}=\tilde{\beta}''_i(y_j)+\tilde{v}^*_{i,j}, i=\overline{2,m}$ с $\tilde{\beta}''_i(y_j)=\tilde{D}_j^1\beta_{i,j+1}+\tilde{D}_j^2\beta_{i,j+2}+\tilde{D}_j^3\beta_{i,j+3}$. Коэффициенты $\tilde{C}_j^l, \tilde{D}_j^l, l=1,2,3$ определяются по аналогии с $C_j^l, D_j^l, l=1,2,3,$ но для узлов y_j. По завершении 2-го этапа получаем оценки значений вектора состояния $b_{i,j}=\left(\beta_{i,j},\beta_{i,j+1},\beta_{i,j+2},\beta_{i,j+3}\right)^{\mathrm{T}}$ для $i=\overline{1,n+3}, j=\overline{1,m}$ с коэффициентами двумерного сплайна $s(x,y)$.

Обратная априорная ковариационая матрица вектора состояния, модель его динамики, дисперсии помех фиктивных измерений на обоих этапах определяются с учетом параметра сглаживания λ, как описано в разделе 1. При неопределенном параметре сглаживания используется многоальтернативный подход, изложенный в разделе 2 для одномерного сплайна. Для повышения точности определения коэффициентов $\beta_{i,j}, i=\overline{1,n+3}, j=\overline{1,m+3}$ приведенную выше двухэтап-

ную процедуру целесообразно реализовать еще раз, поменяв порядок переменных, т.е. на 1-м этапе для каждого $i=\overline{0,n}$ оценить коэффициенты $\bar{\beta}_j(x_i)$, $j=\overline{1,m+3}$ сплайна одной переменной y – $s(x_i,y)=\sum_{j=1}^{m+3}\bar{\beta}_j(x_i)B(y\,|\,y_{j-4},...,y_j)$, а на 2-м этапе для каждого $j=\overline{1,m+3}$ получить оценки коэффициентов $\beta_{i,j}$, $i=\overline{1,n+3}$ сплайна одной переменной x – $\bar{\beta}_j(x)=\sum_{i=1}^{n+3}\beta_{i,j}B(x\,|\,x_{i-4},...,x_i)$. После чего усреднить оценки $\beta_{i,j}$ для двух способов.

В качестве примера снова рассмотрим задачу оценивания АСТ, но теперь уже на полигоне в форме квадрата со стороной 400 км. В примере АСТ промоделирована с помощью MATLAB-функции, предназначенной для генерации стационарных полей [18]. Карта использованной реализации поля АСТ приведена на рис. 4. Обращаем внимание, что по y изменения поля более плавные, чем по x. Расстояние между узлами $\Delta x_i=\Delta y_j$ =5 км для всех $i=\overline{1,n}$, $j=\overline{1,m}$, n = m = 80. СКО помех измерений $\sqrt{r_{i,j}}$ =1 мГал.

Сопоставим результаты оценивания АСТ, полученные с помощью представленного решения и MATLAB-функции csaps, которая позволяет построить многомерный сглаживающий сплайн на основе тензорного произведения одномерных сплайнов при фиксированном параметре сглаживания. Значение параметра сглаживания для csaps выбрано так, чтобы СКП сплайна была минимальной для данной реализации АСТ. Предложенное решение учитывало неопределенность параметра сглаживания для каждого галса и по координате x, и по координате y. Изображения на рис. 5 с помощью цвета передают абсолютные значения погрешностей двух сплайнов. Для двух изображений использованы идентичные цветовые шкалы. Видно, на нижнем изображении, которое соответствует предложенному решению, больше синего из нижней части шкалы погрешности, а значит, оно точнее, чем csaps. В целом по всему полигону СКП для csaps составляет 0,58 мГал, а для предложенного решения – 0,38 мГал. Благодаря использованию экономичной рекуррентной процедуры оценивания коэффициентов одномерного сплайна объем вычислений при построении двумерного сплайна не вызывает трудностей.

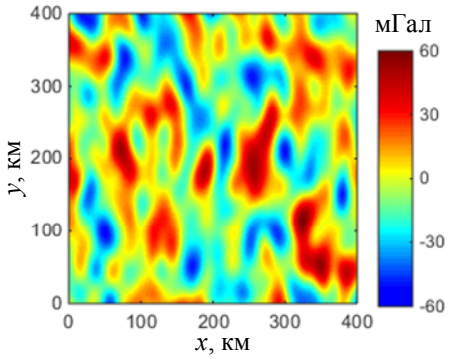


Рис. 4. Карта аномалии силы тяжести

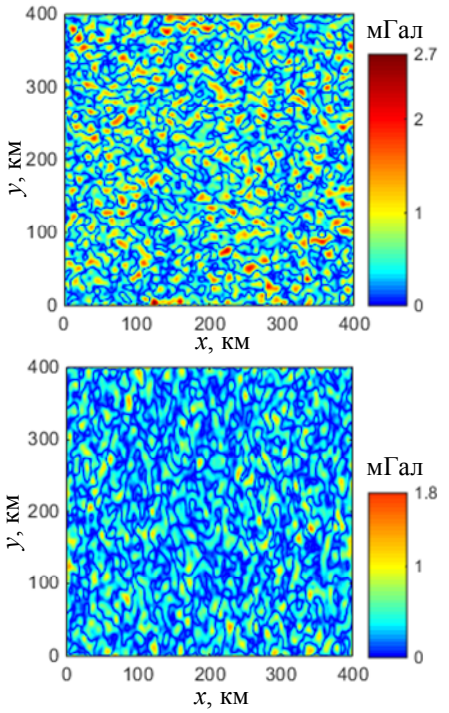


Рис. 5. Модули погрешностей оценок аномалии силы тяжести. Вверху при использовании MATLAB-функции csaps с параметром сглаживания, минимизирующим СКП. Внизу при использовании предложенного решения с адаптацией параметра сглаживания на каждом галсе

Заключение. В представленном методе коэффициенты одномерного сглаживающего кубического B-сплайна оцениваются в предположении, что для соседних узлов они связаны стохастическими уравнениями, а помимо реально существующих измерений имеются измерения второй производной оцениваемого процесса, тождественно равные нулю. Такой подход позволяет обойтись без предварительного расчета моделей на всем интервале решения, что требуется для реализации существующих рекуррентных методов построения сглаживающих сплайнов. При неопределенном параметре сглаживания коэффициенты сплайна оцениваются с помощью адаптивной многоальтернативной процедуры, предусматривающей вычисление апостериорных вероятностей гипотез о параметре сглаживания. Коэффициенты двумерного сглаживающего сплайна, пред-

ставленного как тензорное произведение одномерных сплайнов, легко определяются в результате последовательного применения метода построения одномерного сглаживающего сплайна. Представленные решения позволяют оперативно обрабатывать большие массивы данных гравиметрической съемки.

Работа проводилась при поддержке гранта
Российского научного фонда (проект № 18-19-00627)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Современные методы и средства** измерения параметров гравитационного поля Земли / ред. В.Г. Пешехонова, О.А. Степанова. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
2. **Reinsch, C.,** Smoothing by spline functions, Numer. Math., 10, 1967, pp. 177–183.
3. **Wahba, G.,** Improper priors, spline smoothing, and the problem of guarding against model errors in regression, J. Roy. Statist. Soc. B, 40, 1978, pp. 364–372.
4. **Завьялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошниченко В.Л.** Методы сплайн-функций. М.: Наука. 1980.
5. **Weinert, H.L., Byrd, R.H., Sidhu, G.S.,** A Stochastic Framework for Recursive Computation of Spline Functions. Part II: Smoothing Splines, Journal of Optimization Theory and Applications, February 1980, vol. 30, no. 2, pp. 255–268.
6. **Kohn, R., Ansley, C.F.,** A new algorithm for spline smoothing based on smoothing a stochastic process, SIAM J. Sci. Stat. Comput, January 1987, vol. 8, no. 1, pp. 33–48.
7. **Wahba, G.,** Spline Models for Observational Data. SIAM, Philadelphia, Pennsylvania. 1990.
8. **Eggermont, P.P.B., La Riccia, V.N.,** Maximum Penalized Likelihood Estimation. Volume II: Regression, Springer, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, 2009.
9. **Wang, Y.,** Smoothing splines. Methods and applications, Chapman and Hall/CRC, Santa Barbara, California, 2011.
10. **Gu, C.,** Smoothing Spline ANOVA Models. Second Edition, Springer, New York, Heidelberg, Dordrecht, London, 2013.
11. **Lukas, M.A., de Hoog, F.R., Anderssen, R.S.,** Practical use of robust GCV and modified GCV for spline smoothing, Computational Statistics, March 2016, vol. 31, issue 1, pp. 269–289.
12. **Wood, S.N.,** Generalized Additive Models: An Introduction with R, Second Edition, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017.
13. **Медич Дж.** Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: «Энергия», 1973.
14. **Лайниотис Д.Г.** Разделение – единый метод построения адаптивных систем. I Оценивание // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике. 1976. Т.64. №8. С. 8–27.
15. **Дмитриев С.П., Степанов О.А.** Многоальтернативная фильтрация в задачах обработки навигационной информации // Радиотехника. 2004. № 7. С. 11–17.
16. **Jordan, S.K.,** Self-consistent Statistical Models for Gravity Anomaly and Undulation of the Geoid // Journal of Geophysical Research, 1972, vol. 77, no. 20, pp. 2156–2202.
17. https://www.mathworks.com/help/curvefit/csaps.html.
18. **Botev, Z.I**., Circulant Embedding method for generating stationary Gaussian field (https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/38880-circulant-embedding-method-for-generating-stationary-gaussian-field), MATLAB Central File Exchange, Retrieved October 2, 2020.

D.A. Koshaev (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, St. Petersburg)

RECURSIVE CONSTRUCTION OF SMOOTHING SPLINES FOR GRAVIMETRIC SURVEY DATA APPROXIMATION

A method is presented for estimating the coefficients of a one-dimensional cubic B-spline with a penalty on the second-order derivative, also known as a smoothing spline. The method is based on the use of recursive procedures of Kalman filtering and smoothing. In contrast to its known analogues, this method does not require any preliminary calculation of models within the entire interval of solution. This feature facilitates the spline construction when the smoothing parameter is not predetermined. It is shown that the developed method can also be used for constructing a two-dimensional smoothing spline in the form of a tensor product of one-dimensional cubic B-splines with a penalty on the second-order partial derivatives. Some examples are provided to illustrate the application of the proposed solutions for approximation of 1D and 2D gravimetric data.

О. С. АМОСОВ, С. Г. АМОСОВА
(ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва)

ОПТИМАЛЬНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЛУБОКИХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЮ ДВИЖЕНИЕМ

Дан критический анализ современного состояния использования глубоких нейронных сетей со сверточными и рекуррентными слоями, рекуррентной сети долгой краткосрочной памяти, управляемых рекуррентных блоков для задач оценивания применительно к навигации и управлению движением. Дано сопоставление нейросетевых методов с традиционными для понимания и объяснения их работы. Выявлены отличия, достоинства и недостатки глубоких нейронных сетей применительно к решению задач оценивания. Дан анализ возможности машинного обучения с подкреплением для задач оценивания в навигации и управлении движением в режиме реального времени. Сформулированы перспективы использования нейронных сетей при обработке навигационных данных, в том числе для задач адаптивного оценивания и траекторного слежения.

Введение. Искусственные нейронные сети (НС) нашли и продолжают находить широкое применение в различных областях. Бурное развитие сейчас переживает развитие глубоких нейронных сетей, основанных на сверточных [1] и рекуррентных слоях [2, 3] для обработки видеоизображений в системах компьютерного зрения и временных рядов. В последние годы хорошие результаты были получены для распознавания лиц, технических объектов, динамических ситуаций, информационной безопасности, прогнозирования временных рядов [4]. В меньшей мере это касается обработки навигационной информации, хотя в последнее время появляются работы, посвященные использованию традиционных и глубоких НС и в задачах обработки навигационной информации [5, 6]. При этом, однако, чаще всего иллюстрируется лишь факт работоспособности НС.

Однако в указанных приложениях, в частности в навигации, требуют понимания и объяснения полученные результаты с использованием нейросетевых методов. В соответствии с современной тенденцией развития объяснимого искусственного интеллекта (Explainable Artificial Intelligence, XAI) [7] это должно быть обязательно выполнено для нейронных сетей так же, как и для любой интеллектуальной технологии, для исключения спекуляций в части применения интеллектуальных технологий при решении задач оценивания состояния и управления сложными техническими системами.

В связи с этим целью данной работы является критический анализ оптимального метода оценивания, основанного на использовании глубоких нейронных сетей, применительно к задачам обработки навигационной информации с формулировкой преимуществ, существенных недостатков и качественных ограничений их использования для навигации и управления движением.

Постановка задачи оценивания. Необходимо найти оценку n-мерного вектора состояния динамической системы, стохастический процесс которой не обязательно является марковским процессом первого порядка, по m-мерному вектору измерений, исходя из условия минимизации заданного критерия. Заметим, что в некоторых случаях связь между измерениями и состоянием может быть задана с помощью линейного или нелинейного уравнения, в которое аддитивно или мультипликативно входит случайный вектор, передающий наличие ошибок измерения. Задача оценивания представлена в виде схемы на рис. 1.

К такой постановке могут быть сведены конкретные прикладные задачи нерекуррентного и рекуррентного оценивания случайного вектора и случайных последовательностей, связанные с навигацией и управлением движением [5–8].

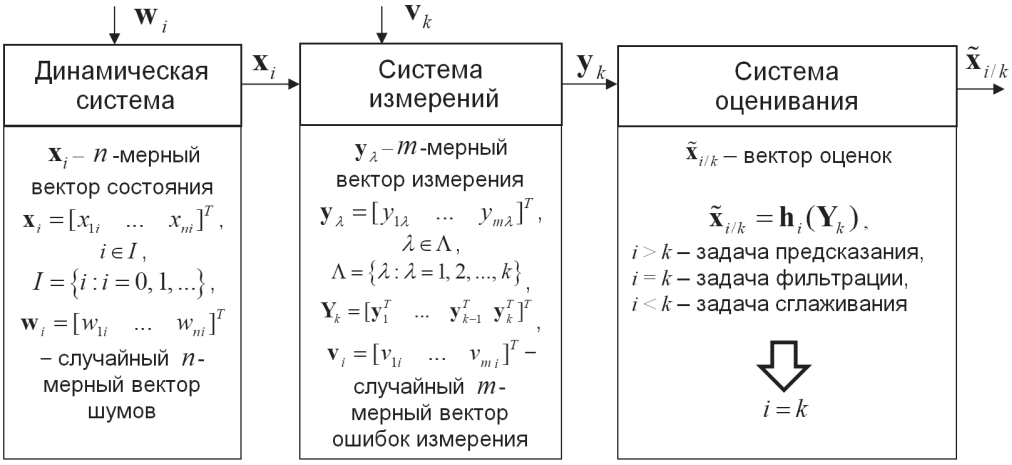


Рис. 1. Задача оценивания

Решение задачи оценивания. Для решения кратко рассматриваются традиционные оптимальные и субоптимальные алгоритмы: нерекуррентные байесовские алгоритмы, фильтры калмановского типа, метод Монте-Карло.

В качестве глубоких нейронных сетей для оценивания состояния динамических систем рассматриваются сети со сверточными и рекуррентными слоями, рекуррентная сеть долгой кратковременной памяти (англ. Long Short-Term Memory, LSTM), управляемых рекуррентных блоков (англ. Gated Recurrent Units, GRU).

Проводится сопоставление традиционных и нейросетевых методов. По результатам сопоставления традиционных и нейросетевых методов представлены два утверждения по интерпретации сверточных НС.

Утверждение 1. Фильтр с растущей памятью. Утверждение позволяет трактовать сверточную НС, обучаемую в соответствии с приведенным критерием, как оптимальный линейный нерекуррентный байесовский алгоритм.

Если имеется набор данных (обучающая выборка)

$$\{(\mathbf{y}^{(j)}, \mathbf{x}^{(j)})\}, \; j = \overline{1.n_o},$$

в котором пары $\mathbf{y}^{(j)}$, $\mathbf{x}^{(j)}$, $j = \overline{1.n_0}$ представляют независимые между собой реализации случайного составного вектора $\mathbf{z} = [\mathbf{x}^T \; \mathbf{y}^T]^T$ с ф.п.р.в. $f(\mathbf{x}, \mathbf{y})$, $\mathbf{x} \equiv \mathbf{x}_i$, $\mathbf{y} \equiv \mathbf{Y}_i \equiv [\mathbf{y}_1^T, \dots, \mathbf{y}_{i-1}^T, \mathbf{y}_i^T]^T$, то сверточная НС с размерностью ядра c, равной размерности вектора измерений k

$$\tilde{\mathbf{x}}^{CNN}(\mathbf{y}, \tilde{\mathbf{W}}) = \mathbf{w}_0 + \mathbf{W}_\mathbf{y},$$

при выборе для ее обучения с учителем в качестве критерия обучения функции

$$\tilde{J}^*(\tilde{\mathbf{W}}) = \frac{1}{n_0} \sum_{j=1}^{n_0} \left\| \mathbf{x}^{(j)} - \tilde{\mathbf{x}}^{CNN(j)}(\mathbf{y}^{(j)}, \tilde{\mathbf{W}}) \right\|^2$$

обеспечивает при увеличении числа используемых для обучения реализаций n_o получение оценок, близких по своим свойствам к оценкам, получаемым с помощью байесовского алгоритма, оптимального в классе линейных алгоритмов:

$$\tilde{\mathbf{x}}^{CNN}(\mathbf{y}, \tilde{\mathbf{W}}) = \bar{\mathbf{x}}^* + \mathbf{P}_{\mathbf{xy}}^* (\mathbf{P}_{\mathbf{yy}}^*)^{-1} [\mathbf{y} - \bar{\mathbf{y}}^*],$$

где $\bar{\mathbf{x}}^* = \mathbf{m}_\mathbf{x}^*$; $\bar{\mathbf{y}}^* = \mathbf{m}_\mathbf{y}^*$; $\mathbf{P}_{\mathbf{yy}}^*$, $\mathbf{P}_{\mathbf{xy}}^*$ представляют собой выборочные значения математических ожиданий и соответствующих матриц ковариаций.

Утверждение 2. Фильтр с ограниченной памятью. Утверждение позволяет трактовать сверточную НС, обучаемую в соответствии с приведенным критерием, как субоптимальный линейный нерекуррентный байесовский алгоритм, в котором используются c-последних измерений.

Если имеется набор данных (обучающая выборка)

$$\{(\mathbf{Y}_{i_1}^{i(j)}, \mathbf{x}^{(j)})\}, \; j = \overline{1.n_o},$$

в котором пары $\mathbf{Y}_{i_1}^{i\,(j)}$, $\mathbf{x}^{(j)}$, $j=\overline{1.n_0}$ представляют независимые между собой реализации случайного составного вектора $\mathbf{z}=[\mathbf{x}^T \quad \mathbf{Y}_{i_1}^{i\,T}]^T$ с ф.п.р.в. $f(\mathbf{x},\mathbf{Y}_{i_1}^i)$, $\mathbf{x}\equiv\mathbf{x}_i$, $\mathbf{Y}_{i_1}^i\equiv[\mathbf{y}_{i_1}^T,...,\mathbf{y}_{i_1-1}^T,\mathbf{y}_{i_1}^T]^T$, $i_1=i-c+1, c<i,$ то сверточная НС с размерностью ядра c, меньшей размерности вектора измерений k

$$\widetilde{\mathbf{x}}^{CNN}(\mathbf{Y}_{i_1}^i,\widetilde{\mathbf{W}})=\mathbf{w}_0+\mathbf{W}_{\mathbf{Y}_{i_1}^i},$$

при выборе для ее обучения с учителем в качестве критерия обучения функции

$$\widetilde{J}^*(\widetilde{\mathbf{W}})=\frac{1}{n_0}\sum_{j=1}^{n_0}\left\|\mathbf{x}^{(j)}-\widetilde{\mathbf{x}}^{CNN(j)}(\mathbf{Y}_{i_1}^{i\,(j)},\widetilde{\mathbf{W}})\right\|^2$$

обеспечивает при увеличении числа используемых для обучения реализаций n_0 получение оценок, близких по своим свойствам к оценкам, получаемым с помощью байесовского линейного алгоритма, в котором используется не весь набор измерений с 1 по i, а набор или окно измерений от $i_1=i-c+1, c<i,$ до i, включающий c последних измерений:

$$\widetilde{\mathbf{x}}^{CNN}(\mathbf{Y}_{i_1}^i,\widetilde{\mathbf{W}})=\overline{\mathbf{x}}^*+\mathbf{P}^*_{\mathbf{x}\mathbf{Y}_{i_1}^i}(\mathbf{P}^*_{\mathbf{Y}_{i_1}^i\mathbf{Y}_{i_1}^i})^{-1}[\mathbf{Y}_{i_1}^i-\overline{\mathbf{Y}}_{i_1}^{i\,*}],\ \mathbf{x}\equiv\mathbf{x}_i,\ \mathbf{Y}_{i_1}^i\equiv[\mathbf{y}_{i_1}^T,...,\mathbf{y}_{i_1-1}^T,\mathbf{y}_{i_1}^T]^T,$$

где $\overline{\mathbf{x}}^*=\mathbf{m}^*_{\mathbf{x}}$; $\overline{\mathbf{Y}}_{i_1}^{i\,*}=\mathbf{m}^*_{\mathbf{Y}_{i_1}^i}$; $\mathbf{P}^*_{\mathbf{Y}_{i_1}^i\mathbf{Y}_{i_1}^i}$, $\mathbf{P}^*_{\mathbf{x}\mathbf{Y}_{i_1}^i}$ представляют собой выборочные значения математических ожиданий и соответствующих матриц ковариаций.

На практике имеют место ситуации, когда навигационная система или система управления подвижными объектами работает в условиях изменения окружающей среды, и возникает априорная неопределенность. При этом перспективным для адаптации нейросетевых алгоритмов рассматривается возможность использования машинного обучения с подкреплением.

Результаты моделирования. Рассмотрены два примера. На первом примере иллюстрируется сопоставление нерекуррентного оптимального линейного алгоритма фильтрации и сверточной НС. Второй пример иллюстрирует возможности НС с рекуррентными слоями в сопоставлении с рекуррентными алгоритмами калмановского типа.

Заключение. Дан критический анализ современного состояния использования глубоких нейронных сетей со сверточными и рекуррентными слоями, рекуррентной сети долгой краткосрочной памяти, управляемых рекуррентных блоков для задач оценивания применительно к навигации и управлению движением.

Дано сопоставление нейросетевых методов с традиционными для понимания и объяснения их работы. Выявлены отличия, достоинства и недостатки глубоких нейронных сетей применительно к решению задач оценивания.

1. Дан анализ использования сверточной сети для решения линейной задачи нерекуррентного оценивания. Рассмотрен случай оценивания одной скалярной последовательности по другой. Когда размер ядра (фильтра) свертки совпадает с размерностью входного для НС вектора измерений, выражение для оценки с использованием единственного сверточного слоя НС совпадает с выражением для оценки, отыскиваемой с использованием оптимального линейного нерекуррентного байесовского алгоритма.

В случае когда размерность ядра свертки *c* меньше размерности входного для НС вектора измерений, используется не весь набор измерений, а набор только *c* последних измерений. Выражение для оценки с использованием единственного сверточного слоя НС совпадает с выражением для оценки, отыскиваемой с использованием оптимального линейного нерекуррентного байесовского алгоритма, использующего только *c* последних измерений.

Результат обобщается на многомерный случай.

2. Показано, что для гауссовского случая и линейных измерений в формуле для вычисления оптимальной оценки с помощью метода Монте-Карло интегралы в числителе и знаменателе представляют собой свертку.

Предлагается для нахождения оценки в случае нелинейных измерений использовать сверточные слои с нелинейностями.

3. Дан анализ возможности применения машинного обучения с подкреплением при решении задачи траекторного слежения. Рассмотрены возможности использования НС с рекуррентными слоями LSTM и GRU для слежения за маневрирующими объектами.

4. Обсуждаются перспективы использования нейронных сетей при обработке навигационных данных, в том числе для задач адаптивного оценивания и траекторного слежения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., Haffner, P.,** Gradient Based Learning Applied to Document Recognition, IEEE Intelligent Signal Processing, 1998, pp. 306–351.
2. **Hochreiter, S., Schmidhuber, J.** Long Short-Term Memory, Neural Computation, 9(8):1735-1780, 1997.
3. **Gal, Y. and Ghahramani, Z.,** A theoretically grounded application of dropout in recurrent neural networks, Proceedings of the 30th International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS'16), 2016, pp. 1027–1035.
4. **Amosov, O.S., Amosova, S.G., Ivanov, Y.S., Zhiganov, S.V.,** Using the deep neural networks for normal and abnormal situation recognition in the automatic access monitoring and control system of vehicles, Neural Computing & Applications, 2020. https://doi.org/10.1007/s00521-020-05170-5.
5. **Stepanov, O.A., Amosov, O.S.,** The Comparison of the Monte-Carlo Method and Neural Networks Algorithms in Nonlinear Estimation Problems, IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 2007, vol. 9, issue PART 1, pp. 392–397.
6. **Edwards, L., Veale, M.,** Slave to the Algorithm? Why a 'Right to an Explanation' Is Probably Not the Remedy You Are Looking For, 16 Duke Law & Technology Review 18 (2017), Available at SSRN. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2972855.
7. **Амосов О.С., Амосова Л.Н., Магола Д.С.** Оценивание случайных последовательностей с использованием регрессии и вейвлетов // Информатика и системы управления. 2009. №3(21). С. 101–109.
8. **Amosov, O.S., Baena, S.G.,** Decomposition Synthetic Approach for Optimum Nonlinear Estimation, 1st IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems, IFAC-PapersOnLine, Saint Petersburg, June 24-26, 2015, vol. 48, iss. 11, pp. 819–824.

O.S. Amosov, S.G. Amosova (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow)

OPTIMAL ESTIMATION USING DEEP NEURAL NETWORKS APPLIED TO NAVIGATION AND MOTION CONTROL

The critical analysis of the current state of using deep neural networks with convolutional and recurrent layers, a recurrent long-term short-term memory network, gated recurrent units for estimation tasks is given in relation to navigation and motion control. The comparison of neural network methods with traditional ones is given for understanding and explaining their work. The differences, advantages and disadvantages of deep neural networks in relation to the estimation problems solution are revealed. The analysis of the machine training possibility is given with reinforcement for estimation tasks in navigation and motion control in real time. The opportunities for using the neural networks in the processing of navigation data, including the problems of adaptive estimation and trajectory tracking, are formulated.

Я. О. АНИСИМОВ, Д. А. КАЦАЙ
(Южно-Уральский государственный университет, Челябинск)

ГЛУБОКОЕ ОБУЧЕНИЕ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ КАК ПАРАДИГМА АВТОНОМНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМ ОБЪЕКТОМ

В докладе описывается схема построения и принципы управляющего устройства для автономного автомобиля. В качестве алгоритма управления предлагается использование глубоких нейронных сетей. Вследствие невозможности предварительного формирования качественной обучающей выборки для задач рассматривается использование обучения с подкреплением. Описаны возможные варианты реализации среды моделирования.

Введение. В современном мире все более распространенным становится использование автономных подвижных объектов. Наиболее перспективным объектом является автомобиль. С точки зрения экономики исключение человека из процесса управления автомобилем позволит решить целый класс проблем: отмена предельного времени движения в рамках одной смены, уменьшение количества дорожно-транспортных происшествий, вызванных неумелыми действиями человека. Сложность решения задачи по построению беспилотного автомобиля заключается в невозможности одномоментного перехода к использованию только беспилотных транспортных средств. В этой связи возникает задача построения алгоритма, который учитывал бы реальную дорожную ситуацию. Предлагаемый доклад посвящен особенностям разработки таких алгоритмов.

Постановка задачи. Современный автомобиль, оснащенный модулем автономного управления, является достаточно сложным устройством. Если рассмотреть структуру блока управления, то он обычно состоит из нескольких компонентов [1].

1. Вычислительное устройство. Обычно представляет собой достаточно мощный компьютер с доступом в сеть. Основная задача компьютера – выработка управляющего сигнала на основе анализа информации со всех навигационных датчиков.
2. Системы спутниковой навигации. Эта подсистема обычно идет в связке с высокоточной цифровой картой дорог. Данная связка обеспечивает информацией о положении объекта на траектории движения.
3. Комплекс лидаров, которые выдают информацию о расстоянии транспортного средства относительно окружающих объектов.
4. Камера технического зрения. Основная задача камеры – получение информации об оперативной обстановке на дороге.
5. Исполнительное устройство. По своей конструкции это устройство может быть как отдельным электронным блоком, формирующим сигнал в бортовом компьютере автомобиля, так и механическим, имитирующим реальные действия человека.

Если рассмотреть только датчики, то их можно разбить на два класса: выдающие пригодную для анализа информацию (лидар и система спутниковой навигации) и **неформализованную** информацию (система технического зрения).

В последнее время для анализа видео и изображений наибольшую эффективность показали нейронные сети. Появились успешные архитектуры сетей, решающие различные задачи: распознавание образов на картинке, сопровождение объекта в видеопотоке, анализ видеопотока для поиска аномалий [2, 3]. Особенностью нейронных сетей является то, что они могут принимать различные комбинации данных – видеопоток совместно с информацией с лидаров и спутниковых систем и сразу вырабатывать управляющий сигнал [4].

Однако для решения подобного класса задач обычно требуется качественная обучающая выборка – массив образцов, содержащий в себе пары вход–выход. Такой подход слабо применим к задаче автономного управления транспортным средством, так как крайне проблематично создать значительный массив всех возможных ситуаций на дороге и корректный вариант решения. Особенно это усложняется наличием динамики в процессе движения автомобиля. В этой связи предлагается использование схемы обучение с подкреплением [4, 5].

Схема обучения. Основная идея в обучении с подкреплением заключается в том, что алгоритм управления, именуемый агентом, взаимодействует с окружающей средой и самостоятельно корректирует свое поведение. Рассмотрим более подробно, как этот процесс происходит при использовании глубоких нейронных сетей в качестве агента.

На этапе обучения нейронная сеть на каждой итерации формирует управляющее воздействие. После изменения положения автомобиля в пространстве на нейронную сеть поступает новая порция видеопотока и информации о том, было ли успешным предыдущее действие, именуемое наградой.

Рассмотрим более подробно, что из себя представляет награда. Это отрицательная дискретная величина, указывающая на ошибки агента: чем значение по модулю выше, тем опаснее ошибка совершается агентом. Само значение величины назначается экспертным путем: например, столкновение – 100, превышение скорости – 10 и так далее.

Целью обучения нейронной сети является максимизация награды по итогам достаточно большого количества итераций. При этом модификация весов нейронной сети происходит в конце каждой итерации.

Реализация среды. При описанной выше модели достаточно сложно собрать натурную модель для обучения сети. Поэтому часто используют специализированное программное обеспечение, которое может, с одной стороны, обеспечить необходимый уровень управления через удобные программные интерфейсы, а с другой – реализовать модель реального мира. Самым распространенным таким программным продуктом является библиотека OpenAI GYM[6]. Она является промышленным стандартом в мире программного обеспечения. В качестве среды используют открытые миры, которые созданы в компьютерных играх.

Заключение. Используя обучение с подкреплением, можно обучить нейронную сеть, которая будет управлять подвижным объектом, используя весь набор данных: видеопоток, лидары и координаты со спутниковой навигационной системы. Обученную сеть через открытые стандарты можно проверять на натурных моделях, не опасаясь возникновения ситуаций, которые не были предусмотрены на этапе проектирования. При этом затраты на формирование и разметку обучающей выборки будут минимальны.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Campbell, S. et al.,** Sensor Technology in Autonomous Vehicles: A review, 29th Irish Signals and Systems Conference (ISSC), Belfast, 2018, pp. 1–4.
2. **Krizhevsky, A., Sutskever, I., Hinton, G.E.,** Imagenet classification with deep convolutional neural networks, Advances in neural information processing systems, 2012, pp. 1097–1105.
3. **LeCun, Y., Kavukcuoglu, K., Farabet, C.,** Convolutional networks and applications in vision, Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS) (2010), IEEE, 253–256.
4. **Xia, W., Li, H., and Li, B.**, A Control Strategy of Autonomous Vehicles Based on Deep Reinforcement Learning, 9th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID), Hangzhou, 2016, pp. 198–201, doi: 10.1109/ISCID.2016.2054.
5. **Rao, Q. and Frtunikj, J.,** Deep Learning for Self-Driving Cars: Chances and Challenges, IEEE/ACM 1st International Workshop on Software Engineering for AI in Autonomous Systems (SEFAIAS), Gothenburg, 2018, pp. 35–38.
6. **Brockman, G. and others,** OpenAI Gym [Электронный ресурс], arXiv.org. 2016. Дата обновления: 5.06.2016. URL: https://arxiv.org/abs/1606.01540 (дата обращения: 29.08.2020).

Y.O. Anisimov, D.A. Katsai (South Ural State University, Chelyabinsk)

DEEP REINFORCEMENT LEARNING APPROACH FOR AUTONOMOUS VEHICLES

The paper describes the design and principles of the control device for an autonomous vehicle. The use of deep neural networks is proposed as a control algorithm. Due to the impossibility of preliminary formation of a high-quality training sample for problems, the use of reinforcement learning is considered. Possible options for implementing the modeling environment are described.

В. А. ГАЛКИН, А. В. МАКАРЕНКО
(Институт проблем управления РАН, Москва)

НЕЙРОСЕТЕВОЙ ПОДХОД К РАСПОЗНАВАНИЮ ВИДИМЫХ СОЗВЕЗДИЙ ПО ФОТОИЗОБРАЖЕНИЮ НЕБА

В работе демонстрируются эффективные возможности глубоких нейросетей при решении задачи идентификации созвездий по фотоснимку неба в условиях априорной неопределенности, неполной наблюдаемости и стохастических возмущений. Получено качество решения 0,927 по метрике F1. Для достижения результата синтезирована оригинальная ResNet-подобная архитектура сверточной нейросети, проведен статистический анализ датасета, разработана функция потерь и стратегия обучения нейросети, сформирован адекватный критерий наблюдаемости созвездия на изображении. Проведено исследование влияния шумов на качество и устойчивость решений.

Введение. Развитие науки и техники, в частности космонавтики, привело к необходимости автоматического решения задачи опознавания звездного неба, которая включает в себя ряд подзадач, в том числе идентификацию звезд и распознавание созвездий. При этом задача идентификации звезд является неотъемлемой частью более общего комплекса алгоритмов астрономической навигации, астрономической ориентации, калибровки астрономических систем наблюдения и т.п. Решением задачи идентификации звезд является сопоставление (разметка) звезд на наблюдаемом с помощью звездных датчиков [1] изображении и со звездами в каталоге. При этом задача распознавания созвездий является базовой относительно всех вышеперечисленных задач, ибо она формирует априорную информацию для рекурсивных алгоритмов идентификации звезд [2], используя наблюдаемые созвездия, граф созвездий и разметку принадлежности конкретных звезд созвездию.

В работе [3] было представлено решение задачи идентификации созвездий на основе сравнения шаблонов. Заявленная точность на проверочных изображениях – 71,4%, а среднее время распознавания – 85 секунд, что является неприменимым для практического применения.

Предлагаемая работа посвящена решению задачи идентификации созвездий на изображении звездного неба посредством глубокой сверточной нейронной сети.

Постановка задачи. Проблему распознавания созвездий по фотоснимку неба возможно трактовать как задачу структурной идентификации (обнаружение/восстановление подграфов) на графах. При этом вершинами графа Γ^{S} служат скопления звезд, именуемые созвездиями, в качестве ребер выступают отношения между созвездиями, имеющими общие границы на небесной сфере, а свойствами вершин и ребер – соответствующие астрономические свойства созвездий и их границ. Изображение звездного неба представляет собой наблюдаемую часть небесной сферы в горизонтальной системе координат, жестко связанной с Землей. Общее число созвездий равно 89 (созвездие Змеи разбито на два: «голова» и «хвост»), таким образом, число вершин в графе $K_{\mathrm{S}}^{\mathrm{V}} = 89$, а число ребер $K_{\mathrm{S}}^{\mathrm{E}} = 264$.

Данная задача по своей сути является обратной, при этом ситуация осложняется рядом обстоятельств: априорная неопределенность возникает за счет отсутствия информации о времени и координатах съемки и направления оптической оси; неполная наблюдаемость формируется при частичном экранировании/закрытии звезд, например, облаками; стохастические возмущения формируют «ложные» звезды из-за приборных шумов фоторегистрирующей аппаратуры.

Следует отметить, что в изложенной постановке задача, помимо теоретической, имеет высокую прикладную значимость для решения задач идентификации звезд и астрономической навигации.

Исходные данные и подготовка датасета. Для обучения нейронной сети итеративно по параметрам земного наблюдателя (местоположение наблюдателя, углы визирования и время по Гринвичу) был сформирован набор данных, включающий в себя 1284780 изображений звезд-

ного неба размером 240×240 пикселей, углом поля зрения 20×20 градусов и ответы к изображению, представляющие собой бинарный вектор длиной 89 координат, в котором ^{1}-созвездие наблюдаемо, а ^{o}-созвездие отсутствует. Для проверки обобщающей способности нейросетевой модели был сгенерирован проверочный набор данных, непересекающийся с обучающим. Количество экземпляров фотоизображений в проверочном наборе данных равно 48772. Датасет формировался на основе данных звездного каталога~Tycho-2.

Архитектура нейронной сети. Для решения задачи распознавания созвездий была спроектирована архитектура глубокой сверточной нейронной сети, которая представляет собой модификацию классической архитектуры ResNet [4]. Программная реализация нейронной сети осуществлена в фрейморке PyTorch версии 1.6.0. Глубина сети равна 26 обучаемым слоям. Размер входа сети $1 \times 240 \times 240$ – одноканальное изображение в оттенках серого, выходной размер результирующего вектора 89. Функцией активации на выходном слое служит сигмоидальная функция, характеризующая вероятность появления класса (наблюдения созвездия). Общее число настраиваемых параметров сети составляет 415193. Для оценки качества аппроксимации сети, использована F_1 метрика [5].

Обучение классификатора и тюнинг процесса обработки. Исходно для обучения нейронной сети применялась бинарная перекрестная энтропия [5], которая дополнительно взвешивалась, чтобы нейтрализовать несбалансированность классов. Для обучения применялся оптимизатор Adam в течении 15 эпох со стандартной скоростью обучения и размером мини-батча 256. Результаты тестирования полученного решения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Точность референсного решения на тестовом наборе данных

F_1, min	F_1, median	F_1, max
0,234	0,450	0,799

Из результатов, представленных в табл. 1, видно, что нейронная сеть фактически нефункциональна. Исходя из того факта, что глубокая нейронная сеть является универсальным аппроксиматором [6] и решение задачи возможно, был проведен разведывательный анализ данных и в соответствии с его результатами проведена корректировка стратегии обучения нейронной сети, адаптирована функция потерь и доработан критерий наблюдаемости созвездия на изображении.

При проведении анализа датасета, анализировалось наблюдаемое распределение (в рамках фотографии) следующих основных характеристик: количество граничащих созвездий, площадь созвездия, количество входящих в созвездие звезд.

Для обучения нейронной сети была разработана собственная функция потерь, основанная на взвешенной по относительным площадям созвездий бинарной перекрестной энтропии [5]. Базовая стратегия обучения была изменена: на первых 7-ми эпохах применялся оптимизатор Adam со стандартными параметрами, далее в течение 15-ти эпох использовался оптимизатор SGD с начальным темпом обучения 0,05, который впоследствии понижается в 2 раза каждые 3 эпохи. Причем начиная с 15-й эпохи дообучение на оптимизаторе SGD производилось со сменой функции потерь на бинарную перекрестную энтропию, взвешенную по логарифму произведения площади созвездия по числу звезд в нем. Для всех составляющих представленной стратегии обучения размер мини-батча равен 256 сэмплов.

Результаты обучения и теста после изложенных модификаций представлены в табл. 2, в которой эксперимент №1 произведен на «чистых данных», а эксперимент №2 – на зашумленных данных (обучение и тест). Следует отметить, что вносимые шумовые возмущения физически соответствуют воздействиям, которым в реальности подвержен звездный датчик, а именно:

- шум с нормальным законом распределения соответствует шуму квантования изображения;
- импульсный шум, распределенный по биномиальному закону, соответствует импульсным воздействиям, которые приводят к образованию «ложных» звезд;

- закрытие случайной части изображения эквивалентно возникновению препятствия для визирования части звезд, в действительности попадающих в поле зрения;
- случайное вращение изображения относительно центра можно расценивать как вращение камеры вокруг линии визирования;
- случайные зеркальные отображения – ошибки ориентации изображения в звездном датчике.

Таблица 2

Точность модифицированного решения на тестовом наборе данных

Эксперимент	F_1, min	F_1, median	F_1, max
1	0,940	0,981	0,996
2	0,810	0,927	0,971

Анализ результатов. Из представленных результатов следует, что искусственная нейронная сеть успешно аппроксимирует отображение между изображением звездного неба и пространством созвездий, а также обладает обобщающей способностью и справляется с решением задачи в условиях априорной неопределенности, неполной наблюдаемости и стохастических возмущений. Следует отметить, что в эксперименте №2 с зашумленными изображениями звездного неба на вход нейронной сети ни одного «чистого изображения» во время обучения не поступало. То есть нейронная сеть не наблюдала истинные подграфы графа Γ^S, однако сформировала их представления в своем латентном пространстве и успешно идентифицировала на новых изображениях.

Заключение. В представленной работе была продемонстрирована возможность эффективного применения глубоких нейронных сетей к решению задачи структурной идентификации на графах в условиях априорной неопределенности, неполной наблюдаемости и стохастических возмущений. В качестве тестовой рассмотрена проблема идентификации созвездий на фотоснимке ночного неба. Получено качество решения 0,927 по метрике F_1. Для достижения результата синтезирована оригинальная ResNet-подобная [4] архитектура нейронной сети (26 обучаемых слоев, 415193 настраиваемых параметров), проведен статистический анализ структурных характеристик датасета, разработана специальная стратегия обучения нейронной сети и сформирован адекватный критерий наблюдаемости созвездия на изображении. Кроме того, проведено исследование влияния шумов на качество и устойчивость решения и показано, что оно обладает явно выраженной адаптивностью.

В отличии от ряда других работ [2, 7] по идентификации звезд и созвездий, требующих исключительно и/или преимущественно эмпирического (ручного) синтеза информативных признаков, методы глубокого машинного обучения требуют существенно меньше усилий на разработку, и, главное, они позволяют весьма гибко перестраивать алгоритм при существенном изменении структуры входных данных, условий наблюдаемости объектов, наборов распознаваемых характеристик и т.п.

Дальнейшее исследование данного вопроса предполагает движение в двух направлениях. Во-первых, проведение исследования теоретических аспектов нейросетевого подхода к структурной идентификации на графах в условиях априорной неопределенности, неполной наблюдаемости и стохастических возмущений. Во-вторых, проведение анализа полученного решения по идентификации созвездий и его встраивание в решение задач астрономической навигации и ориентации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Liebe, C.C.,** Accuracy performance of star trackers – A tutorial, IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., Apr. 2002, vol. 38, no. 2, pp. 587–599.
2. Spratling, B.B., Mortari D., A survey on star identification algorithms, Algorithms, 2009, vol. 2, no. 1, pp. 93–107.
3. **Ji, Suyao, Wang, Jinzhi, and Liu, Xiaoge,** Constellation Detection, Final Project for Spring 2014-2015, 2015, Stanford press.
4. **He, K. et al.,** Deep residual learning for image recognition, Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2016, pp. 770–778.
5. **Goodfellow, I., Bengio, Y., and Courville, A.,** Deep learning, Book in preparation for MIT Press. [Online], 2016, Available: http://www.deeplearningbook.org.

6. **Cybenko, G.,** Approximation by superpositions of a sigmoidal function, Mathematics of control, signals and systems, 1989, vol. 2, no. 4, pp. 303–314.
7. **Rijlaarsdam, D. et al.,** A Survey of Lost-in-Space Star Identification Algorithms since 2009, Sensors, 2020, vol. 20, no. 9, p. 2579.

V.A. Galkin, A.V. Makarenko (Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow)

NEURAL NETWORK APPROACH TO RECOGNITION OF VISIBLE CONSTELLATIONS BY SKY PHOTO IMAGE

The following work demonstrates the effective capabilities of deep neural networks in solving the problem of identification of constellations from a photo of the sky in conditions of a priori uncertainty, incomplete observability and stochastic disturbances. The quality of solution 0,927 by metric F1 is obtained. In order to achieve the result the original ResNet-like architecture of the convolution neural network was synthesized; statistical analysis of the dataset was carried out, the function of losses and strategy of neural network training were developed, and an accurate criterion of constellation observability in the image was formed. The observation of noise influence on the quality and stability of solutions was carried out.

Р. Ю. ПОРЦЕВ, А. В. МАКАРЕНКО
(Институт проблем управления РАН, Москва)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ 3D-СВЕРТОЧНЫХ И LSTM-РЕКУРРЕНТНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ В ЗАДАЧЕ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕЙСТВИЙ НА ВИДЕО

В докладе проведен сравнительный анализ двух архитектурных нейросетевых подходов (на основе 3D-сверток и LSTM-ячеек) при распознавании действий на видео. Задача решалась на 10 классах поведения, выделенных из датасета UCF50. Были разработаны и предобучены оригинальные архитектуры нейросетей. Установлено, что сеть на основе 3D-сверток обладает лучшей обобщающей способностью и более устойчива при обучении.

Введение. Распознаванию действий (поведения) подвижных объектов на видео посвящена обширная литература: так, распознавание действий используется в задачах управления, связанных с медициной [1, 2], человеко-машинным взаимодействием [3, 4], наблюдением [5, 6] и т.д. Для решения различных проблем в этой области в настоящее время активно применяются глубокие нейронные сети [7]. При этом по своей сути проблематика распознавания действий (поведения) подвижных объектов на видео является весьма сложной и на настоящий момент времени не имеет однозначного эффективного решения.

Предлагаемый доклад посвящен сравнению двух архитектурных нейросетевых подходов (на основе 3D-сверток и LSTM-ячеек) при распознавании действий на видео.

Исходные данные и подготовка датасета. Для решения задачи мы выбрали набор данных UCF50 [8] для распознавания действий, состоящий из реалистичных видеороликов с YouTube. Датасет UCF50 включает в себя 50 классов, при этом в каждом классе видеоролики сгруппированы примерно по 25 групп, где каждая группа состоит не менее чем из 4-х клипов действий («поведенческих линий»). Видеоклипы в одной и той же группе могут иметь общие черты: например, один и тот же человек, похожий фон и т.д. Для проведения эксперимента из исходного набора данных мы выделили 10 классов: VolleyballSpiking (волейбол), Skiing (катание на лыжах), BaseballPitch (бейсбол), Punch (боксирование), Drumming (игра на ударных), Basketball (баскетбол), PlayingViolin (игра на скрипке), PlayingTabla (игра на барабане), PullUps (подтягивания), RockClimbingIndoor (скалолазание в помещении).

С учетом изложенных особенностей разделение видеороликов на обучающую и тестовую части выполнялось следующим образом: в тестовый набор датасета были помещены все клипы из групп g03, g07 и g12, в обучающий были помещены все остальные видеоролики.

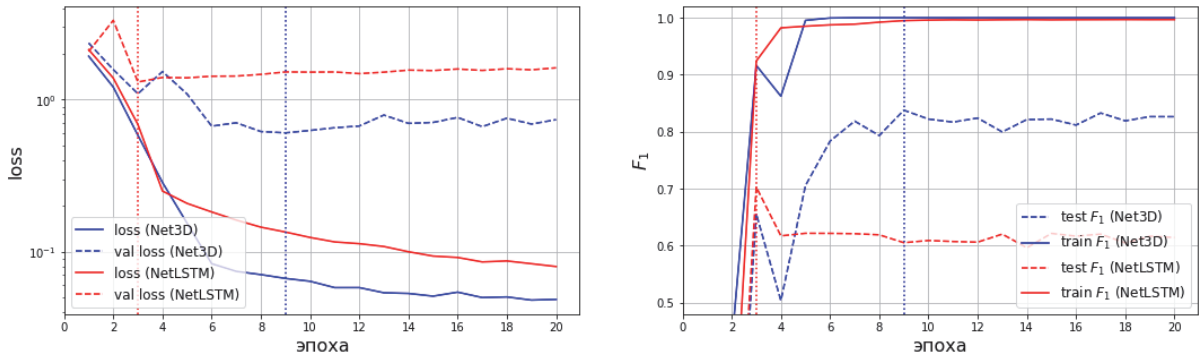
Далее в каждом классе из 10-ти выделенных случайным образом выбирались видеоролики. Затем из каждого видеоролика формировались семплы с шагом в 2 кадра. Семпл представляет собой серию из 8-ми цветных видеокадров с разрешением 320×240 пикселей (палитра RGB, глубина цвета 3×8), взятых с шагом 8 кадров (продолжительность выделенного фрагмента – примерно 2,5 секунды). Для обучающего набора были получены по 1500 семплов каждого класса, а для тестового – по 150 семплов каждого класса. Итоговый набор данных включает 15000 семплов для обучения и 1500 семплов для тестирования.

Архитектуры и обучение нейронных сетей. Для эксперимента были синтезированы 2 нейросети: Net3D – на основе 3D-сверток [9]; NetLSTM – с использованием 2D-сверток (8-головый вход) и LSTM-слоя [9]. Количество обучаемых параметров нейросети Net3D составило 4 074 618, а NetLSTM – 4 860 170.

При обучении нейронных сетей применялась функция потерь (loss) на основе категорийной кросс-энтропии [9]. Обе сети обучались по 20 эпох оптимизатором SGD с размером батча 240 сэмплов, но с разными начальными значениями параметра темпа обучения (lr): lr = 0,02 и lr = 0,06 для Net3D и NetLSTM соответственно. Для борьбы с переобучением применялись такие методы регуляризации [9], как пакетная нормировка (batch normalization) и прореживание (dropout).

Обучение нейросетей выполнялось на графическом ускорителе nVidia Titan RTX с помощью библиотеки глубокого обучения Pytorch (1.5.0).

Анализ результатов. На рис. 1 представлены графики обучения нейросетей, на которых вертикальными пунктирными линиями обозначены лучшие эпохи (синий цвет соответствует Net3D, красный – NetLSTM). Максимальное значение F_1 = 0,8377 на тестовом наборе для Net3D достигается на 9 эпохе (loss = 0,0666, val loss = 0,6054), а для NetLSTM F_1 = 0,7028 – на 3 эпохе (loss = 0,6870, val loss = 1,3079).



а) *б*)

Рис.1. Графики обучения сетей Net3D и NetLSTM, зависимость от номера эпохи:
(*а*) – функция потерь, (*б*) – метрика F_1

Как видно из рис. 1, во время обучения нейросеть Net3D ведет себя существенно более устойчиво, нежели NetLSTM.

Для сравнения качества обученных нейросетей на рис. 2 представлены соответствующие матрицы ошибок, рассчитанные по тестовому датасету.

№	Класс	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	VolleyballSpiking	148	0	0	0	0	0	0	0	0	2
2	Skiing	0	140	0	10	0	0	0	0	0	0
3	BaseballPitch	0	0	138	0	0	12	0	0	0	0
4	Punch	0	0	0	150	0	0	0	0	0	0
5	Drumming	0	0	0	0	144	0	0	0	6	0
6	Basketball	41	0	0	0	0	100	0	0	0	9
7	PlayingViolin	0	0	0	0	32	0	110	7	1	0
8	PlayingTabla	0	0	1	0	0	0	0	149	0	0
9	PullUps	0	0	0	0	0	0	0	0	82	68
10	RockClimbingIndoor	14	0	0	11	6	1	2	6	0	110

а

№	Класс	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	VolleyballSpiking	107	0	0	0	0	5	0	0	15	23
2	Skiing	0	130	0	0	0	0	0	0	20	0
3	BaseballPitch	0	0	134	0	0	0	0	0	16	0
4	Punch	0	0	0	139	11	0	0	0	0	0
5	Drumming	0	0	0	7	67	0	0	0	76	0
6	Basketball	40	0	0	0	0	90	0	20	0	0
7	PlayingViolin	0	0	0	0	0	0	65	25	40	20
8	PlayingTabla	0	0	1	0	0	0	3	97	50	0
9	PullUps	0	0	0	0	0	0	0	0	150	0
10	RockClimbingIndoor	0	0	0	0	0	0	53	7	0	90

б

Рис. 2. Матрицы ошибок для обученных сетей Net3D (*а*) и NetLSTM (*б*)

Как видно из данных рис. 2, между структурами ошибок обеих сетей есть существенные различия, хотя обе сети одинаково плохо распознали классы Basketball, PlayingViolin и RockClimbingIndoor. Мы будем проводить дополнительные исследования для выяснения причин данного факта.

Далее проанализируем гистограммы (см. рис. 3), в которых сравниваются значения функции потерь (loss) и метрики F_1 обученных сетей при перемешивании кадров в семплах. Отметим, что для построения гистограмм было проведено 30 экспериментов со случайным перемешиванием кадров в семплах как в тестовом, так и в тренировочном наборах данных.

Из рис. 3 хорошо видно, что величина loss существенно «просела» и в тестовом, и в тренировочном наборах в обеих нейросетях после подачи перемешанных последовательностей кадров, что указывает на снижение устойчивости принятия решения нейросетью.

А вот с F_1 картина несколько иная: в обеих нейросетях F_1 просел, но в количественном плане весьма незначительно (на это указывают медианные значения против значений без перемешивания). При этом в тренировочном наборе разница более существенна (возможно, в силу проявления эффекта заучивания обучающих данных), нежели в тестовом наборе. Таким обра-

зом, из результатов анализа следует, что обе сети практически не реагируют на смену последовательности видеокадров.

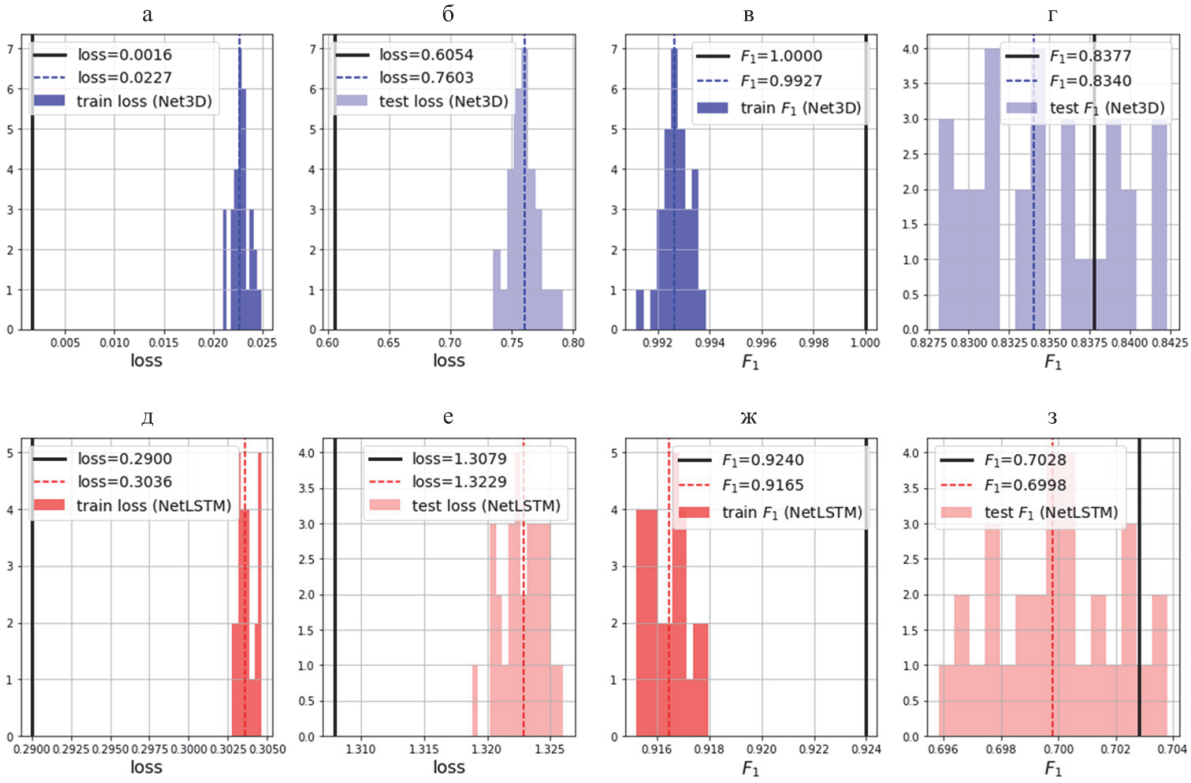


Рис. 3. Гистограммы значений функции потерь (loss) и метрики F_1 предобученных сетей Net3D и NetLSTM при случайном перемешивании кадров в семплах (вертикальным пунктирным линиям соответствуют медианные значения, вертикальным черным линиям соответствуют значения при правильной последовательности кадров)

Заключение. В результате проведенного эксперимента по распознаванию действий на видео при помощи двух глубоких нейронных сетей с различной архитектурой Net3D и NetLSTM установлено, что нейросеть Net3D дает лучшее качество по сравнению с NetLSTM, при этом количество обучаемых параметров у Net3D несколько меньше, чем у NetLSTM. Кроме того, процесс обучения нейросети с 3D-свертками более устойчив (и более робастен к изменению гиперпараметров оптимизатора) по сравнению с обучением нейросети с LSTM-слоем.

Из эксперимента со случайным перемешиванием кадров в семплах обнаружено, что обученные нейросети практически не реагируют на саму последовательность кадров (точнее, на ее смену). Из этого следует, что в рамках проведенного эксперимента для определения класса действия на видео нейросети не важен временной контекст (т.е. порядок следования кадров на видео). Это может объясняться двумя причинами: (i) низкой динамической энтропией самих видеороликов (особенность датасета UCF50); (ii) глубокая нейросеть способна восстанавливать в своем латентном пространстве правильный временной порядок следования кадров на видео. Таким образом, этот момент требует проведения дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Avci, A., Bosch, S., Marin-Perianu, M., Marin-Perianu, R., Havinga, P.,** Activity recognition using inertial sensing for healthcare, wellbeing and sports applications: A survey, Proceedings of the 23th International Conference on Architecture of Computing Systems 2010, Hannover, Germany, 22–23 February 2010, pp. 1–10.
2. **Mulroy, S., Gronley, J., Weiss, W., Newsam, C., Perry, J.,** Use of cluster analysis for gait pattern classification of patients in the early and late recovery phases following stroke, Gait Posture, 2003, 18, 114–125.
3. **Rautaray, S.S., Agrawal, A.,** Vision based hand gesture recognition for human computer interaction: A survey, Artif. Intell. Rev., 2015, 43, 1–54.
4. **Mitra, S., Acharya, T.,** Gesture recognition: A survey, IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part Appl. Rev., 2007, 37, 311–324.
5. **Vishwakarma, S., Agrawal, A.,** A survey on activity recognition and behavior understanding in video surveillance, Vis. Comput., 2013, 29, 983–1009.

6. **Lin, W., Sun, M.T., Poovandran, R., Zhang, Z.,** Human activity recognition for video surveillance, Proceedings of the 2008 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Seattle, WA, USA, 18–21 May 2008, pp. 2737–2740.
7. **Rodríguez-Moreno, I., Martinez-Otzeta, J. M., Sierra, B., Rodriguez, I., and Jauregi, E.,** Video activity recognition: State-of-the-art, Sensors, Jan. 2019, vol. 19, p. 3160.
8. **Reddy, K. K., & Shah, M.,** Recognizing 50 human action categories of web videos, Machine vision and applications, 2013, 24(5), 971–981.
9. **Goodfellow, I., Bengio, Y.,** Courville, A., Deep Learning, Cambridge: MIT press, 2016.

R.J. Portsev, A.V. Makarenko (Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow)

COMPARATIVE ANALYSIS OF 3D CONVOLUTIONAL AND LSTM NEURAL NETWORKS IN THE ACTION RECOGNITION TASK BY VIDEO DATA

In the present paper a comparative analysis of two architectural neural network approaches (based on 3D convolutional and LSTM) in the recognition of actions on video is made. The problem was being solved on 10 behavior classes separated from the UCF50 dataset. The original neural network architectures were developed and pre-trained. It was found that the network based on 3D convolutions has better generalization ability and is more stable in the training.

О. Ю. ЛУКОМСКАЯ
(Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург;
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург)

Я. А. СЕЛИВЕРСТОВ
(Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, Санкт-Петербург)

О ПРИМЕНЕНИИ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ В КОГНИТИВНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМАХ

В работе функции когнитивности приведены в соответствие с аспектами функционирования когнитивных транспортных систем и технологий. Разработана методика системы распознавания проселочных дорог на основе сверточной нейронной сети, что позволит проводить автоматическую сегментацию сельских дорог по спутниковым снимкам и построение схемы сети дорог, для анализа пространственного развития транспортных сетей, для управления беспилотным транспортом. Разработка нейронной сети на базе U-net осуществлялась на языке Python 3x. Обучающая выборка состоит из 880 изображений, подготовленных ручной разметкой.

Введение. Проблема управления транспортными системами на современном этапе развития человеческой деятельности предполагает внедрение новых и достаточно наукоемких технологий, таких, например, как когнитивные транспортные технологии. К таким относятся системы распознавания спутниковых снимков, автоматическая сегментация и построение схемы сети дорог для нужд современной картографии [1], исследования пространственного развития и организации транспортных сетей городов и агломераций. Также подобные технологии могут использоваться для совершенствования сервисов интеллектуальных транспортных систем в части управления и маршрутизации беспилотным транспортом [2, 3].

Сопоставим функции человеческого разума и функциональные возможности транспортных систем и технологий, заложенные на стадии проектирования когнитивных транспортных систем и технологий (КТСТ) и сформированные на основе решаемых задач (таблица).

Таблица

Функции когнитивности в транспортных системах и технологиях

№ п/п	Функции человеческого разума (когнитивности)	Функции когнитивности в транспортных технологиях
1.	восприятие	получение информации (данных) от датчиков и сенсоров
2.	внимание	анализ входной информации (организация данных от сенсоров)
3.	запоминание	кодирование и структурирование информации (семантическая обработка организованных данных)
4.	сохранение	структурирование и запись данных
5.	отзыв	отклик (реакция) системы на входное воздействие (в форме диалога, звуковых и видео-оповещений)
6.	принятие решений	выработка принятия решения (формирование знаний, необходимых для принятия решений)
7.	рассуждение	контекстная обработка информации по запросу
8.	решение проблем	формирование и выдача вектора управляющих воздействий, направленных на реализацию изменений состояния исполнительных механизмов и устройств
9.	формирование изображений	передача и обработка видеосигналов и изображений для информационного обмена
10.	планирование	планирование (формирование расписаний, построение согласованного режима работы системы)
11.	выполнение действий	управление действиями исполнительных устройств, осуществляющих перевод физической среды в требуемое состояние на основании вектора управляющих воздействий

Перечислим основные математические аппараты и их свойства, применяемые при проектировании и моделировании систем управления в КТСТ [4]:

1) искусственные нейронные сети (ИНС). Основное используемое в управлении свойство ИНС – обучение, кроме этого, идут сигналы прямого распространения, универсальные аппроксимационные свойства, адаптивные свойства структур управления с ИНС и способность к параллельной обработке аналоговых и дискретных сигналов для многомерных объектов [5, 6];
2) искусственный интеллект, генерирующий новые правила и отношения, реализующие процесс принятия решения;
3) самоорганизация, использующая принцип развития организации системы под действием внутренних причин и механизмов адаптации к условиям окружающей среды.

В докладе представлена технология построения системы распознавания спутниковых снимков, выполненная с использованием аппарата сверточных нейронных сетей.

Анализ предметной области. В работе [7] предложена методика для автоматической сегментации спутниковых снимков по нескольким классам объектов (здания, реки, дороги и т.д.). В работе [8] система сегментации дорог различных классов разработана на базе каскадной сети и модуля вектора захвата направления линейной структуры дороги. В работе [9] представлен адаптивный пороговый алгоритм, в основе которого – гистограммы обнаружения и отслеживания дорог на аэрофотоснимках с беспилотных летательных аппаратов, реализовано обнаружение сегмента линии на основе вероятностного преобразования (с грубым допуском) в сочетании с методом кластеризации. В работе [10] представлен иерархический метод извлечения контуров городских дорог, включающий этапы: интересующая область дороги выделяется из изображения высокого разрешения VHR, далее – иерархическое представление области дороги в двоичном дереве разделов (BPT) и затем извлечение контуров дорог на основе метода BPT на иерархических уровнях.

Основная часть. Для решения задачи сегментации сельских дорог на спутниковых снимках на первом этапе была разработана функциональная схема (рис. 1).

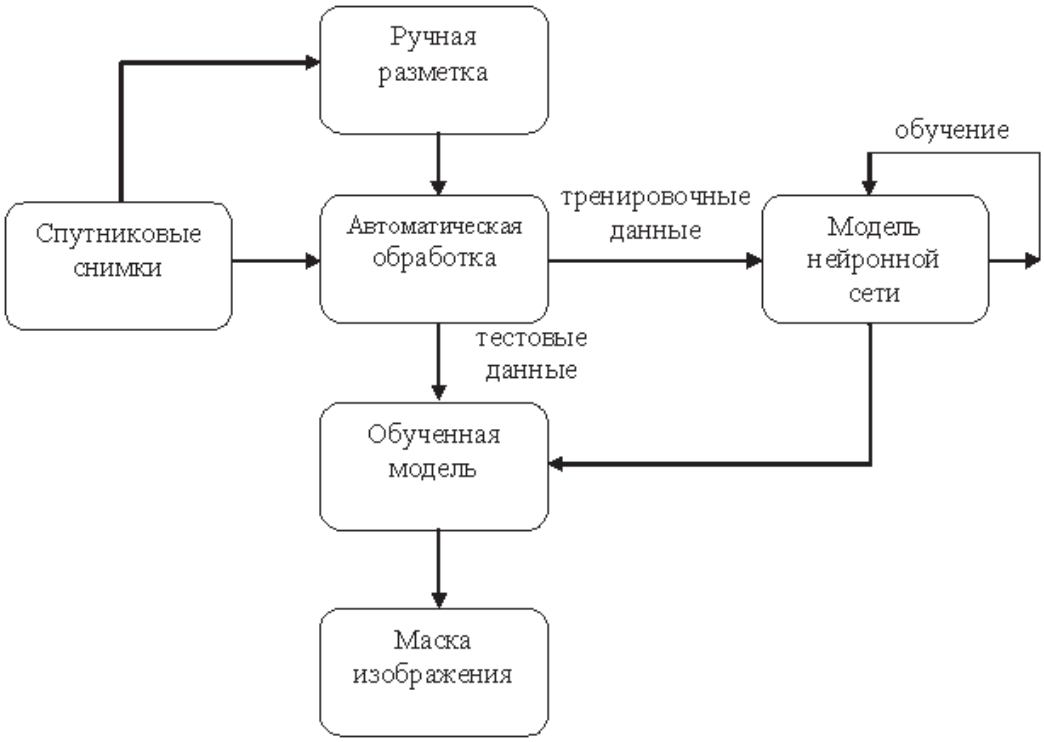


Рис. 1. Функциональная схема системы распознавания проселочных дорог

На втором этапе проводилось формирование обучающей выборки, состоящей из тренировочной выборки (Training Set), тестовой (Test Set) и проверочной (Validation Set). Для этого был

подобран набор спутниковых снимков размером 3600×3600 и осуществлена ручная разметка дорог на снимках. В итоге были получены три вида изображений: исходные изображения, маска изображений и изображения с наложением. Общий объем обучающей выборки составил 880 изображений.

Далее осуществлялась разработка сверточной нейронной сети. Нейронная сеть создавалась на языке Python 3x с использованием библиотеки TensorFlow, TensorBoard, Pandas, Numpy, Scipy, Matplotlib, Sklearn. В качестве модели нейронной сети была выбрана сеть U-net [11]. Нейронная сеть состояла из 10 слоев. Для обучения нейросети на вход подавалась обучающая выборка, 75% которой шло на обучение, а 15% – на тестирование. Количество эпох для обучения составило 60. Результаты обучения представлены на рис. 2. В качестве функции потерь была использована бинарная перекрестная энтропия (на этапе завершения обучения 0.1182). Среднее значение пересечения по объединению за шаг (per-step mean Intersection-Over-Union (mIOU)) составило 0.6312.

Значение функции стоимости для данных перекрестной проверки – val_loss = 0.1321, величина качества распознавания – val_mean_iou = 0.6315. Выходные данные на завершающем этапе обучения нейронной сети (58-60 эпохи) представлены на рис. 2.

```
Epoch 00058: val_loss did not improve from 0.13018
Epoch 59/60
770/770 [==============================] - 38s 50ms/step - loss: 0.1179 - mean_iou: 0.6308 - val_loss: 0.1328 - val_mean_iou: 0.6310

Epoch 00059: val_loss did not improve from 0.13018
Epoch 60/60
770/770 [==============================] - 38s 50ms/step - loss: 0.1182 - mean_iou: 0.6312 - val_loss: 0.1321 - val_mean_iou: 0.6315

Epoch 00060: val_loss did not improve from 0.13018
```

Рис. 2. Выходные характеристики нейронной сети

Сравнения исходного спутникового изображения, изображения из обучающей выборки и полученного в результате работы нейронной сети изображения с сегментацией дорог представлены на рис. 3, 4 и 5 соответственно.

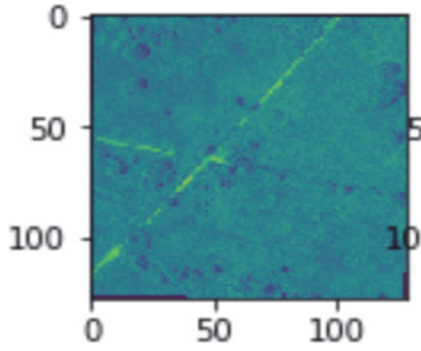


Рис. 3. Исходное спутниковое изображение дороги

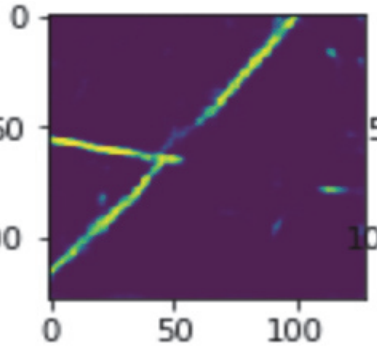


Рис. 4. Изображение из обучающей выборки

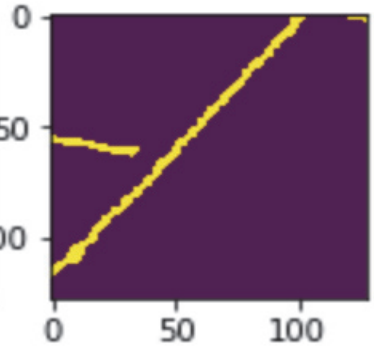


Рис. 5. Изображение, полученное после обработки нейросетью

Заключение. Разработанная система распознавания проселочных дорог на основе нейронной сети показала свою высокую эффективность при решении задачи автоматической сегментации данных изображений на спутниковых изображениях. Полученная разметка местности сопоставима по качеству с ручной разметкой.

Внедрение данной системы в качестве одного из компонентов когнитивной транспортной системы [12, 13] позволит осуществлять автоматическую оценку проторенности местности с целью развития и организации новых транспортных сетей, а также использовать в качестве маркерной опорной маршрутной сети для беспилотного воздушного мониторинга сельских поселений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dieu Tien Bui, Quang-Thanh Bui,Quoc-Phi Nguyen,Biswajeet Pradhan, Haleh Nampak, Phan Trong Trinh, Dieu Tien Bui,Quang-Thanh Bui,Quoc-Phi Nguyen,Biswajeet Pradhan, Haleh Nampak, Phan TrongTrinh,** A hybrid artificial intelligence approach using GIS-based neural-fuzzy inference system and particle swarm optimization for forest fire susceptibility modeling at a tropical area, Agricultural and Forest Meteorology, 2017, vol. 233, pp. 32–44. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.11.002.
2. **Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А., Васьков В.Т., Нарышкин Р.С.** Использование сверточных нейронных сетей для сегментации сельских дорог на спутниковых снимках // Технологии построения когнитивных транспортных систем. Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук. 2019. С. 258–263.
3. **Yucong Lin, Srikanth Saripalli,** Road Detection and Tracking from Aerial Desert Imagery, Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2012, vol. 65, issue 1–4, pp. 345–359.
4. **Лукомская О.Ю.** Когнитивные нейросетевые технологии в задачах управления транспортной системой // Технологии построения когнитивных транспортных систем. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук. 2018. С. 141–147.
5. **Современная прикладная теория** управления: Новые классы регуляторов технических систем / под ред. А.А. Колесникова. Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000. Ч.III. 656 с.
6. **Тюкин И.Ю., Терехов В.А.** Адаптация в нелинейных динамических системах. (Синергетика: от прошлого к будущему). М.: Издательство ЛКИ, 2008. 384 с.
7. **Соловьев Р.А., Тельпухов Д.В., Кустов А.Г.** Автоматическая сегментация спутниковых снимков на базе модифицированной свёрточной нейронной сети UNET // Инженерный вестник Дона. 2017. №4. С. 1–36. http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4433.
8. **Guangliang Cheng, Chongruo Wu, Qingqing Huang, Yu Meng, Jianping Shi, Jiansheng Chen, Dongmei Yan,** Recognizing Road From Satellite Images by Structured Neural Net-work, Neurocomputing (2019), In Press, Corrected Proof. doi: https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.05.007.
9. **Yucong Lin·Srikanth Saripalli,** Road Detection and Tracking from Aerial Desert Imagery, J Intell Robot Syst (2012) 65: pp. 345–359. doi: https://doi.org/10.1007/s10846-011-9600-6.
10. **Li, M., Stein, A., Bijker, W., Zhan, Q.,** Region-based urban road extraction from VHR satellite images using binary partition tree, Int J Appl Earth Obs Geoinform, 2016, vol. 44, pp. 217–225. https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.09.005.
11. **Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, and Thomas Brox,** U-Net: Convolutional Networks for BiomedicalImage Segmentation, International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI 2015: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015, pp. 234–241.
12. **Асаул А.Н., Малыгин И.Г., Комашинский В.И., Аванесов М.Ю.** Концептуальные подходы к построению интеллектуальной мультимодальной транспортной системы РФ // Информация и космос. 2016. № 3. С. 8–17.
13. **Селиверстов Я.А., Селиверстов С.А., Лукомская О.Ю.** Разработка структурной схемы системы городского транспортно-логистического мониторинга // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2016. Т. 10. №12. С. 55–64.

O.Yu. Lukomskaya (Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, St.Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI», St.Petersburg), Y.A. Seliverstov (Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences, St.Petersburg)

ON THE APPLICATION OF NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES FOR CONTROL PROBLEMS IN COGNITIVE TRANSPORTATION SYSTEMS

In the work, the functions of cognition are brought in line with the aspects of the functioning of cognitive transport systems and technologies. A methodology has been developed for a country road recognition system based on a convolutional neural network, which will allow automatic segmentation of rural roads using satellite images and building a road network diagram, for analyzing the spatial development of transport networks, for controlling unmanned vehicles. The development of a neural network based on U-net was carried out in Python 3x. The training set consists of 880 images prepared by hand markup.

А. В. БРАГИН, А. А. ГОЛОВАН, И. А. ПАПУША,
(Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова)

А. А. АВИЕВ
(ООО «НПК «ЭЛЕКТРООПТИКА», Москва)

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ МОМЕНТОВ НАЧАЛА И ОКОНЧАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ОБЪЕКТА ПО ИНФОРМАЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Рассматривается задача определения состояния объекта по информации БИНС. Приведенные алгоритмы, проверенные на экспериментальных данных, позволяют детектировать моменты начала движения и остановки. Детектор может быть использован в навигационном комплексе для разрешения коррекции БИНС по нулевой скорости.

Описаны два подхода: первый состоит в использовании первичной информации БИНС – показаний инерциальных датчиков, второй предполагает использование вторичной информации – параметров автономного навигационного решения.

Приводятся результаты тестирования на экспериментальных данных.

Введение. При наличии на борту подвижного объекта бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС), определяющей в каждый момент времени навигационные параметры объекта, отдельной задачей является выявление моментов начала движения и остановки. Как правило, признак движения используется в алгоритмах довыставки БИНС для разрешения коррекции по нулевой скорости, или Zero velocity UPdaTe (ZUPT) [1]. Для этого важно надежно определить моменты времени, когда у объекта нет линейных перемещений. В [2] рассмотрены различные варианты построения датчика нулевой скорости для целей пешеходной навигации, однако в рассматриваемых условиях применение описанных алгоритмов оказалось непродуктивным.

Разработанный детектор движения позволяет работать как с показаниями инерциальных датчиков, так и с выходными параметрами навигационного решения, прежде всего со значениями северной и восточной компонент скорости, а также угла курса.

Постановка задачи. Имеется объект с установленной на нем БИНС. После включения навигационной системы объект неподвижен относительно Земли в пределах нескольких минут. Предполагается, что доминантным направлением движения объекта является направление вдоль его продольной оси. Требуется при помощи измерений инерциальных датчиков либо при помощи выходной информации автономно функционирующей БИНС определить границы интервала неподвижности объекта. Выходом алгоритма детектора движения служит бинарный признак, или флаг, «движение–неподвижность». В задаче допускается задержка в определении моментов старта и остановки в пределах единиц секунд (такие параметры обычно уточняются в рамках технического задания на систему).

Использование первичной информации. Детектор движения по первичной информации привлекателен тем, что может начать работу сразу с момента появления корректных измерений инерциальных датчиков без ожидания окончания начальной выставки БИНС. При определении момента старта контролируются два параметра. Первый – отклонение сглаженных показаний продольного акселерометра относительно его среднего значения, вычисленного по интервалу неподвижности. Второй – отклонение квадрата модуля горизонтальной составляющей удельной силы относительно среднего значения, также вычисленного по интервалу неподвижности. При одновременном превышении обоими параметрами пороговых значений флаг детектора принимает значение «движение».

Для определения момента остановки также контролируются два параметра. Первый – отклонение квадрата модуля абсолютной угловой скорости, определенного по осредненным показаниям ДУС от квадрата модуля угловой скорости Земли. Второй – отклонение квадрата модуля горизонтальной составляющей удельной силы относительно среднего значения, вычисленного на секундном интервале. При одновременном непревышении пороговых значений указанными параметрами флаг принимает значение «остановка».

Пороговые значения выбираются экспериментально. Их выбор должен обеспечивать нечувствительность детектора к внешним воздействиям, не связанных с началом движения. К таким возмущениям относятся: ветровые колебания, возмущения от запуска двигателя и перемещения персонала по объекту. Одновременное превышение или непревышение порогов требуется для обеспечения надежности – отсутствия ложных срабатываний детектора. Это несколько уменьшает быстродействие, но не выходит за требуемые временные рамки.

Использование вторичной информации. Детектор движения по вторичной информации БИНС может использоваться либо альтернативно, либо совместно с первым вариантом, что повысит надежность алгоритма. Поскольку доминантным направлением движения принято направление вдоль продольной оси, основной информацией для выработки критерия может служить продольная скорость. Ее значение определяется по восточной и северной компонентам относительной скорости, а также углу истинного или скоростного курса. Однако из-за накопления ошибок инерциального счисления использование собственно величины продольной скорости для выработки признака движения нецелесообразно. Поэтому были выбраны две другие характеристики. Первая – продольное ускорение, полученное в результате оконного дифференцирования продольной скорости. Начало движения объекта всегда сопровождается резким увеличением его амплитуды. Вторая характеристика – среднеквадратическое отклонение скорости, которое также вычисляется в окне. Эксперименты показали, что амплитуда СКО скорости при неподвижности объекта ниже, чем при движении. Физической интерпретацией может служить уровень вибрации, который при движении будет отличаться от уровня вибрации на стоянке. Флаг детектора принимает значение «движение», если оба сигнала превышают свои пороговые значения. При одновременном непревышении пороговых значений флаг принимает значение «остановка». Пороговые значения для определения моментов начала движения и остановки могут отличаться. Принцип выбора порогов тот же, что для детектора, работающего с первичной информацией.

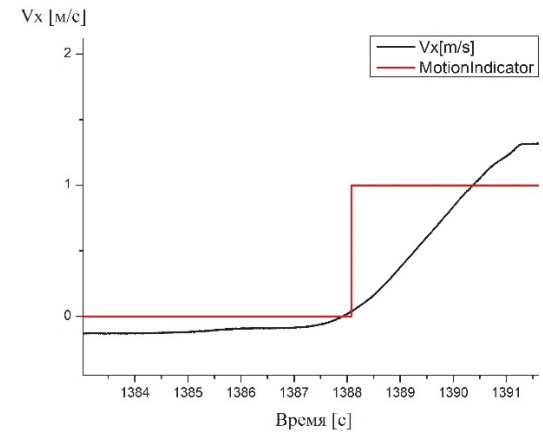


Рис. 1. Продольная скорость и флаг детектора в начале движения объекта (фрагмент)

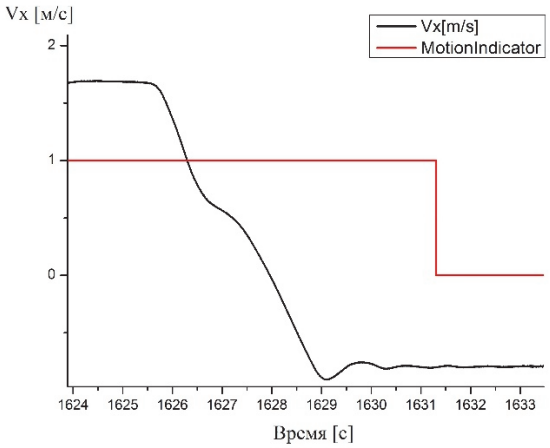


Рис. 2. Продольна скорость и флаг детектора при остановке объекта (фрагмент)

Результаты экспериментов. Работа детектора проверена на выборке из нескольких телеметрических записей параметров БИНС, установленной на подвижном объекте. Тестирование показало надежное определение моментов старта и остановки объекта. Результат проверки детектора движения на экспериментальных данных представлен на рис. 1 и 2. Приведены значения флага (1 – движение, 0 – остановка) на фоне графического отображения продольной компоненты относительной скорости объекта, являющейся результатом навигационного решения БИНС. Задержка срабатывания признака начала движения составляет не более 1 сек, признака остановки – не более 5 сек.

Заключение. Разработаны алгоритмы, позволяющие с достаточной надежностью определять моменты начала и окончания движения объекта по информации БИНС. Работа алгоритмов проверена на экспериментальных данных.

Исследование поддержано грантом РФФИ 19-01-00179.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вавилова Н.Б., Голован А.А., Парусников Н.А.** Математические основы навигационных систем. Математические модели инерциальной навигации. М.: Издательство Московского университета, 2020, 162 с.
2. **Skog, I. et al.,** Zero-velocity detection – An algorithm evaluation, IEEE Trans. Bio-Med. Eng., Nov. 2010, vol. 57, no. 11, pp. 2657–2666.

A.V. Bragin, A.A. Golovan, I.A. Papusha (MSU named after M.V.Lomonosov, Moscow), A.A. Aviev (Electrooptika Corp., Moscow)

MOTION DETECTOR FOR A VEHICLE BASED ON THE DATA PROVIDED BY STRAPDOWN INERTIAL NAVIGATION SYSTEM

In the article we consider a problem of a motion detector elaboration for a vehicle based on data provided by onboard strapdown inertial navigation system. Motion detector is an algorithm which determines condition of an object with inertial navigation system (INS) using it’s data. Condition of an object is a flag with two values – motion and stand. Motion detector can be implemented for reasonable INS aiding via ZUPT. In the article we describe two variants of the detector used. First variant utilizes raw inertial sensors measurements, second – parameters of inertial dead reckoning. The results of experiments, showing detector capabilities, are also presented.

А. Б. ШАПОВАЛОВ, В. В. КОСТЮКОВ, В. Л. СОЛУНИН, В. В. ЩЕРБИНИН, А. И. НОВИКОВ
(АО «ЦНИИ автоматики и гидравлики»)

ОСОБЕННОСТИ РЕДУКЦИИ ВЕКТОРА ОЦЕНИВАЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ В ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НАЗЕМНОГО БАЗИРОВАНИЯ

Излагаются особенности синтеза инерциально-спутниковых навигационных систем (ИСНС) для многорежимной бортовой системы управления беспилотных летательных аппаратов наземного базирования. Парадигмой синтеза является применение процедур оптимизации построения ИСНС при комплексном привлечении результатов заводской, автономной предстартовой и полетной калибровок инерциального измерительного блока (ИИБ).

Рассмотрены слабосвязанные (инвариантная и неинвариантная) схемы интеграции. Исследуется трансформация алгоритмов обработки совокупной навигационной информации и варианты редукции вектора оцениваемых параметров в зависимости от учета результатов предстартовой и полетной выставки и калибровок ИИБ и наличия характерных участков траектории.

Введение. Комплекс беспилотных летательных аппаратов наземного базирования состоит из высокодинамичных беспилотных летательных аппаратов (ЛА), устойчивый и управляемый полет которых обеспечивает бортовая система управления (БСУ), и наземной пусковой установки, состоящей из мобильного наземного агрегата, систем и приборных модулей, обеспечивающих доставку на стартовую позицию, информационную поддержку пуска и пуск ЛА [1].

БСУ включает бесплатформенный инерциальный измерительный блок (ИИБ) на лазерных гироскопах, бортовой специализированный вычислитель, прибор бортовой электроники, рулевой привод и дополнительные навигационные модули, одним из которых является бортовая навигационная аппаратура потребителя (БНАП) спутниковых радионавигационных систем как необходимое условие проведения режимов инерциально-спутникового управления [1, 2, 3].

Номенклатура режимов управления определяется типом траектории движения, массой, временем предстартовой готовности и полетным заданием ЛА. Каждой группе режимов управления соответствует своя комбинация используемых навигационных модулей. Во всех режимах, за исключением режимов автономного инерциального управления, число используемых бортовых навигационных модулей $N \geq 2$.

Требования к точности ИИБ и наземному предстартовому топогеодезическому обеспечению формируют режим автономного инерциального управления. Функции определения координат стартовой позиции переданы системе топопривязки и навигации пусковой установки, а азимутальной ориентация ИИБ – автоматическому наземному гиротеодолиту (НГТ).

Режим инерциально-спутникового управления предполагает обработку совокупной навигационной информации, доставляемой ИИБ и БНАП, с целью коррекции накапливающихся погрешностей инерциального счисления и снижения погрешностей ИИБ, что позволит продолжить высокоточную навигацию ЛА при прекращении приема спутниковых сигналов.

Предлагаемый доклад посвящен изложению особенностей редукции вектора оцениваемых параметров в ИСНС за счет комплексного привлечения результатов стендовой, автономной предстартовой и полетной калибровок ИИБ беспилотного ЛА.

Основные модели. Уравнения инерциальной навигации, решаемые бесплатформенной инерциальной навигационной системой (БИНС), включающей ИИБ и бортовой спецвычислитель, представим в виде

$$\dot{X} = V;\ \dot{V} = A_{си} n + g_{гр}, \tag{1}$$

где $X = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^T$, $V = \begin{bmatrix} v_x & v_y & v_z \end{bmatrix}^T$, $g_{гр} = \begin{bmatrix} g_{грx} & g_{гру} & g_{грz} \end{bmatrix}^T$ – координаты, проекции скорости и гравитационного ускорения в инерциальной системе координат (ИСК), совпадающей в момент запуска ЛА со стартовой системой координат, в дальнейшем не меняющей ориентации относительно инерциального пространства;

$n = \begin{bmatrix} n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix}^T$ – проекции кажущегося ускорения на оси связанной с ИИБ ортогональной системы координат (ССК), материализованные оптическим элементом, установленным на наружной поверхности корпуса ИИБ;

A_{cu} – матрица перехода из ССК в ИСК, определяемая решением Пуассона $dA_{cu}/dt = A_{cu}[\Omega\ ]$ при известном начальном значении A_{cu}^{c};

$[\Omega\ ]$ – кососимметрическая матрица, составленная из проекций угловой скорости на оси ССК.

Далее предполагается, что измерения акселерометров и ДУС с помощью матриц перехода A_{ac} и $A_{\partial c}$ из систем координат, формируемых чувствительными осями, приведены к осям ССК.

Проекции кажущегося ускорения n и угловой скорости $\Omega = \begin{bmatrix} \Omega_1 & \Omega_2 & \Omega_3 \end{bmatrix}^T$ на оси ССК можно представить в виде

$$n = Z_n - \Delta n = \left(E + \Delta K_n\right)^{-1}(Z_n - \Delta S_n - \delta S_n), \quad \Omega = Z_\Omega - \Delta\Omega = \left(E + \Delta K_\Omega\right)^{-1}(Z_\Omega - \Delta S_\Omega - \delta S_\Omega),$$

где $Z_n = \begin{bmatrix} z_{n_1} & z_{n_2} & z_{n_3} \end{bmatrix}^T$, $Z_\Omega = \begin{bmatrix} z_{\Omega_1} & z_{\Omega_2} & z_{\Omega_3} \end{bmatrix}^T$ – проекции измерений акселерометров и датчиков угловой скорости (ДУС) с погрешностями $\Delta n = \begin{bmatrix} \Delta n_1 & \Delta n_2 & \Delta n_3 \end{bmatrix}^T$ и $\Delta\Omega = \begin{bmatrix} \Delta\Omega_1 & \Delta\Omega_2 & \Delta\Omega_3 \end{bmatrix}^T$;

$\Delta S_n = \begin{bmatrix} \Delta S_{n_1} & \Delta S_{n_2} & \Delta S_{n_3} \end{bmatrix}^T$, $\Delta S_\Omega = \begin{bmatrix} \Delta S_{\Omega_1} & \Delta S_{\Omega_2} & \Delta S_{\Omega_3} \end{bmatrix}^T$ – смещения нулевого сигнала акселерометров и блока ДУС;

$\delta S_n = \begin{bmatrix} \delta S_{n_1} & \delta S_{n_2} & \delta S_{n_3} \end{bmatrix}^T$, $\delta S_\Omega = \begin{bmatrix} \delta S_{\Omega_1} & \delta S_{\Omega_2} & \delta S_{\Omega_3} \end{bmatrix}^T$ – шумы нулевого сигнала акселерометров и блока ДУС;

$\Delta K_n = diag\begin{bmatrix} \Delta K_{n_1} & \Delta K_{n_2} & \Delta K_{n_3} \end{bmatrix}$, $\Delta K_\Omega = diag\begin{bmatrix} \Delta K_{\Omega_1} & \Delta K_{\Omega_2} & \Delta K_{\Omega_3} \end{bmatrix}$;

ΔK_{n_1}, ΔK_{n_2}, ΔK_{n_3}, ΔK_{Ω_1}, ΔK_{Ω_2}, ΔK_{Ω_3} – отклонения масштабных коэффициентов акселерометров и ДУС; E – единичная матрица.

Вектор калибровочных параметров ИИБ включает постоянную в эксплуатации составляющую u_{const} и случайную от включения к включению составляющую u_{var}. Составляющая u_{const} идентифицируется при заводской калибровке и заносится в формуляр на ИИБ. Постоянная в запуске составляющая u_{var} может быть идентифицирована после задействования ИИБ перед пуском ЛА и в полете. Возможности калибровки ограничены коротким временем готовности и полета ЛА и раскрываются при привлечении дополнительной предстартовой и навигационной информации, обеспечивающей наблюдаемость элементов вектора u_{var} или их комбинации.

В качестве дополнительной рассматривается информация, доставляемая НГТ, и навигационные определения БНАП $Z_i^{БН} = \begin{bmatrix} x_i + h_{xi}^{БН} & y_i + h_{yi}^{БН} & z_i + h_{zi}^{БН} & v_{xi} + h_{v_x i}^{БН} & v_{yi} + h_{v_y i}^{БН} & v_{zi} + h_{v_z i}^{БН} \end{bmatrix}^T$, где $h_{xi}^{БН}$, $h_{yi}^{БН}$, $h_{zi}^{БН}$, $h_{v_x i}^{БН}$, $h_{v_y i}^{БН}$, $h_{v_z i}^{БН}$ – погрешности навигационных определений с ковариационной матрицей $R_h^{БН}$.

Особенности комплексной выставки и калибровки ИИБ. Комплексная выставка и калибровка ИИБ включает:

- проведение заводских стендовых испытаний с числом плановых позиций, позволяющим оценить постоянные в течение эксплуатационного срока калибровочные параметры акселерометров, ДУС и элементы матриц A_{ac} и $A_{\partial c}$ [4];
- предстартовую двухэтапную идентификацию погрешностей ИИБ при неподвижных угловых позициях ЛА на пусковой установке, принявшего близкое к горизонтальному и вертикальному положение;
- оценивание смещений нулевого сигнала акселерометров $\Delta S_{n_{1,2,3}}$ на участке траектории с отсутствием кажущегося ускорения по измерениям акселерометров;
- с помощью ИСНС оценивание в полете калибровочных параметров ИИБ u_{var}.

Оценки калибровочных параметров и погрешностей ИИБ, полученные при предстартовой подготовке и полетной автономной калибровке, будем отмечать соответственно верхними индексами «ˆ» и «˜». Индексом «˜» отметим оценки вектора u_{var}, доставляемые ИСНС. Верхним индексом ^{c} отметим параметры, фиксируемые на интервале предстартовой подготовки ЛА к пуску.

На первом этапе калибровки и выставки ИИБ при близком к горизонтальному положению ЛА одновременно определяются:

- матрица A_{cu}^c начальной ориентации ССК относительно географического базиса согласованием векторов ускорения свободного падения и угловой скорости суточного вращения Земли, проекции которых в осях базовой системы предполагаются известными априори, а в осях приборного трехгранника могут быть непосредственно измерены датчиками ИИБ;
- азимут ориентирного направления, материализованного оптическим элементом на корпусе ИИБ, с помощью НГТ.

Погрешности определения малых углов отклонения чувствительных осей акселерометров от горизонтальной плоскости имеют вид: $\varepsilon_1 \approx -\Delta n_3^c / g_0$, $\varepsilon_3 \approx \Delta n_1^c / g_0$. Погрешность ε_2 определения азимута ИИБ методом векторного согласования из-за погрешностей ДУС существенно превышает погрешность определения азимутальной привязки с помощью НГТ. Поэтому в матрице A_{cu}^c используется значение азимута ИИБ, найденное НГТ. Наличие высокоточного значения азимута, доставляемого НГТ, позволяет идентифицировать смещения нулевого сигнала $\Delta S_{\Omega_{1,2,3}}.$, стабильность которых в запуске обеспечивается конструкцией лазерных ДУС. Один из возможных алгоритмов идентификации смещений $\Delta S_{\Omega_{1,2,3}}$. изложен в [1]. Кроме этого, на первом этапе определяется оценка $\Delta \hat{n}_2^c$ погрешности $\Delta n_2^c = \Delta S_{n_2} + \Delta K_{n_2} n_2^c$ акселерометра, ось чувствительности которого приняла близкое к вертикальному положение.

На втором этапе находится оценка $\Delta \hat{n}_1^c$ погрешностей $\Delta n_1^c = \Delta S_{n_1} + \Delta K_{n_1} n_1^c$ акселерометра, чувствительная ось которого приняла при нахождении ЛА в пусковой позиции близкое к вертикальному положение, что позволяет найти оценку параметра $\hat{\varepsilon}_3 = \Delta \hat{n}_1^c / g_0$. Кроме этого, вторая позиция ИИБ позволяет дополнительно уточнить часть погрешностей ΔS_Ω блока ДУС.

Автономная траекторная калибровка акселерометров проводится на участке траектории ЛА с практическим отсутствием кажущегося ускорения. Оценки $\Delta \breve{S}_{n_{1,2,3}}$ смещений $\Delta S_{n_{1,2,3}}$ нулевого сигнала акселерометров, найденные по формуле $\Delta \breve{S}_{n_{1,2,3}} = N^{-1} \sum_{j=1}^{N} Z_{n_{1,2,3}j}$, где N – количество измерений акселерометров $Z_{n_{1,2,3}}$ на интервале $\left[t_н, t_к\right]$ отсутствия кажущегося ускорения, могут быть использованы для коррекции [2] накопленных к моменту $t_к$ погрешностей счисления координат и проекций скорости, измерений акселерометров при $t>t_k$, а также позволяют апостериорно уточнить A_{cu}^c.

Для пояснения матрицу ориентации A_{cu}^c представим в виде суммы вычисленного по результатам предстартовой выставки значения $A_{cu}^{выч}$ и дополняющего его до истинного малого отклонения $\varepsilon^c A_{cu}^{выч}$, где кососимметрическая матрица малых параметров и ее оценка по результатам предстартовой калибровки акселерометров имеют вид:

$$\varepsilon^c = \begin{bmatrix} 0 & -\varepsilon_3 & \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 & 0 & -\varepsilon_1 \\ -\varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 \end{bmatrix}, \hat{\varepsilon}^c = \frac{1}{g_0} \begin{bmatrix} 0 & -\Delta \hat{n}_1^c & 0 \\ \Delta \hat{n}_1^c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

С использованием оценок $\Delta \breve{S}_{n_1}$, $\Delta \breve{S}_{n_3}$ и $\Delta \hat{n}_1^c$ могут быть получены апостериорные оценки матрицы $\breve{\varepsilon}^c$:

$$\breve{\varepsilon}^{c} = \frac{1}{g_0}\begin{bmatrix} 0 & -\Delta\breve{S}_{n_1} & 0 \\ \Delta\breve{S}_{n_1} & 0 & -\Delta\breve{S}_{n_3} \\ 0 & \Delta\breve{S}_{n_3} & 0 \end{bmatrix}, \breve{\varepsilon}^{c} = \frac{1}{g_0}\begin{bmatrix} 0 & -\Delta\hat{n}_1^{c} & 0 \\ \Delta\hat{n}_1^{c} & 0 & -\Delta\breve{S}_{n_3} \\ 0 & \Delta\breve{S}_{n_3} & 0 \end{bmatrix}.$$

Возможность комбинирования результатов заводской, предстартовой и полетной автономной калибровок $\Delta\hat{n}_1^{c}$, $\Delta\hat{n}_2^{c}$, $\Delta\hat{S}_{\Omega_{1,2,3}}$, $\Delta\breve{S}_{n_{1,2,3}}$, $\hat{\varepsilon}^{c}$, $\breve{\varepsilon}^{c}$ создает область альтернативных вариантов навигационного алгоритма в режимах автономного и инерциально-спутникового управлений ЛА.

Учет результатов автономной калибровки ИИБ позволяет повысить точность навигации ЛА во всех режимах управления его движением, формируемых БСУ. Дальнейшее рассмотрение вариантов учета дополнительной навигационной информации проводится применительно к ИСНС, реализующим схемы связанного комплексирования навигационной информации, доставляемой БИНС (ИИБ) и БНАП.

ИСНС, реализующие схемы слабосвязанного комплексирования. Высокая точность и регулярность навигационных определений БНАП в каждой точке траектории, их избыточность, информационная поддержка БНАП со стороны БИНС и короткий интервал идентификации погрешностей БИНС по определениям БНАП позволяют ограничить область возможных схем синтеза ИСНС на множестве связанных схем интеграции группой слабосвязанных схем комплексирования измерений БИНС и определений БНАП.

Сложность реализации схем комплексирования во многом определяется размером вектора оцениваемых параметров u_i. Возможны два подхода к формированию вектора оцениваемых параметров u_i.

При первом подходе в вектор u_i включает все калибровочные параметры ИИБ, сохраняющие постоянство при предстартовой подготовке и траекторном движении, элементы матрицы ε^{c} и параметры движения ЛА. При этом из-за слабой наблюдаемости отдельных калибровочных параметров ИИБ на коротком интервале наблюдения включение их в вектор u_i не всегда оправдано.

Во втором подходе в вектор u_i не включают калибровочные параметры ИИБ, уточнение которых с помощью дополнительной навигационной информации, доставляемой БНАП, на коротком интервале наблюдения не дает заметного повышения точности системы управления ЛА. Далее рассматриваются аспекты синтеза ИСНС с вектором u_i, редукция которого увязана с результатами предстартовой и полетной автономной калибровок $\Delta\hat{n}_1^{c}$, $\Delta\hat{n}_2^{c}$, $\Delta\hat{S}_{\Omega_{1,2,3}}$, $\Delta\breve{S}_{n_{1,2,3}}$, $\hat{\varepsilon}^{c}$, $\breve{\varepsilon}^{c}$ таким образом, что общее число параметров, идентифицированных на этапе предстартовой подготовки, этапе автономной калибровки акселерометров и на траектории с помощью ИСНС с редуцированным вектором u_i, остается неизменным [3].

ИСНС с неинвариантной схемой комплексирования. На рис. 1 представлен один из возможных вариантов построения ИСНС, отличающийся разомкнутой схемой интеграции по координатам и слабосвязанной неинвариантной схемой комплексирования по скорости. Разомкнутая интеграция позволяет периодически замещать координаты ЛА, счисленные БИНС, навигационными определениями БНАП, уточненными с помощью предстартовых дифференциальных поправок, а комплексирование по скорости позволяет провести полетную калибровку и выставку ИИБ для надежного счисления координат при нарушении приема радионавигационных сигналов.

Вектор измерений формируется в виде $Z_{vi}^{БН} = H^{н} \cdot u_i + h_{vi}^{БН}$, где $H^{н} = const.$

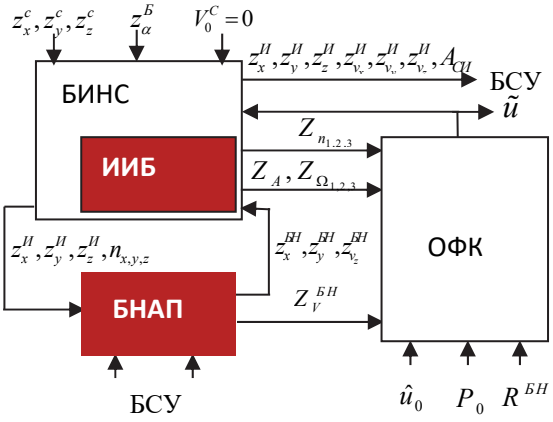


Рис. 1. Вариант построения ИСНС со слабосвязанной схемой комплексирования по скорости (ОФК-обобщенный фильтр Калмана, P_0 – ковариационная матрица погрешностей $\tilde{u}_o$)

В общем случае обоснованию размера редуцированного вектора u_i помогает анализ чувствительности оценок $\tilde{u}_i$ к не включенным в вектор u_i калибровочным параметрам. В качестве примера на рис. 2 представлены реализации оценок $\tilde{\varepsilon}_2$, полученные для ИСНС с редуцированным вектором $u_i = \left[v_{yi} \quad v_{xi} \quad v_{zi} \quad \varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3 \right]^T$, в состав которого не вошли смещения нулевого сигнала и отклонения масштабных коэффициентов $\Delta S_{n_{1,2,3}}$ и $\Delta K_{n_{1,2,3}}$ акселерометров. Зависимость на рис 2, *а*, соответствует нулевым значениям параметров, не вошедших в редуцированный вектор u_i, зависимости на рис. 2, *б* и 2, *в* соответствуют значениям не вошедших параметров с троекратным отличием одного от другого. Наблюдается влияние не включенных параметров $\Delta S_{n_{1,2,3}}$ и $\Delta K_{n_{1,2,3}}$ на оценку $\tilde{\varepsilon}_2$. Слабая наблюдаемость ε_2 при $T > 40c$ объясняется отсутствием кажущегося ускорения на этом участке данной траектории. Если влияние возможных значений неучтенных параметров на погрешность оценивания редуцированного вектора u_i превышает допустимый уровень и их значения оказывают заметное влияние на погрешности счисления, необходимо включить эти параметры в вектор u_i.

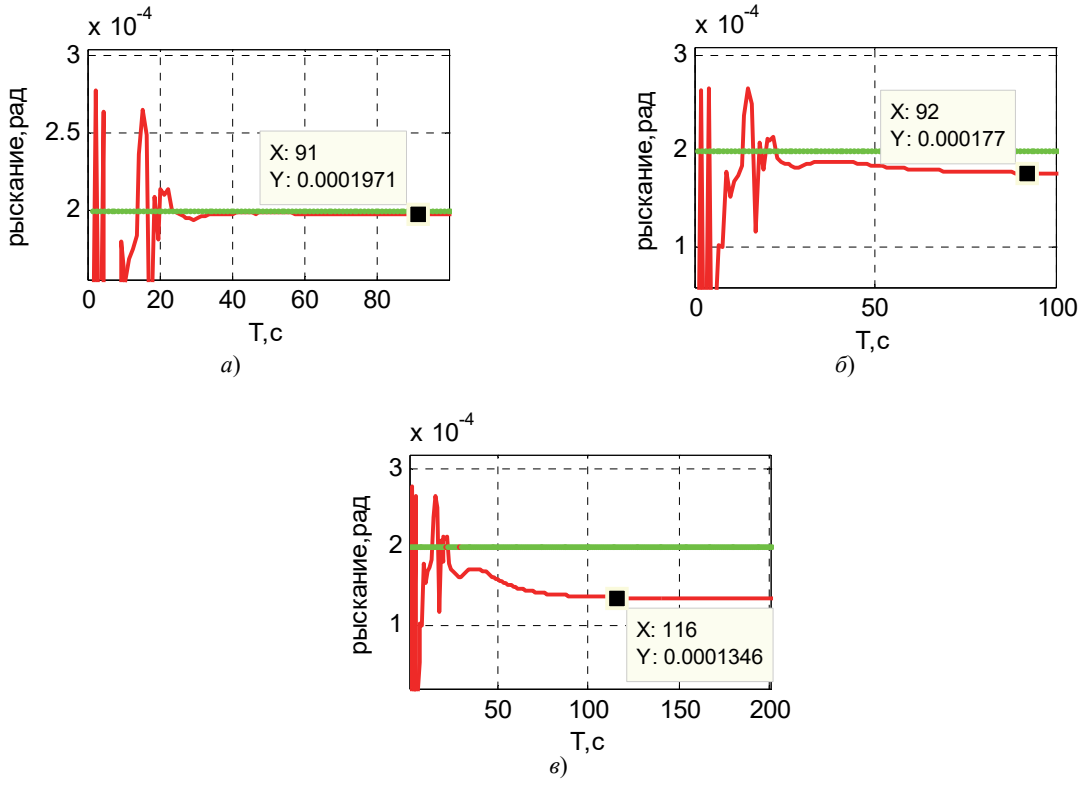


Рис. 2. Зависимость погрешности оценивания параметра ε_2 на траектории от интервала наблюдения (— оценка, — истинное значение, *а* – $\Delta S_{n_{1,2,3}} = 0$, $\Delta K_{n_{1,2,3}} = 0$, *б* – $\Delta S_{n_{1,2,3}} = 5 \cdot 10^{-3} м/с^2$, $\Delta K_{n_{1,2,3}} = 1 \cdot 10^{-5}$, *в* – $\Delta S_{n_{1,2,3}} = 15 \cdot 10^{-3} м/с^2$, $\Delta K_{n_{1,2,3}} = 3 \cdot 10^{-5}$)

Рассмотрим некоторые варианты построения ИСНС с редукцией вектора оцениваемых параметров, отвечающей условиям неизменности общего числа параметров, идентифицированных в результате комплексной калибровки и выставки ИИБ. Варианты вектора u_i и кососимметрические матрицы $\tilde{\varepsilon}^c$ оценок погрешностей начальной ориентации ИИБ, найденных посредством автономных калибровок и с помощью ИСНС, представлены в табл. 1. Во всех рассмотренных вариантах вектор $\tilde{u}_i$ не включает погрешности ДУС, которые идентифицированы по измерениям автоматического НГТ на стартовой позиции, и элементы матриц A_{ac} и $A_{\grave{o}c}$, идентифицированные при стендовой заводской калибровке.

Таблица 1

Оцениваемые ИСНС параметры и комплексная оценка погрешностей начальной ориентации ИИБ

№	Вектор оцениваемых ИСНС обобщенных параметров	Комплексная оценка кососимметрической матрицы погрешностей начальной ориентации
1	$u_i = \left[v_{xi} \;\; v_{yi} \;\; v_{zi} \;\; \varepsilon_1 \;\; \varepsilon_2 \;\; \varepsilon_3 \;\; \Delta S_{n_1} \;\; \Delta S_{n_2} \;\; \Delta S_{n_3} \;\; \Delta K_{n_1} \;\; \Delta K_{n_2} \;\; \Delta K_{n_3} \right]^T$	$\tilde{\varepsilon}^c = \begin{bmatrix} 0 & -\tilde{\varepsilon}_3 & \tilde{\varepsilon}_2 \\ \tilde{\varepsilon}_3 & 0 & -\tilde{\varepsilon}_1 \\ -\tilde{\varepsilon}_2 & \tilde{\varepsilon}_1 & 0 \end{bmatrix}$
2	$u_i = \left[v_{xi} \;\; v_{yi} \;\; v_{zi} \;\; \varepsilon_2 \;\; \Delta S_{n_1} \;\; \Delta S_{n_2} \;\; \Delta S_{n_3} \;\; \Delta K_{n_1} \;\; \Delta K_{n_2} \;\; \Delta K_{n_3} \right]^T$	$\tilde{\varepsilon}^c = \begin{bmatrix} 0 & -\tilde{\varepsilon}_3^* & \tilde{\varepsilon}_2^* \\ \tilde{\varepsilon}_3^* & 0 & -\tilde{\varepsilon}_1^* \\ -\tilde{\varepsilon}_2^* & \tilde{\varepsilon}_1^* & 0 \end{bmatrix}$
3	$u_i = \left[v_{xi} \;\; v_{yi} \;\; v_{zi} \;\; \varepsilon_2 \;\; \Delta S_{n_1} \;\; \Delta S_{n_2} \;\; \Delta S_{n_3} \;\; \Delta K_{n_3} \right]^T$	$\tilde{\varepsilon}^c = \begin{bmatrix} 0 & -\hat{\varepsilon}_3 & \tilde{\varepsilon}_2^* \\ \hat{\varepsilon}_3 & 0 & -\tilde{\varepsilon}_1^* \\ -\tilde{\varepsilon}_2^* & \tilde{\varepsilon}_1^* & 0 \end{bmatrix}$
4	$u_i = \left[v_{xi} \;\; v_{yi} \;\; v_{zi} \;\; \varepsilon_2 \;\; \Delta K_{n_1} \;\; \Delta K_{n_2} \;\; \Delta K_{n_3} \right]^T$	$\tilde{\varepsilon}^c = \begin{bmatrix} 0 & -\tilde{\varepsilon}_3^{**} & \tilde{\varepsilon}_2^{**} \\ \tilde{\varepsilon}_3^{**} & 0 & -\tilde{\varepsilon}_1^{**} \\ -\tilde{\varepsilon}_2^{**} & \tilde{\varepsilon}_1^{**} & 0 \end{bmatrix}$
5	$u_i = \left[v_{xi} \;\; v_{yi} \;\; v_{zi} \;\; \varepsilon_2 \;\; \Delta K_{n_3} \right]^T$	$\tilde{\varepsilon}^c = \begin{bmatrix} 0 & -\hat{\varepsilon}_3 & \tilde{\varepsilon}_2^{**} \\ \hat{\varepsilon}_3 & 0 & -\tilde{\varepsilon}_1^{**} \\ -\tilde{\varepsilon}_2^{**} & \tilde{\varepsilon}_1^{**} & 0 \end{bmatrix}$

Первый вариант соответствует ИСНС с оцениваемым вектором обобщенных параметров u_i размера 12*1 [4]. Может быть рекомендован, когда предстартовая калибровка акселерометров не проводится, не учитывается связь между погрешностями начальной ориентации и погрешностями акселерометров и невозможно осуществить полетную автономную калибровку акселерометров из-за отсутствия участков траектории с отсутствием кажущегося ускорения.

Во втором варианте учитывается функциональная связь между погрешностями начальной ориентации $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ и погрешностями $\Delta K_{n1}, \Delta S_{n1}, \Delta K_{n3}, \Delta S_{n3}$ акселерометров, возникающая при предстартовой выставке ИИБ, что позволяет не включать в явном виде погрешности $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ в вектор u_i. Сходимость оценок $\Delta\tilde{K}_{n1}, \Delta\tilde{S}_{n1}, \Delta\tilde{K}_{n3}, \Delta\tilde{S}_{n3}$ обуславливает сходимость оценок $\tilde{\varepsilon}_1^* = -(\Delta\tilde{K}_{n3}\hat{n}_3^c + \Delta\tilde{S}_{n3})/g_0$, $\tilde{\varepsilon}_3^* = (\Delta\tilde{K}_{n1}\tilde{n}_1^c + \Delta\tilde{S}_{n1})/g_0$. Учет специфики предстартовой выставки ИИБ позволил не только уменьшить вектор u_i до размера 10*1, но и придать данному варианту ИСНС новое качество – наблюдаемость погрешностей ε_1, ε_3 на всей траектории.

В третьем варианте при предстартовой идентификации погрешностей $\Delta n_1^c, \Delta n_2^c$ акселерометров появляется возможность уменьшения вектора u_i до размера 8*1, не включая в него отклонения масштабных коэффициентов $\Delta K_{n_1}, \Delta K_{n_3}$, которые могут быть найдены по оценкам $\Delta\hat{n}_1^c, \Delta\hat{n}_2^c$, и $\Delta\tilde{S}_{n1}, \Delta\tilde{S}_{n2}$, оценка $\tilde{\varepsilon}_1^*$ находится по оценкам $\Delta\tilde{K}_{n3}$ и $\Delta\tilde{S}_{n3}$, оценка параметра ε_3 находится по формуле $\hat{\varepsilon}_3 = \Delta\hat{n}_1^c / g_0$.

В четвертом варианте ИСНС в вектор u_i, кроме параметров $\varepsilon_1, \varepsilon_3$, не включены параметры смещений $\Delta S_{n_{1,2,3}}$, оценки которых $\Delta\breve{S}_{n_{1,2,3}}$ могут быть найдены автономно на участках траектории с отсутствием кажущегося ускорения. В этом случае удается снизить размер вектора u_i с 10*1 до 7*1 даже без предстартовой идентификации погрешностей $\Delta n_1^c, \Delta n_2^c$. Оценки параметров $\varepsilon_1, \varepsilon_3$ вычисляются по формулам $\tilde{\varepsilon}_1^{**} = -(\Delta\tilde{K}_{n3}\hat{n}_3^c + \Delta\breve{S}_{n3})/g_0$, $\tilde{\varepsilon}_3^{**} = (\Delta\tilde{K}_{n1}\tilde{n}_1^c + \Delta\breve{S}_{n1})/g_0$.

Предполагая идентифицированными по результатам предстартовой калибровки оценки $\Delta\hat{n}_1^c$, $\Delta\hat{n}_2^c$, по результатам полетной автономной калибровки оценки $\Delta\breve{S}_{n_{1,2,3}}$ и обеих автономных калибровок оценки $\Delta\breve{K}_{n_1} = \left(\Delta\hat{n}_1^c - \Delta\breve{S}_{n_1)}\right)/n_1^c$, $\Delta\breve{K}_{n_2} = \left(\Delta\hat{n}_2^c - \Delta\breve{S}_{n_2}\right)/n_2^c$ можно сформировать редуцированный вектор u_i размера 5*1, соответствующий варианту 5, при этом общее число оценок параметров БИНС, полученных в результате предстартовой и полетной автономной и неавтономной калибровок, неизменно: в данном варианте это оценки $\tilde{v}_{xi}, \tilde{v}_{yi}, \tilde{v}_{zi}$, $\hat{\varepsilon}_1, \tilde{\varepsilon}_2, \breve{\varepsilon}_3$, $\Delta\breve{S}_{n_1}, \Delta\breve{S}_{n_2}, \Delta\breve{S}_{n_3}, \Delta\hat{S}_{\Omega_1}, \Delta\hat{S}_{\Omega_2}, \Delta\hat{S}_{\Omega_3}$, $\Delta\breve{K}_{n1}, \Delta\breve{K}_{n2}, \Delta\tilde{K}_{n3}$.

Следует заметить, что выбор варианта редуцированного вектора u_i определяется видом траектории движения, объемом стендовой калибровки, временем предстартовой готовности, определяющем возможность проведения предстартовых калибровок, значением приращения кажущейся скорости, производительностью навигационного вычислителя и прочими факторами.

Объем доклада не позволяет проиллюстрировать сходимость оценок всех параметров вектора u_i, поэтому остановимся на графическом представлении сходимости оценок погрешностей начальной ориентации ИИБ и смещения нулевого сигнала акселерометра на рис. 3 и 4 в вариантах ИСНС 4 и 3 табл. 1.

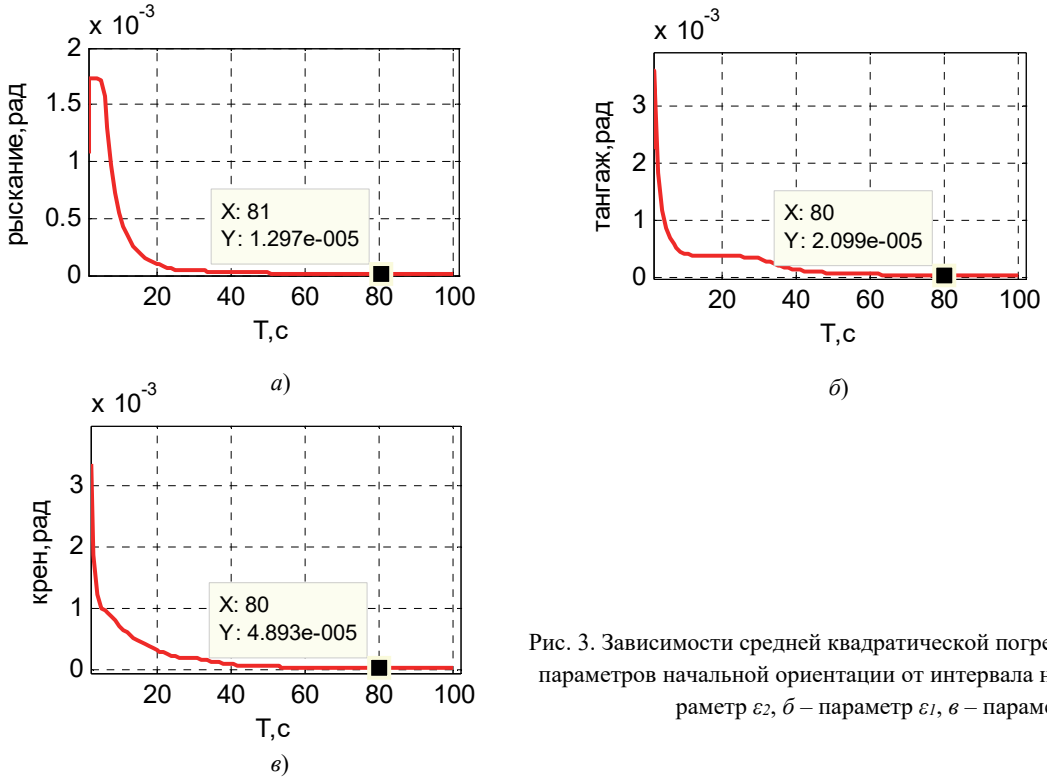


Рис. 3. Зависимости средней квадратической погрешности оценивания параметров начальной ориентации от интервала наблюдения (*а* – параметр ε_2, *б* – параметр ε_1, *в* – параметр ε_3)

Как свидетельствуют кривые среднеквадратических погрешностей оценивания $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$, полученных из решения ковариационного уравнения, оценки $\tilde{\varepsilon}_1, \tilde{\varepsilon}_2, \tilde{\varepsilon}_3$ активно сходятся на начальном участке траектории, что является общим свойством оценок всех калибровочных параметров ИИБ рассматриваемого ЛА. Сходимость оценок калибровочных параметров ИИБ, за

исключением смещений нулевого сигнала акселерометров, по мере приближения ЛА к участку с отсутствием кажущегося ускорения уменьшается и восстанавливается на конечном атмосферном участке траектории.

Асимптотические кривые 1 (решение ковариационного уравнения) и реализация (непрерывная линия 2) на рис. 4 отражают характер сходимости оценки $\Delta\tilde{S}_{n_1}$ смещения нулевого сигнала акселерометра, также активно сходящейся к истинному значению $\Delta S_{n_1} = 5*10^{-3}$ м/с^2 на начальном участке траектории со значительным кажущимся ускорением.

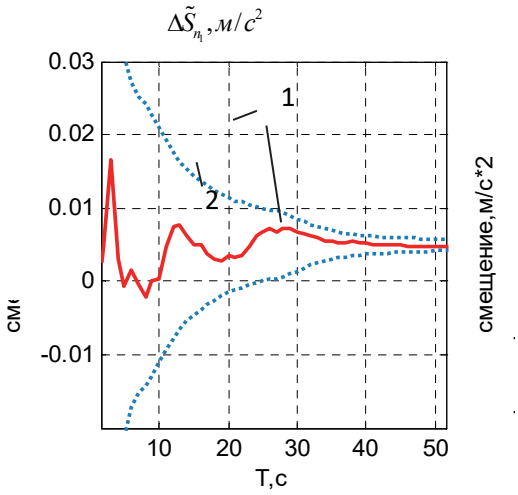


Рис. 4. Зависимости погрешностей оценивания смещения нулевого сигнала ΔS_{n_1} от интервала наблюдения

ИСНС с инвариантной схемой комплексирования. Вышерассмотренный подход к формированию редуцированного вектора u_i в ИСНС с неинвариантной схемой комплексирования распространяется и на инвариантную схему комплексирования измерений БИНС и БНАП (рис. 5), основанную на решении избыточной системы уравнений, связывающей линейной зависимостью $\Delta Z_{\Delta Vi} = Z^{И}_{\Delta Vi} - Z^{БН}_{\Delta Vi} \approx H^{u}_{i} \cdot u + h^{БН}_{vi}$ вектор разности $\Delta Z_{\Delta Vi}$ измерений БИНС и БНАП проекций приращения скорости и редуцированный вектор u [5]. В данной схеме оцениваются только калибровочные параметры ИИБ и погрешности его начальной выставки, а размер редуцированного вектора $u = const$ применительно к приведенным в табл. 1 вариантам не превышает 9.

Подробнее варианты формирования редуцированного вектора u применительно к неинвариантной схеме комплексирования рассмотрены в [5]. Ограничимся рассмотрением наиболее простого решения данных ИСНС, идентифицирующего редуцированный вектор $u = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & \varepsilon_2 & \varepsilon_3 \end{bmatrix}^T$ по измерениям $\Delta Z_{\Delta V}$.

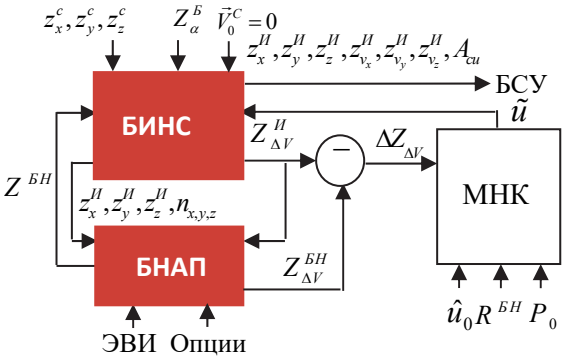


Рис. 5. ИСНС с инвариантной схемой комплексирования

Представленная выше система уравнений для этого случая примет вид

$$Z^{И}_{\Delta V_i} - Z^{БН}_{\Delta V_i} = \begin{bmatrix} 0 & v^{каж}_{zi} & -v^{каж}_{yi} \\ -v^{каж}_{zi} & 0 & v^{каж}_{xi} \\ v^{каж}_{yi} & -v^{каж}_{xi} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} + h^{БН}_{vi}. \quad (2)$$

Решение данной задачи при переходе последних уравнений к эквивалентному виду

$$Z^{И}_{\Delta V_i} - Z^{БН}_{\Delta V_i} = \begin{bmatrix} 0 & -\varepsilon_3 & \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 & 0 & -\varepsilon_1 \\ -\varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v^{каж}_{xi} \\ v^{каж}_{yi} \\ v^{каж}_{zi} \end{bmatrix} + h^{БН}_{vi}$$

сводится к определению параметров $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ согласованием вектора кажущейся скорости ЛА.

Одно измерение $Z^{И}_{\Delta v_{(i+1)}} - Z^{БН}_{\Delta v_{(i+1)}}$ позволяет найти два малых параметра: $\varepsilon_1, \varepsilon_2$, либо $\varepsilon_1, \varepsilon_3$, либо $\varepsilon_2, \varepsilon_3$. Так, при $\varepsilon_1 = 0$ имеем:

$$\tilde{\varepsilon}_2 \approx \frac{1}{v^{каж}_x}\left(z^{БН}_{vz} - z^{И}_{vz}\right), \quad \tilde{\varepsilon}_3 \approx \frac{1}{v^{каж}_x}\left(z^{И}_{vy} - z^{БН}_{vy}\right). \quad (3)$$

Дополнительные измерения позволяют идентифицировать все три угла $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Для избыточной системы уравнений (2) возможно применение процедуры оптимального оценивания вектора u.

Чем больше вектор кажущейся скорости, тем меньше влияние погрешности принятой модели $Z^{И}_{\Delta v_{(i+1)}} - Z^{БН}_{\Delta v_{(i+1)}}$ на точность определения $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Поэтому начальный участок траектории со значительным кажущимся ускорением данного ЛА наиболее важен для оценивания вектора u.

Асимптотические кривые 1 на рис. 6 отражают зависимость предельных погрешностей оценивания $\tilde{\varepsilon}_1, \tilde{\varepsilon}_2, \tilde{\varepsilon}_3$ от интервала наблюдения, полученные из решения ковариационного уравнения ФК для нередуцированного вектора u. Реализации 2 на рис. 5 являются примером оценивания ФК малых параметров ориентации и иллюстрируют сходимость оценок $\tilde{\varepsilon}_1, \tilde{\varepsilon}_2, \tilde{\varepsilon}_3$ к истинным значениям $\varepsilon_1 = 1*10^{-4}\,рад, \quad \varepsilon_2 = 0,018\,рад, \quad \varepsilon_3 = 1*10^{-4}\,рад.$

Маркер на рис. 6 отмечает на реализации $\tilde{\varepsilon}_2$ значение оценки 0,01807 рад при $\varepsilon_2 = 0,018\,рад$ на 13 с интервала наблюдения. Оценка $\tilde{\varepsilon}_2$, полученная алгоритмом (3), реализующим согласование вектора приращения кажущейся скорости, по измерению приращений скорости, доставляемых БИНС и БНАП на 13 с, составила 0,01803 рад. Таким образом, обе оценки не выходят за границы асимптотических кривых. Зависимости иллюстрируют быструю сходимость и высокую точность идентификации погрешностей начальной ориентации ИИБ для данного касса ЛА.

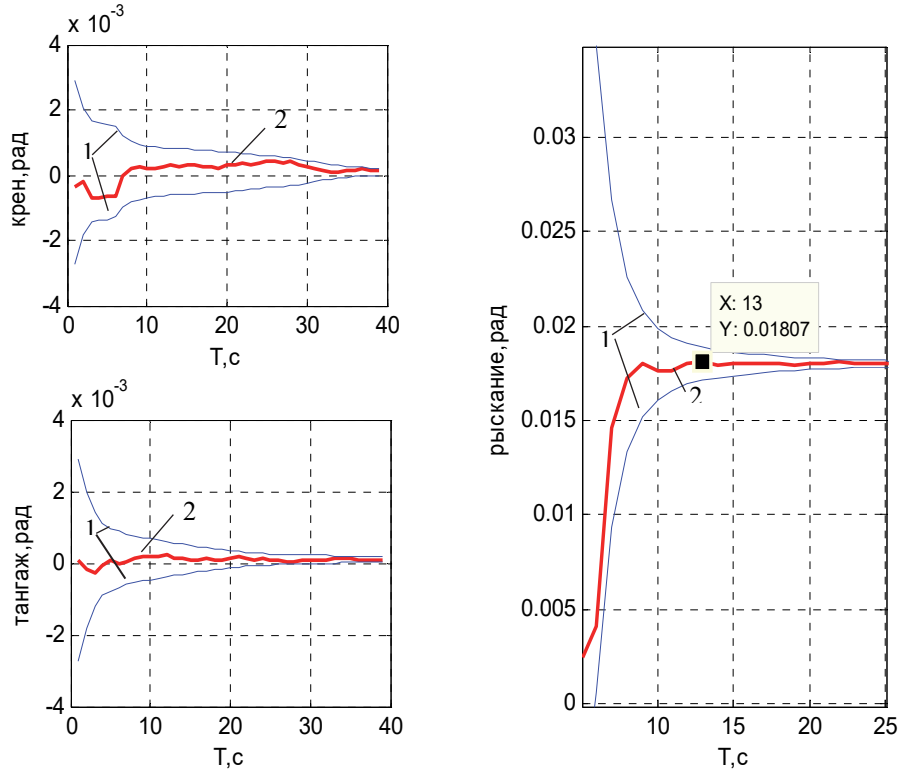


Рис. 6. Зависимости погрешностей оценивания малых параметров начальной ориентации ИИБ от интервала наблюдения

Заключение. В рассмотренных вариантах ИСНС с редуцированным вектором оцениваемых параметров, учитывающим состав, кратковременность и специфику применения комплекса ЛА, размер вектора оцениваемых параметров соответствует схеме автономных предстартовой и полетной калибровок таким образом, что общее число оцениваемых автономным способом и с помощью ИСНС калибровочных параметров ИИБ остается неизменным. Полученные оценки позволяют уточнить проекции скорости ЛА и угловое положение связанной системы координат в инерциальном пространстве, а также откалибровать ИИБ, что позволяет продолжить высокоточную автономную навигацию при прекращении приема радионавигационных сигналов. Выбор варианта ИСНС определяется заданным режимом управления ЛА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гурский Б.Г., Солунин В.Л., Новиков А.И.** Навигационный комплекс БПЛА наземного базирования // Гироскопия и навигация. 2009. №2 (65).
2. **Новиков А.И., Сирица В.М., Спирин Э.П.** Коррекция бесплатформенной инерциальной навигационной системы беспилотного летательного аппарата наземного базирования на внеатмосферном участке траектории // Известия РАРАН. 2010. Вып. 1 (63).
3. **Новиков А.И., Сирица В.М., Спирин Э.П.** Траекторная калибровка и выставка БИНС инерциально-спутниковой навигационной системы пониженного порядка // Известия РАРАН. 2010. Вып. 4(66).
4. **Егоров Ю.Г., Дзуев А.А., Попов Е.А.** Синтез программ калибровки блока акселерометров БИНС при инвариантном подходе. // Гироскопия и навигация. 2019. Том 27. №1 (104).
5. **Шаповалов А.Б., Солунин В.Л., Новиков А.И.** Системный подход к решению задачи выставки и калибровки инерциального измерительного блока беспилотного летательного аппарата наземного базирования с бортовой многорежимной системой управления // Материалы конференции «Навигация-2019». Приложение к журналу «Электронные информационные системы», 2019.

A.B. Shapovalov, V.V. Kostyukov, V.L. Solunin, V.V. Scherbinin, A.I. Novikov (JSC “Central Research Institute of Automation and Hydraulics”)

FEATURES OF ESTIMATED PARAMETER VECTOR REDUCTION IN INS/GPS NAVIGATION SYSTEM OF GROUND-BASEDUNMANNER AERIAL VEHICLES

The features of the synthesis of INS/GPS navigation system synthesis for a multimode multi-mode onboard control system of a ground-based unmanned aerial vehicles are considered. The synthesis paradigm is the use of procedures for optimizing the INS/GPS design with the integrated involvement of the results of the factory, autonomous prelaunch and flight calibrations of the inertial measuring unit (IMU).

Loosely-coupled (invariant and non-invariant) integration schemes are considered. Transformation of algorithms for processing the aggregate navigation information are studied, along with the options for reducing the vector of the estimated parameters, depending on the results of the prelaunch and flight alignment and IMU calibrations and the presence of typical trajectory sections.

В. А. ТУПЫСЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ГУАП, Санкт-Петербург)

Ю. А. ЛИТВИНЕНКО, А. В. ЛОПАРЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ОСОБЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ПРИ НЕЛИНЕЙНОСТЯХ В УРАВНЕНИЯХ ДИНАМИКИ И ИЗМЕРЕНИЙ

Обсуждается возможность оценивания состояния динамической системы с нелинейностями как в уравнениях динамики, так и в уравнениях измерений с использованием метода особых преобразований. Рассмотрены особенности применения предложенного подхода. Для методического примера конкретизированы уравнения получения искомых оценок и проведен анализ точности оценивания.

Введение. В настоящее время для решения определенного класса навигационных задач предложено использование полиномиальных фильтров, позволяющих при гауссовой аппроксимации апостериорной плотности вырабатывать на текущем шаге оценку, оптимальную в классе линейных оценок [1–5]. В то же время использование гауссовской аппроксимации апостериорной плотности приводит к тому, что многошаговые процедуры оценивания также оказываются неоптимальными. В работах [6, 7] показано, что при определенных условиях в качестве альтернативного подхода может использоваться метод особых преобразований, суть которого заключается в преобразовании исходной системы нелинейных измерений с целью исключения нелинейных членов. Такой подход рассмотрен при наличии нелинейности в уравнениях измерений [6] либо в уравнениях динамики [7], при этом многошаговая задача становится линейной и при ее решении не требуется гауссовой аппроксимации апостериорной плотности. В настоящем докладе обсуждается возможность и специфика использования метода особых преобразований в задаче оценивания, в которой нелинейными являются как измерения, так и уравнения динамики. С целью упрощения изложения предполагается, что уравнения динамики и измерений содержат квадратичные члены, которые и определяют нелинейность уравнений.

Постановка задачи оценивания. Рассмотрим задачу оценивания n-мерной векторной марковской последовательности, описываемой нелинейным разностным стохастическим уравнением

$$x_i(k) = \Phi_i(k)x(k-1) + x^{\mathrm{T}}(k-1)B_{\psi i}(k)x(k-1) + w_i(k),\ i \in \overline{1,n},\ x_i(0) \in N\{\overline{x}(0), P(0)\}, \qquad (1)$$

по m-мерным нелинейным измерениям

$$y_j(k) = H_j(k)x(k) + x^{\mathrm{T}}(k)B_{\varphi j}(k)x(k) + v_j(k),\ j \in \overline{1,m}, \qquad (2)$$

где вторые слагаемые в правых частях (1) и (2) представляют собой квадратичные формы векторов $x(k-1)$ и $x(k)$ соответственно; $\Phi_i(k)$, $B_{\psi i}(k)$, $B_{\varphi j}(k)$ – матрицы размерности $1\times n$, $n\times n$, $n\times n$, $w(k)$, $v(k)$ – центрированные независимые друг от друга и от начального состояния $x(0)$ гауссовые белые шумы с матрицами ковариаций $Q(k)$ и $R(k)$ соответственно.

Суть метода особых преобразований. Суть метода особых преобразований в рассматриваемой постановке заключается в преобразовании исходной системы (1, 2) таким образом, чтобы исключить содержащиеся в уравнениях нелинейные члены. Для этого, следуя подходу, изложенному в [7], будем рассматривать первое уравнение как модель измерений вида

$$0 = -x(k) + \Phi(k)x(k-1) + B_{\psi u}(k)u(k-1) + w(k), \qquad (3)$$

где $\Phi(k)$ – квадратная матрица размерности $n\times n$; $u = \left|x_1^2 \ldots x_1 x_n \ldots x_n^2\right|$ – вектор квадратичных членов; $B_{\psi u}(k)$ – матрица размерности $n\times n(n+1)/2$.

С целью использования метода особых преобразований представим второе слагаемое в уравнении (2) как функцию вектора состояния на предыдущем шаге. Приближенно (с точностью до квадратичных членов разложения) измерения могут быть представлены в виде

$$y(k) = H(k)x(k) + B_{\varphi u}(k)u(k-1) + v(k), \qquad (4)$$

где $H(k)$ – матрица размерности $m \times n$; $B_{\varphi u}(k)$ – матрица размерности $m \times n(n+1)/2$.

Введем в рассмотрение расширенный вектор состояния $x_P(k) = \left(x^{\mathrm{T}}(k) \quad x^{\mathrm{T}}(k-1)\right)^{\mathrm{T}}$. С учетом (3) и (4) измерения в расширенном пространстве состояния можно записать как

$$\begin{pmatrix} 0 \\ y(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -E & \Phi(k) \\ H(k) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(k) \\ x(k-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_{\psi u}(k) \\ B_{\varphi u}(k) \end{pmatrix} u(k-1) + \begin{pmatrix} w(k) \\ v(k) \end{pmatrix}. \tag{5}$$

Для исключения нелинейных членов в правой части выражения (5) домножим слева обе части уравнения (5) на матрицу $A(k) = \left(A_{\psi}(k) \quad A_{\varphi}(k)\right)$ максимально возможного ранга, такую что

$$A_{\psi}(k) B_{\psi u}(k) + A_{\varphi}(k) B_{\varphi u}(k) = 0.$$

В результате уравнение (5) преобразуется к линейному уравнению измерений вида

$$A_{\varphi}(k) y(k) = \left(-A_{\psi}(k) + A_{\varphi}(k) H(k) \quad A_{\psi}(k)\Phi(k)\right) \begin{pmatrix} x(k) \\ x(k-1) \end{pmatrix} + A_{\psi}(k) w(k) + A_{\varphi}(k) v(k). \tag{6}$$

Таким образом, нелинейная задача фильтрации (1, 2) сводится к линейной гауссовой задаче оценивания расширенного вектора $x_P(k)$ по измерениям (6), решение которой в рамках байесовского подхода [4] отыскивается с учетом априорных значений математического ожидания и ковариационной матрицы искомого вектора $x_P(k)$:

$$\tilde{x}_P(k) = \left(0 \quad \hat{x}^{\mathrm{T}}(k-1)\right)^{\mathrm{T}}, \; L^{-1}(k) = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & P^{-1}(k-1) \end{pmatrix}. \tag{7}$$

Пример. Рассмотрим задачу оценивания скалярной последовательности

$$x(k) = a_1 x(k-1) + a_2 x^2(k-1) + w(k),\; w(k) \in N\{0, Q\},\; x(0) \in N\{0, P_0\}$$

по измерениям

$$y(k) = b_1 x(k) + b_2 x^2(k) + v(k),\; v(k) \in N\{0, R\}.$$

Переходя к расширенному пространству состояний, можно приближенно записать:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ y(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & a_1 \\ b_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x(k) \\ x(k-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_2 \\ a_1^2 b_2 \end{pmatrix} u(k-1) + \begin{pmatrix} w(k) \\ v(k) \end{pmatrix}. \tag{8}$$

Матрица особого преобразования удовлетворяет уравнению $A_{\psi}(k) a_2 + A_{\varphi}(k) a_1^2 b_2 = 0$. Таким образом, в качестве параметров этой матрицы могут быть выбраны $A_{\psi}(k) = a_1^2 b_2$, $A_{\varphi}(k) = -a_2$.

Уравнение байесовской оценки применительно к модели (8) будет иметь вид

$$\hat{x}(k) = \frac{a_1^3 b_2 \hat{x}(k-1) + a_2 y(k)}{a_2 b_1 + a_1^2 b_2},$$

при этом дисперсия ошибки оценивания изменяется в соответствии с уравнением

$$P(k) = \frac{a_1^6 b_2^2 P(k-1) + a_2^2 R + a_1^4 b_2^2 Q}{\left(a_2 b_1 + a_1^2 b_2\right)^2}.$$

В качестве альтернативы методу особых преобразований рассмотрим алгоритм полиномиальной фильтрации [1], представимый для рассматриваемого примера в виде:

$$\hat{x}(k \mid k-1) = a_1 \hat{x}(k-1) + a_2 \hat{x}^2(k-1) + a_2 P(k-1),$$

$$P(k \mid k-1) = (a_1 + 2a_2 \hat{x}(k-1))^2 P(k-1) + 2a_2^2 P^2(k-1) + Q,$$

$$\hat{x}(k) = \frac{(b_1 + 2b_2 \hat{x}(k \mid k-1))(b_2 \hat{x}^2(k-1) + y(k)) - b_1 b_2 P(k \mid k-1) + \hat{x}(k \mid k-1) R / P(k \mid k-1)}{(b_1 + 2b_2 \hat{x}(k \mid k-1))^2 + 2b_2^2 P(k \mid k-1) + R / P(k \mid k-1)},$$

$$P(k) = (b_1 + 2b_2 \hat{x}(k \mid k-1))^2 P(k \mid k-1) + 2b_2^2 P^2(k \mid k-1) + R.$$

На рис. 1 показаны действительные (кривые *1*, *3*) и расчетные (кривые *2*, *4*) среднеквадратические погрешности (СКП) оценивания, полученные путем осреднения данных 10^4 реализаций. Кривые *1*, *2* на графиках соответствуют методу особых преобразований; *3*, *4* – полиномиальному фильтру. При этом были заданы следующие значения параметров модели: $a_1 = a_2 = b_2 = 0{,}1$; $b_1 = 1$; $Q = R = 10^{-4}$; $P_0 = 1$.

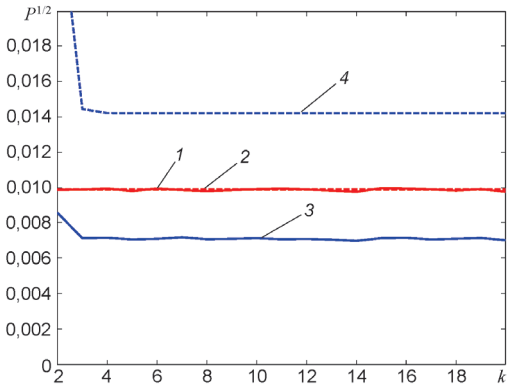


Рис. 1. Усредненные действительные (сплошные линии) и расчетные (пунктирные линии) СКП

Заметим, что в данном случае выборочные СКП оценивания методом особых преобразований практически совпали с расчетными значениями, несмотря на использование приближения типа (4). Использование полиномиального фильтра позволило получить более высокую точность оценивания, однако расчетная характеристика точности не согласована с действительной погрешностью.

Заключение. В работе продемонстрирована принципиальная возможность использования метода особых преобразований для решения задач оценивания при наличии нелинейностей в уравнениях динамики и измерений. Метод позволяет за счет потери части измерительной информации, связанной с особым преобразованием, свести исходную нелинейную постановку задачи к линейной, что обеспечивает формирование расчетной матрицы ковариаций, согласованной с реальными погрешностями оценивания, и не требует гауссовской аппроксимации плотности прогноза и апостериорной плотности.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 18-08-01261а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Hernandez-Gonzalez, M., Basin, M., Stepanov, O.,** Discrete-time state estimation for stochastic polynomial systems over polynomial observations, International Journal of General Systems, 2018, vol. 47, pp. 512–528.
2. **Stepanov, O.A., Vasiliev, V.A., Toropov, A.B., Loparev, A.V., Basin, M.V.,** Efficiency analysis of a filtering algorithm for discrete-time linear stochastic systems with polynomial measurements, Journal of the Franklin Institute, 2019, vol. 356, is. 10, pp. 5573–5591.
3. **Степанов О.А.** Линейный оптимальный алгоритм в нелинейных задачах обработки навигационной информации // Гироскопия и навигация. 2006. № 4 (55). С. 11–20.
4. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Сравнительное исследование линейного и нелинейного оптимальных алгоритмов в задачах обработки навигационной информации // Гироскопия и навигация. 2010. № 3 (70). С. 24–36.
5. **Zhankue Zhao, Rong, X., Vesselin Li, Jilkov, P.,** Best Linear Unbiased Filtering with Nonlinear Measurements for Target Tracking, IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, October 2004, vol. 40, no. 4 pp. 1324–1336.
6. **Лопарев А.В., Тупысев В.А.** Сравнительный анализ эффективности нелинейных фильтров второго порядка и метода особых преобразований // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскпических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор». 2018. С. 163–170.
7. **Тупысев В.А., Лопарев А.В.** Анализ эффективности метода особых преобразований в задачах оценивания при нелинейности в уравнениях динамики // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Первая Международ. науч. конф. (СПб., 14–22 апреля 2020 г.): сб. докл. СПб.: ГУАП, 2020. С. 94–98.

V.A. Tupysev (Concern CSRI Elektropribor, State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg), Yu.A. Litvinenko, A.V. Loparev (Concern CSRI Elektropribor, ITMO University, St. Petersburg)

THE APPLICATION OF SINGULAR TRANSFORMATIONS METHOD WITH REGARD TO NONLINEARITIES IN THE EQUATIONS OF DYNAMICS AND MEASUREMENTS

The possibility of state estimation for dynamic system with nonlinearities in the equations of dynamics and measurements using the Singular Transformations Method is discussed. The features of the proposed approach application are considered. For a methodological example, the equations for the sought-for estimates are concretized and the estimation accuracy analysis is carried out.

К. Д. ВО, А. А. БОБЦОВ, А. А. ПЫРКИН
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

НАБЛЮДАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ ЛИНЕЙНОЙ НЕСТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ АДДИТИВНОМ СИНУСОИДАЛЬНОМ ВОЗМУЩЕНИИ ВЫХОДА

Рассматривается задача синтеза наблюдателя переменных состояния для линейного нестационарного объекта управления в условиях влияния аддитивного возмущающего воздействия, приложенного к выходу. Предполагается, что параметры объекта управления являются известными нестационарными функциями времени, а возмущающее воздействие представляет собой синусоидальный сигнал с неизвестными стационарными амплитудой, частотой и фазой. Наблюдатель переменных состояния строится с использованием подхода, предусматривающего идентификацию постоянных параметров.

Введение. В данной работе рассматривается задача синтеза адаптивного наблюдателя переменных состояния линейного нестационарного объекта. Несмотря на то, что в работе рассматривается линейный объект с известными параметрами, именно нестационарность параметров вызывает дополнительные трудности [1]. Отличительной особенностью данного результата от аналогов (см., например, [2]) является наличие возмущающего воздействия в канале измерения. Именно возмущающее воздействие в существенной мере усложняет использование хорошо зарекомендовавших себя подходов, предусматривающих решение матричного дифференциального уравнения Риккати [2]. В качестве возмущающего воздействия выбирается синусоидальный сигнал с неизвестными амплитудой, частотой и фазой. Такая постановка задачи имеет физический смысл и в общем случае может быть расширена до случая суммы нескольких синусоидальных функций. Ставится задача синтеза наблюдателя переменных состояния, обеспечивающего асимптотическую сходимость ошибки наблюдения к нулю, но не в некоторую область.

Математическая постановка задачи. Рассматривается полностью наблюдаемая одноканальная линейная нестационарная система вида

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + b(t)u(t), \tag{1}$$
$$y(t) = c(t)x(t) + f(t), \tag{2}$$

где $A(t)$, $b(t)$ и $c(t)$ – известные матрица и векторы с нестационарными коэффициентами; $u(t)$ и $y(t)$ – соответственно измеряемые сигнал управления и выходная переменная; $f(t)$ – неизвестное возмущающее воздействие.

Ставится задача синтеза наблюдателя

$$\hat{x}(t) = G(y, u),$$

обеспечивающего выполнение целевого условия

$$\lim_{t\to\infty} |\hat{x}(t) - x(t)| = 0, \tag{3}$$

где $\hat{x}(t)$ – оценка вектора $x(t)$; f_0, ω и φ – неизвестные параметры возмущающего воздействия $f(t) = f_0 \sin(\omega t + \varphi)$.

Синтез адаптивного наблюдателя. Синтез наблюдателя будем осуществлять по аналогии с методами, опубликованными в [3, 4]. Для этого рассмотрим дифференциальное уравнение, аналогичное (1):

$$\dot{z}(t) = A(t)z(t) + b(t)u(t). \tag{4}$$

Сформируем вектор

$$e(t) = z(t) - x(t). \tag{5}$$

Дифференцируя (5) с учетом уравнений (1) и (4), получаем

$$\dot{e}(t) = A(t)e(t). \tag{6}$$

Из выражения (6) следует

$$e(t) = \Phi(t)\theta, \tag{7}$$

где $\theta -$ вектор неизвестных постоянных параметров ($\theta = e(0)$ при единичной матрице Φ(0)); матрица $\Phi(t)$ является решением дифференциального уравнения

$$\dot{\Phi}(t) = A(t)\Phi(t).$$

Из уравнений (5) и (7) легко видеть, что

$$x(t) = z(t) - e(t) = z(t) - \Phi(t)\theta,$$

откуда проблема синтеза наблюдателя переменных состояния $x(t)$ может быть сведена к задаче идентификации вектора неизвестных постоянных параметров θ.

Таким образом, наблюдатель примет вид

$$\hat{x}(t) = G(y,u) = z(t) - e(t) = z(t) - \Phi(t)\hat{\theta},$$

где $\hat{\theta}$ – оценка вектора неизвестных параметров θ.

Для идентификации вектора θ подставим в уравнение (2) выражение $x(t) = z(t) - \Phi(t)\theta$. Тогда

$$y(t) = c(t)(z(t) - \Phi(t)\theta) + f(t). \tag{8}$$

Рассмотрим линейный оператор

$$W(p) = \frac{k^2 p^2}{(p+k)^2},$$

где $p = d/dt$ и коэффициент $k > 0$, сформируем с его помощью на основе (8) вспомогательный сигнал вида

$$q(t) := W(p)[y(t)] - W(p)[c(t)z(t)]$$

и заметим, что

$$q(t) = -W(p)[c(t)\Phi(t)\theta] + W(p)[f(t)] = -W(p)[c(t)\Phi(t)\theta] - \omega^2 \frac{k^2}{(p+k)^2}[f(t)],$$

где в последнем выражении было использовано легко проверяемое соотношение

$$p^2[f(t)] = -\omega^2 f(t).$$

Таким образом, для идентификации вектора θ получаем регрессионную модель вида

$$q(t) = -W(p)[c(t)\Phi(t)]\theta - \omega^2 \frac{k^2}{(p+k)^2}[y(t)] + \omega^2 \frac{k^2}{(p+k)^2}[c(t)(z(t) - \Phi(t)\theta)],$$

где слагаемое $\frac{k^2}{(p+k)^2}[f(t)]$ представлено следующим образом:

$$\frac{k^2}{(p+k)^2}[f(t)] = \frac{k^2}{(p+k)^2}[y(t) - c(t)x(t)] =$$
$$= \frac{k^2}{(p+k)^2}[y(t)] + \frac{k^2}{(p+k)^2}[c(t)(z(t) - \Phi(t)\theta)].$$

Итак, получаем стандартное регрессионное уравнение

$$q(t) = m^T(t)\eta, \tag{9}$$

где известный вектор $m^T = -[\,W(p)[c\,\Phi];\ \frac{k^2}{(p+k)^2}[y - c\,z];\ \frac{k^2}{(p+k)^2}[c\,\Phi]$ и неизвестный вектор постоянных параметров $\eta = col\{\theta; \omega^2; \omega^2\theta\}$.

Для идентификации вектора неизвестных постоянных параметров η могут быть использованы любые известные подходы, в том числе хорошо зарекомендовавший себя метод динамического расширения регрессора и смешивания (DREM), недавно опубликованный в статье [5].

Заключение. В работе предложен метод синтеза наблюдателя переменных состояния линейного нестационарного объекта вида (1), (2). Данный метод предусматривает преобразование исходного линейного нестационарного дифференциального уравнения (1) к статической регрессионной

модели (9), содержащей вектор неизвестных постоянных параметров. Точная идентификация вектора неизвестных параметров (9) обеспечивает выполнение целевого условия (3).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rugh, W.J.,** Linear system theory, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
2. **Rueda-Escobedo, J., Ushirobira, R., Efimov, D., and Moreno, J.,** Gramian-based uniform convergent observer for stable ltv systems with delayed measurements., International Journal of Control, 2019.
3. **Ortega, R., Bobtsov, A., Pyrkin, A., Aranovskiy, S., A** parameter estimation approach to state observation of nonlinear systems, Systems & Control Letters, November 2015, vol. 85, pp. 84–94.
4. **Ortega, R., Bobtsov, A., Dochain, D., Nikolaev, N.,** State observers for reaction systems with improved convergence rates, Journal of Process Control, November 2019, vol. 83, pp. 53–62.
5. **Aranovskiy, S., Bobtsov, A., Ortega, R., Pyrkin, A.,** Performance Enhancement of Parameter Estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing, IEEE Trans. Automat. Control, 2016, vol. 62, no. 7, pp. 3546–3550.

Q.D. Vo, A.A. Bobtsov, A.A. Pyrkin (ITMO university, Saint-Petersburg)

STATE OBSERVER FOR LINEAR TIME-VARYING PLANT AT AN ADDITIVE OUTPUT SINUSOIDAL DISTURBANCE

A problem of state observer design for linear time-varying plant at output additive disturbing action was considered. It is assumed that the parameters of the plant are known time-varying functions and the disturbing effect is a sinusoidal signal with unknown stationary amplitude, frequency and phase. A state observer is constructed using an approach that identifies constant parameters.

А. Е. ПЕЛЕВИН
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ КАТЕРА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Рассмотрена задача идентификации параметров нелинейной динамической модели движения катера, используемой для синтеза закона управления. Предложены методы идентификации, учитывающие ее нелинейный характер. Качество идентификации проверяется на экспериментальных данных, полученных при почти устойчивых режимах движения катера.

Введение. Развитие современных технологий, особенно для безэкипажного катера, обуславливает включение математической модели движения в состав программного обеспечения навигационно-управляющей системы (для неинвариантного оценивания параметров движения и синтеза закона управления). При этом необходимо соответствие модели реальной динамике катера в зависимости от загрузки, скорости движения и окружающей обстановке, а также проверке ее достоверности по результатам измеряемых параметров движения. Это необходимо также для прогнозирования и планирования оперативных траекторий безопасного расхождения с наблюдаемыми подвижными и неподвижными объектами.

В последних зарубежных работах [1, 2] по идентификации параметров модели надводных объектов анализируется влияние шума в измерениях и внешних возмущениях на оценки параметров методом наименьших квадратов (МНК), дрейф гидродинамических коэффициентов объясняется с точки зрения регрессионного анализа. Рассматривается вопрос обращения матриц в МНК и сокращения числа искомых параметров и размерности системы.

В отечественной литературе [3, 4] используется разложение в ряд Фурье правой части дифференциального уравнения для угловой скорости поворота судна с последующим уравниванием коэффициентов и с использованием методов, базирующихся на минимизации ошибки предсказания и применении эталонной модели, в условиях действия возмущений. В [5] для линейной стационарной модели разработан метод совместного решения задачи наблюдения и идентификации в процессе управления движением, в основу метода положены алгоритм точного размещения полюсов и математическая модель наблюдателя Люенбергера.

В настоящей работе на основании анализа натурных данных принимается нелинейная динамическая модель катера с учетом зависимости коэффициентов модели от скорости. Для оценки параметров движения и медленно меняющихся составляющих применяется фильтр Калмана (ФК). Параметры динамической модели, представленной в дискретном виде, оцениваются МНК с использованием оценок ФК. Такая сходящаяся процедура повторяется несколько раз, что позволяет за несколько шагов итераций определения параметров модели с обновлением параметров в ФК получить достаточно точную оценку параметров модели.

Постановка задачи. Идентификация параметров модели катера проводится на основании задаваемых управлений, характеризующих поворот сопел водометных движителей, и выходных переменных, представляющих угловую скорость поворота и линейную скорость катера.

В соответствии с [6] рекомендуется для определения маневренных характеристик судна, на основании которых определяются параметры модели, использовать маневры «циркуляция» и «зигзаг». Тем не менее при проведении натурных экспериментов упор был сделан на определение нелинейных характеристик модели катера, которые были выявлены на предварительных натурных испытаниях.

Для исследования диаграммы управляемости (зависимость установившихся значений угловой скости движения катера ω при различных значениях «углов перекладки» сопел δ водометного движителя) их значения (значения δ) плавно изменялись от 0 до максимального положительного, далее – от максимального положительного до максимального отрицательного и так далее. Испытания проводились практически в безветренную погоду. При этом регистрировались с различными частотами следующие данные управления и движения катера:

- «углы» поворота сопел водометного движителя δ_i;
- обороты левого и правого водометного движителя n_i;

- угловая скорость рыскания ω_i, вырабатываемая ИНС;
- путевая скорость V_i по данным приемника СНС.

Значения различных зафиксированных переменных программным образом синхронизировались по времени с одной частотой фиксации (частотой фиксации «углов» поворота сопел водомета) так, что индекс i у используемых при идентификации переменных изменялся от 1 до N. Таким образом, при идентификации использовались следующие зафиксированные массивы входных $\Delta = \{\delta_i;\ i \in [1,N]\}$ и выходных $W = \{\omega_i;\ V_i;\ i \in [1,N]\}$ данных. Зависимость угловой скорости от угла поворота сопел водомета, зафиксированных в результате натурных испытаний, приведены на рис. 1.

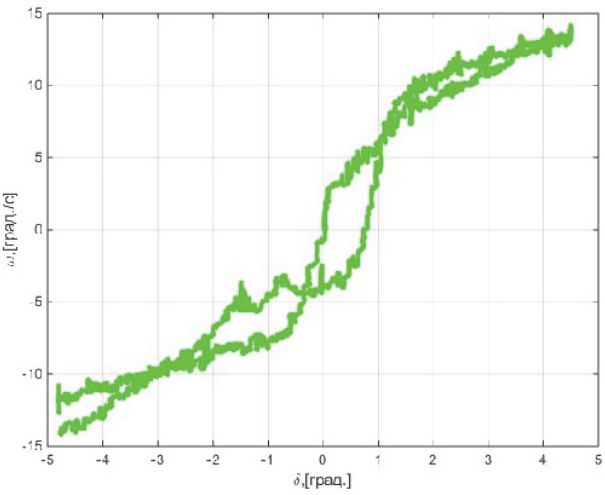


Рис.1. Зависимость угловой скорости от угла поворота сопел водомета

Зависимость значений угловой скорости циркуляции ω от параметра управления δ (угла поворота сопел водомета) представляет диаграмму управляемости катера. Здесь и проявляется нелинейный и несимметричный характер этой зависимости.

В случае устойчивого на курсе объекта любому δ соответствует единственное решение на фазовой плоскости (ω, δ). В связи с этим необходимо учесть указанную особенность в математической модели.

Будем использовать при решении задачи идентификации упрощенную динамическую модель, рекомендуемую 14 Международной конференцией опытовых бассейнов именно для таких целей [7], с уточнением в части зависимости коэффициентов от скорости:

$$\begin{aligned} \dot{\omega} &= -\mu V \omega - \mu_\omega |\omega| \omega + \mu k \delta + m_d; \\ \dot{\delta} &= -\mu_\delta \delta + \mu_\delta u; \\ \dot{m}_d &= -\mu_d m_d + g w. \end{aligned} \tag{1}$$

При этом переменными состояния являются: ω – угловая скорость рыскания, δ – угол поворота сопел водометов (управление соплами одинаково), m_d – медленно меняющееся возмущение (марковский процесс 1-го порядка), u – управление скоростью изменения углов, V – скорость движения катера, μ_i – величины, обратные соответствующим постоянным времени (μ_δ и μ_d считаются известными), k –коэффициент усиления, g и w – уровень интенсивности и белошумный процесс соответственно.

Представим непрерывную модель (1) в дискретном виде:

$$X_{k+1} = A(\alpha) X_k + B u_k + \bar{W} + W_k, \tag{2}$$

где X_k – вектор состояния модели объекта на момент времени k, u_k – вектор управления; A – матрица динамики, зависящая от вектора параметров $\alpha=(\mu, \mu_\omega, \mu k)$ линейно; B – матрица управления; $\bar{W}$ и W_k – векторы, характеризующие низкочастотные (постоянные и медленно меняющиеся) и высокочастотные составляющие внешних возмущений.

Вектор измерений (выходной сигнала) имеет вид

$$Y_k = H X_k + V_k, \tag{3}$$

где V_k – вектор ошибок измерений, а матрица измерений имеет вид

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

На основании модели (2) можно предсказывать значения выходного сигнала. Предсказание выходного сигнала $\tilde{Y}_{k+1}$ на один шаг вперед описывается соотношениями

$$\tilde{X}_{k+1} = \mathrm{A}\hat{X}_k + \mathrm{B}u_k, \tag{4}$$

где $\tilde{X}_k$ – прогнозное значение вектора состояния; $\hat{X}_k$ – оценка вектора состояния для предыдущего шага.

Сделаем следующие замечания. Во-первых, ФК должен рассчитываться с учетом матрицы A, элементы которой необходимо определить, поэтому грубо задаем значения параметров. Фильтр должен обладать свойством робастности к неопределенности параметров модели. Такой фильтр можно построить, исследуя чувствительность к элементам матрицы динамики.

Необходимо по информации, содержащейся в массивах входных $\Delta = \{\delta_i;\ i \in [1,N]\}$ и выходных $W = \{\omega_i;\ V_i;\ i \in [1,N]\}$ данных, определить параметры модели (2), т.е. идентифицировать неизвестные параметры $\alpha=(\mu, \mu_\omega, \mu k)$. Ошибка предсказания на один шаг определяется выражением $\varepsilon_k = Y_k - H\tilde{X}_k$. Параметры модели объекта определяем на основании критерия: минимизация ошибок предсказания

$$\left(\hat{\alpha},\hat{\beta}\right) = \arg\min_{\alpha,\beta} J\left(\alpha,\beta,Z^N\right), \tag{5}$$

где

$$J\left(\alpha,\Delta,W\right) = \frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\varepsilon_k^2 \cdot \tag{6}$$

Задача идентификации сводится к проблеме отыскания его экстремума.

Предлагаемый итерационный алгоритм идентификации

1. Используем оценки вектора состояния по ФК. Суммируя ошибки предсказания, приходим к критерию (6). Минимизируя этот критерий по неизвестным параметрам модели, получим уравнение для определения первого приближения значений этих параметров. Минимизацию проведем на основе МНК.

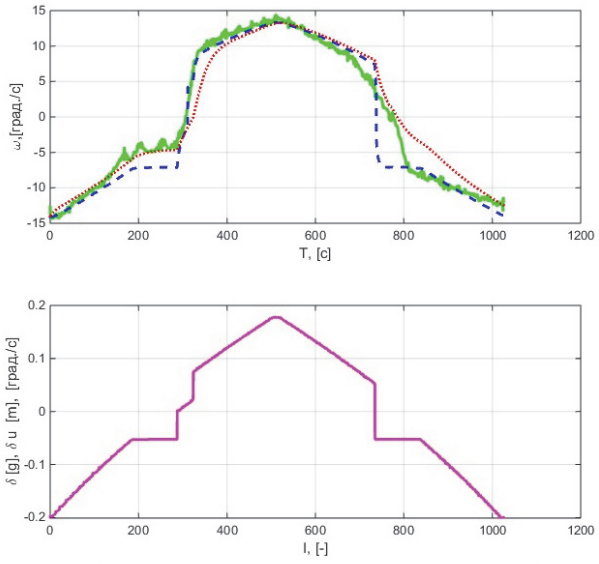


Рис. 2. Угловая скорость (оценка ФК (зеленая сплошная кривая), расчет на основе идентифицированной модели путем интегрирования уравнений (красная пунктирная кривая) и скорость циркуляции (синяя пунктирная кривая) от времени при одном и том же угле поворота сопел водометных движителей.

2. Первое приближение значений параметров используем для построения ФК. Оценки компонент вектора состояния, в том числе возмущающих воздействий, полученные с использованием этого ФК и набора входных и выходных данных, используем для определения приближения параметров модели на следующем шаге итерационной процедуры и т.д. Описанная итерационная процедура определения параметров позволяет с каждым разом проводить оценку вектора состояния с учетом возмущений и уточнение параметров модели.

В результате применения описанной процедуры были определены параметры модели катера. Значения угловой скорости (оценка ФК – зеленая сплошная кривая), расчет на основе идентифицированной модели путем интегрирования системы дифференциальных уравнений (красная пунктирная кривая) и скорости циркуляции (синяя пунктирная кривая) от времени при одном и том же угле поворота сопел водометных движителей приведены на рис. 2. Итерационная процедура сошлась за два шага.

Заключение. Полученные результаты показывают достаточно хорошее совпадение с натурными данными. На основании полученной модели построен закон управления катером, который будет проверяться на следующих этапах испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Luo, W.,** Parameter Identifiability of Ship Manoeuvring Modeling Using System Identification, Mathematical Problems in Engineering, 2016, vol. 11, no.17, pp. 1–10. ID 8909170, http://dx.doi.org/10.1155/2016/8909170.

2. **Xu, H., Hassani, V., Soares, C.G.,** Uncertainty analysis of the hydrodynamic coefficients estimation of a nonlinear manoeuvring model based on planar motion mechanism tests, Ocean Engineering, 2019, vol. 173, pp. 450–459.
3. **Пашенцев С.В.** Параметрическая идентификация маневренных характеристик по результатам натурных испытаний вида «Зигзаг» в нелинейной модели управляемости судна // Вестник МГТУ. 2010. Т. 13. №4/1. С. 730–735.
4. **Жабко Н. А.** Параметрическая идентификация динамических моделей морских судов // Вестник ВГТУ. 2012. №1. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/parametricheskaya-identifikatsiya-dinamicheskih-modeley-morskih-sudov (дата обращения: 14.08.2020).
5. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш. и др.** Идентификация положения равновесной ориентации международной космической станции как задача матричного пополнения с устойчивостью // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. № 1. С. 135–151.
6. **Руководство** по определению маневренных характеристик судов. Российский морской регистр судоходства. 2005. 16 с.
7. **Справочник** по теории корабля. Т. 3. Под ред. Я.И. Войткунского. Л.: Судостроение, 1985. 544 с.

A.E. Pelevin (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

IDENTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE BOAT MODEL BY EXPERIMENTAL DATA

Parameters identification of nonlinear dynamic model of craft motion used to synthesize the control law. Identification methods are proposed that take into account its nonlinear nature. The quality of identification is checked on experimental data obtained under almost stable modes of craft movement.

М. С. ФИНКЕЛЬШТЕЙН
(University of the Free State, Блумфонтейн, ЮАР)

М. Б. РОЗЕНГАУЗ, О. В. ЗАЙЦЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К ОПТИМАЛЬНОМУ ПРОФИЛАКТИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассматриваются модели продления срока службы сложных систем с относительно длинным жизненным циклом. В отличие от традиционного оптимального профилактического обслуживания, которое обычно минимизирует соответствующую интенсивность затрат, конечное число профилактических обслуживаний выполняется для увеличения ожидаемого срока службы (среднее время жизни) оптимальным образом. Выводы проиллюстрированы на детальном примере информационно-навигационной системы.

Введение Профилактическое обслуживание обычно выполняется в течение жизненного цикла восстанавливаемых систем для предотвращения отказов, которые часто могут стоить больше, чем стоимость профилактического обслуживания. Для того чтобы профилактическое обслуживание было эффективным, система должна стареть в некотором подходящем стохастическом смысле, в противном случае, очевидно, нет необходимости в этом действии. Учитывая соответствующие стоимостные характеристики, оптимальный с точки зрения затрат возраст системы для проведения профилактического обслуживания можно найти в классической работе Барлоу и Хантера [1], а также в [3]. Оптимальные решения в этих моделях обычно получаются путем минимизации соответствующих функций средней нормы затрат (затрат на единицу времени) на бесконечном временном интервале. Для методологии профилактического обслуживания, примененной к информационно-навигационным системам, см., например, [4]. Однако на практике возникают ситуации, когда традиционное моделирование профилактического обслуживания не полностью оправдано. Например, из-за эксплуатационных или стоимостных ограничений может существовать только конечное число профилактических ремонтов в течение жизненного цикла. В частности, представляет интерес следующая задача: максимизировать ожидаемый срок службы системы, применяя одно (в общем случае *n*) профилактическое техническое обслуживание в течение всего ее жизненного цикла, т.е мы определяем продление срока службы системы с помощью профилактического обслуживания. Соответствующая задача оптимизации была недавно рассмотрена в [2] в рамках сценария «черного ящика», когда можно наблюдать только отказ системы, а не стохастические процессы деградации, развивающиеся в интересующей нас системе (например, увеличение во времени навигационных ошибок). В настоящей работе, напротив, рассматриваются деградирующие системы с наблюдаемыми процессами деградации.

Постановка задачи. Рассмотрим систему со сроком службы, обозначаемым *T*, которая характеризуется функцией распределения $F(t)$, плотностью $f(t)$, функцией выживания $\bar{F}(t)=1-F(t)$ и интенсивностью отказов $\lambda(t)$. Обозначим среднее время до отказа через m и предположим, что оно конечно, т. е.

$$m=\int_0^\infty \bar{F}(x)dx=\int_0^\infty \exp\left\{-\int_0^x \lambda(u)du\right\}dx<\infty. \qquad (1)$$

Обозначим ожидаемый срок службы системы с одним плановым профилактическим обслуживанием $m_1(a)$, проводимым через время a. Тогда легко увидеть, что

$$m_1(a)==\int_0^a \bar{\mathrm{F}}(x)dx+\bar{F}(a)m \qquad (2)$$

и существует максимум для $m_1(a),0<a<\infty$, такой что

$$m_1(a^*)=\max_{a\geq 0} m_1(a). \qquad (3)$$

Дальнейший анализ $m_1(a)$ показывает, что эта функция монотонно возрастает к $m_1(a^*)$, а затем монотонно (асимптотически) уменьшается до *m*. При этом аналогичным образом можно найти оптимальные времена для *n* последовательных профилактических обслуживаний [2].

Оптимальная задача (3) и ее обобщения рассматривались для случая, когда единственной доступной оперативной информацией является, работоспособна система или нет (сценарий «черного ящика»). Однако во многих случаях, например в случае информационно-навигационных систем, учет дополнительной информации о параметрах деградации (например, увеличение со временем навигационных ошибок или некоторых жизненно важных диагностических параметров) может увеличить ожидаемый срок службы в (2)–(3).

Полученные результаты. Рассмотрим систему, которая выходит из строя, когда ее деградация, описываемая стохастическим процессом, достигает порога *w*. Предположим, что внутренний процесс деградации $\{W_t, t \ge 0\}, W_0 = 0$ наблюдаемый и контролируемый при проверках, имеет независимые приращения и характеризуется монотонно возрастающими реализациями. Кроме того, пусть этот процесс будет для простоты однородным. Соответствующими примерами могут быть пуассоновский процесс, гамма-процесс и обратный гауссовский процесс. Тогда соответствующий срок службы *T* описывается следующей функцией живучести:

$$P(T > t) \equiv \bar{F}(t, w) = P(W_t \le w). \tag{4}$$

Пусть наблюдаемая деградация во время проверки $x > 0$ будет $\tilde{w}$. Обозначим соответствующий остаточный срок службы через $\bar{F}_{\tilde{w}}(t) = F(t, w - \tilde{w})$, интенсивность отказов – через $\lambda_{\tilde{w}}(t)$ и ожидаемый срок службы – через $m(w)$ (см. (1) для этого случая).

Когда процесс полностью контролируется и порог *w* детерминирован, следует выполнить профилактическое обслуживание просто до достижения этого порога. Таким образом, максимальный ожидаемый срок службы системы с одним профилактическим обслуживанием составляет $2m(w)$. Это, очевидно, идеалистическая ситуация, поскольку для многих систем непрерывный контроль нереален и используется дискретный контроль при проверках.

Предположим теперь, что в рамках сценария «черного ящика» мы получили оптимальный вариант a^* из (2). Отметим величину деградации процесса работающей системы во время a^* (если она вышла из строя раньше, то мы, очевидно, ничего не делаем). Пусть это значение будет $\tilde{w}$. Тогда, вместо того чтобы проводить профилактическое обслуживание во время a^*, целесообразно отложить его, если это приведет к увеличению ожидаемого срока службы. Таким образом, требуется максимизировать средний оставшийся срок службы (после $t = a^*$) с возможностью будущего профилактического обслуживания в будущее время $a^* + a_1$, где a_1 – время, истекшее с момента a^*. Тогда (1) должно быть модифицировано в этой новой постановке на

$$m_1(a_1, w, \tilde{w}) = \int_0^{a_1} \bar{F}_{\tilde{w}}(x)dx + \bar{F}_{\tilde{w}}(a_1)m(w). \tag{5}$$

Имеет место следующий результат.

Теорема 1.

А. Пусть

$$\lambda_{\tilde{w}}(0)m(w) \ge 1 \tag{6}$$

Тогда профилактическое обслуживание должно быть выполнено немедленно при $t = a^*$.

Б. С другой стороны, если

$$\lambda_{\tilde{w}}(0)m(w) < 1, \tag{7}$$

оптимальное $a_1^* > 0$, максимизирующее $m_1(a_1, w, \tilde{w})$ существует, и поэтому профилактическое обслуживание должно быть отложено до времени $a_1^* + a^*$.

Это рассуждение имеет смысл, поскольку, когда мы наблюдаем при $t = a^*$ относительно небольшие значения износа, оставшийся ресурс системы все еще может внести свой вклад в

средний срок службы системы с одним профилактическим обслуживанием. С другой стороны, когда эти значения относительно близки к порогу отказа *w*, профилактическое обслуживание должно быть выполнено немедленно. Во время $a_1^* + a^*$ мы снова наблюдаем ухудшение состояния и, в соответствии с теоремой 1, решаем, проводить ли профилактическое обслуживание в это время или продолжать процедуру и т.д. Поскольку процесс деградации увеличивается, на практике целесообразно прекратить эту процедуру (когда выполняется (7)) после первой или второй итерации.

Заключение. Описанные результаты могут быть обобщены на случаи с более чем одним возможным профилактическим обслуживанием и неоднородными процессами износа.

Таким образом, в настоящем докладе предложен новый метод увеличения ожидаемого срока службы системы путем переноса планового профилактического обслуживания на более позднее время. Это может иметь заметный эффект на практике. Этот метод может быть применен к различным системам с наблюдаемой деградацией, в частности к информационно-навигационным системам. Подробные примеры с соответствующим анализом будут рассмотрены в презентации.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Barlow, R.E, Hunter, L.** Оптимальная политика профилактического обслуживания // Исследование операций. 1960. №8. С. 90–100.
2. **Cha, J.H., Finkelstein, M.** Об оптимальном продлении срока службы деградирующих систем // Журнал риска и надежности. 2020. №234. С. 487–495.
3. **Финкельштейн М., Ча Ин.** Стохастическое моделирование надежности (Шоки, выгорание и гетерогенные популяции). Лондон: Спрингер, 2013.
4. **Финкельштейн М., Розенгауз М.** О новых оптимальных стратегиях профилактического обслуживания навигационно-информационных систем со штрафами // Гироскопия и навигация. 2015. №6. С. 73–77.

M.S. Finkelstein (University of the Free State, Bloemfontein, Republic of South Africa; ITMO University, St. Petersburg), M.B. Rozengauz, O.V. Zajtsev (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg)

ON SOME APPROACHES TO OPTIMAL PREVENTIVE MAINTENANCE OF NAVIGATION SYSTEMS

We consider lifetime extension models for complex systems with relatively long lifecycles. In contrast to the traditional optimal preventive maintenance that usually minimizes the corresponding long run cost rate, the finite number of preventive maintenances are executed to increase the expected lifetime in an optimal way. We illustrate our findings using a detailed example of an information-navigation system.

Т. Н. СИРАЯ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

АТТЕСТАЦИЯ АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КАК ОЦЕНИВАНИЕ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ

Описана процедура аттестации алгоритмов и программ обработки данных. Проводится анализ ее основных элементов, включая показатели алгоритмов и типовые модели данных. Рассматриваются варианты ее реализации: исследовательская аттестация (при разработке алгоритма) и метрологическая (при аттестации методики измерений).

Аттестация программы обработки данных рассматривается как реализация общих требований по оценке качества программ с учетом результатов аттестации алгоритма.

Введение. Разнообразие современных измерительных задач и используемых алгоритмов обработки данных обусловливает необходимость оценивания качества алгоритмов обработки данных. Определение показателей качества алгоритмов на выделенных моделях данных реализуется в метрологии как процедура аттестации алгоритмов.

В настоящем докладе излагается исходная концепция аттестации алгоритмов, предложенная проф. И. Б. Челпановым [1], и общая схема аттестации алгоритмов, развитая в работах ВНИИ метрологии им. Д.И. Менделеева с его участием [2–4]. Приводятся требования к показателям качества алгоритмов и типовым моделям данных при выполнении аттестации.

Аттестация алгоритмов выполняется для различных групп задач и в разном объеме, поэтому выделены основные варианты процедуры аттестации, включая исследования алгоритмов при их разработке и анализ алгоритмов при аттестации методик измерений [4, 5].

Поскольку обработка данных при измерениях обычно реализуется с помощью программ, рассматривается соотношение аттестации алгоритмов и программ обработки данных. Выделены особенности аттестации программного обеспечения средств измерений [6, 7].

В докладе описано современное состояние проблем аттестации алгоритмов и программ обработки данных в метрологии, нормативное обеспечение в этой области, а также намечены актуальные задачи исследований качества алгоритмов.

Процедура аттестации алгоритмов обработки данных и варианты ее реализации

Концепция аттестации алгоритмов обработки данных. Многообразие современных измерительных задач и разнообразие используемых алгоритмов обработки данных нередко вызывают затруднения при выборе алгоритма для конкретной задачи, а также при оценивании погрешностей получаемых результатов. Поскольку сведения о свойствах данных обычно ограничены, на практике важна не оптимальность алгоритма (в рамках узкой модели), а его гарантированная высокая эффективность для широкого круга данных.

Поэтому для алгоритмов следует определять показатели качества, дающие объективное представление об их свойствах и области применения. Исследование алгоритмов на выделенных моделях данных с целью определения показателей качества называется в области метрологии аттестацией алгоритмов (по аналогии с аттестацией методик измерений) [1–4].

Важнейшей отличительной особенностью аттестации алгоритмов является многовариантность показателей качества алгоритмов и моделей исходных данных. При аттестации не выделяется наилучший алгоритм, оптимальный по всем показателям; по различным показателям или моделям предпочтительными оказываются разные алгоритмы.

Таким образом, идеология аттестации алгоритмов существенно иная, чем принципы оптимизации, при которой выявляется наилучший алгоритм для точно определенных показателя и модели. В этом отношении аттестация алгоритмов тесно связана с принципами прикладной статистики и анализа данных [8, 9]. С другой стороны, по целям и прикладной направленности аттестация алгоритмов подобна другим видам аттестации в метрологии, прежде всего аттестации методик измерений [10].

Общая схема аттестации алгоритмов обработки данных. Аттестация алгоритмов обработки данных как оценивание их основных показателей выполняется применительно к одно-

родной группе алгоритмов $A = \{ a \}$, предназначенных для решения одной задачи обработки данных. Для выделенной группы A выполняют следующее:

а) выбирают $П_1, ..., П_n$ – показатели алгоритмов, значимые для их сопоставления в группе A и оценивания погрешностей результатов;

б) выбирают $u_1, ..., u_m$ – типовые модели исходных данных на входе алгоритма, характерные для данной измерительной задачи;

в) вычисляют или оценивают значения показателей алгоритма на типовых моделях данных:

$$\pi (i, j) = П_i (a , u_j), \qquad i=1...n, \quad j=1...m. \tag{1}$$

Эти значения можно использовать при выборе алгоритма обработки для методики измерений, а также при оценивании погрешностей получаемых результатов измерений;

г) представляют результаты аттестации в виде таблицы или матрицы

$$\boldsymbol{П(a)} = || \pi (i, j) ||. \tag{2}$$

Эта таблица содержит значения показателей алгоритма на типовых моделях данных и с необходимыми пояснениями включается в Свидетельство об аттестации алгоритма.

Основные показатели качества алгоритмов. Показатели качества для заданного класса алгоритмов A выбирают как нормы или функционалы, наиболее важные для сопоставления алгоритмов в рамках класса A и оценивания погрешностей результатов обработки. Они включают три основные подгруппы:

- показатели точности алгоритмов, предназначенные для оценивания составляющих погрешностей результатов измерений (при соответствии данных принятым моделям). К ним относятся традиционные показатели: среднее квадратическое отклонение случайной погрешности; границы систематической, случайной и суммарной погрешностей. К ним добавляют и другие полезные показатели, например среднюю квадратическую погрешность (СКП);
- показатели устойчивости (надежности), определяющие область работоспособности алгоритмов, включают границы области данных, в которых алгоритм работает без сбоев (включая допустимый объем искажений данных), а также функции влияния, задающие границы дополнительных погрешностей, обусловленных отклонениями от типовых моделей;
- показатели сложности, отражающие вычислительную сложность алгоритма, включают арифметическую сложность (число арифметических операций при реализации алгоритма), а также некоторые характеристики его трудоемкости.

Указанные группы показателей устанавливают для конкретных групп алгоритмов с учетом специфики задач обработки данных [2, 4, 5, 11].

Основные типовые модели исходных данных для аттестации алгоритмов. Набор типовых моделей исходных данных для аттестации алгоритмов следует формировать так, чтобы не только наиболее полно выявить поведение алгоритма в «средних», типичных ситуациях, но и контролировать его возможности в крайних (критических) случаях. Кроме того, выбранные модели должны быть удобны для использования, в том числе иметь компактное представление (простые аналитические выражения) или допускать несложное моделирование.

В число типовых моделей должны включаться [2, 4, 5, 11]:

- простые детерминированные модели (постоянные, линейные, полиномы, гармонические);
- классические вероятностные модели – выборки с заданными распределениями (прежде всего гауссовскими);
- расширенные вероятностные модели (смеси основного и мешающего распределений).

Кроме того, при обработке вводятся стохастические модели в виде случайных процессов, прежде всего стационарных, с определенными корреляционными функциями. В ряде задач следует также вводить нестационарные модели, например винеровские процессы. Представляется перспективным использование случайных процессов со стационарными приращениями.

Способы оценивания значений показателей алгоритма на типовых моделях. Значения показателей можно вычислять или оценивать различными способами, в том числе:

- аналитическими (показатели получают в виде явных функций от параметров моделей);
- приближенными численными методами (получают приближенные зависимости);
- статистическим оцениванием показателей по экспериментальным данным;
- статистическим моделированием массивов данных и оцениванием по ним показателей.

Указанные подходы полезно применять совместно – например, асимптотическое поведение показателей изучать аналитическими методами, а при небольших объемах данных использовать методы моделирования. В зависимости от способа оценивания получаются и способы представления показателей $\pi(i, j)$ – в виде функций или графиков либо в виде таблиц.

Варианты реализации процедуры аттестации алгоритмов. Приведенная схема аттестации регламентирована Рекомендацией МИ 2174 [5] и применима к широкому кругу алгоритмов обработки данных и их программных реализаций. Однако при ее реализации, в зависимости от целей аттестации и применения алгоритмов, выявляются особенности при выборе показателей алгоритмов и типовых моделей данных. Поэтому выделяются две разновидности – общая и метрологическая аттестация [2, 4, 5].

Общая (исследовательская) аттестация выполняется при разработке нового алгоритма с целью наиболее полно исследовать его свойства (для широкого круга задач). При этом используют наиболее широкий набор показателей алгоритма. Типовые модели данных также многочисленны и разнообразны, однако модели в этом случае выбирают довольно простые. Результаты общей аттестации носят справочный характер и далее могут использоваться при выборе алгоритмов обработки для конкретных измерительных задач.

Метрологическая аттестация алгоритма имеет более конкретную цель и проводится при аттестации методики измерений или испытаниях средства измерений. Число показателей алгоритма и типовых моделей данных в этом случае ограничено, но они выбираются с учетом конкретной задачи (модели данных обычно бывают более сложными, чем в первом случае). Эта процедура строго регламентирована нормативными документами, а ее результаты используются при подтверждении соответствия изделий установленным требованиям.

Современное состояние вопросов аттестации алгоритмов. В настоящее время аттестация алгоритмов, по существу, выполняется достаточно широко и входит как составная часть в различные виды метрологической деятельности.

В частности, выполняется аттестация алгоритмов для различных групп измерительных задач. Например, выполнена аттестация алгоритмов обработки при прямых измерениях [12–15], а также широкой группы алгоритмов нахождения экстремумов. Определена схема аттестации алгоритмов построения функциональных зависимостей в измерительных задачах, и выполнена общая аттестация ряда регрессионных и конфлюентных алгоритмов [14–17].

Однако в целом общая аттестация алгоритмов пока выполняется недостаточно полно и ее результаты носят справочный характер. По-видимому, ее целесообразно более четко регламентировать на отраслевом уровне, с учетом потребностей отраслей в применении определенных групп алгоритмов обработки. В частности, это актуально для метрологического обеспечения навигационного приборостроения, что находит отражение в отраслевых документах [18].

С другой стороны, работы по метрологической аттестации алгоритмов выполняются достаточно широко, при аттестации методик измерений и испытаниях средств измерений (хотя и не выделяются как самостоятельные виды работ). Для отдельных групп задач имеются документы,

содержащие характеристики алгоритмов обработки: например, показатели алгоритмов построения градуировочных характеристик средств измерений приведены в [17].

Различия двух отмеченных видов аттестации можно пояснить на примере алгоритмов обработки данных при прямых измерениях с многократными наблюдениями. В метрологии долгое время действовал ГОСТ 8.207-76, который представляет собой образец метрологической аттестации традиционного алгоритма обработки – среднего арифметического выборки. Его особенностью является то, что ГОСТ регламентировал оценивание не только случайных, но и систематических составляющих погрешностей, а также суммирование этих составляющих.

С другой стороны, в прикладной статистике был организован масштабный «Принстонский проект», в котором около 50 оценок математического ожидания исследовались при различных распределениях данных [9]. Это пример исследовательской аттестации, выполненной для большой группы алгоритмов обработки данных при прямых измерениях. Полученные результаты позволяют сопоставлять алгоритмы при различных условиях и намечать области их рационального использования.

В настоящее время на основе имеющегося опыта аттестации алгоритмов целесообразно конкретизировать процедуры аттестации используемых алгоритмов для основных предметных областей обработки данных. В частности, для области навигационного приборостроения такого рода конкретизация намечена в отраслевых документах, прежде всего в [18].

Следует отметить, что работы по аттестации алгоритмов значимы также для развития теоретической метрологии и теории погрешностей, поскольку это важная составная часть оценивания погрешностей измерений и качества измерительной процедуры в целом [14, 15].

Соотношение процедур аттестации алгоритмов и программ обработки данных

Особенности аттестации программ обработки данных. Влияние программ обработки данных на результаты и, соответственно, необходимость оценивать качество программ общепризнаны. В целом, качество программ регламентируется рядом общих документов, например [19, 20], и широко обсуждается в литературе [21, 22]. В них достаточно подробно отражены специфические системно-программные показатели качества, однако функциональные показатели (назначения) обычно не раскрываются, поскольку они связаны со спецификой области применения программ. Поэтому их непосредственное применение к измерительным задачам требует решения ряда дополнительно задач [6, 7].

При метрологической аттестации программа обработки данных (сигналов) рассматривается как преобразователь, аналогичный компонентам средств измерений. Программа реализует определенный алгоритм обработки, который можно рассматривать в качестве номинальной функции преобразования. Поэтому показатели алгоритма являются основой при определении показателей программ [5, 6]. Однако к ним добавляется ряд показателей, обусловленных особенностями программной реализации алгоритма.

Применительно к программам сохраняются основные группы показателей, выделенные для алгоритмов: показатели точности, надежности и сложности. Наборы основных показателей точности и надежности программ аналогичны показателям алгоритмов. Однако оценивание показателей заметно усложняется из-за появления новых составляющих погрешностей, связанных с переходом от алгоритма к программе. С другой стороны, группа показателей сложности существенно расширяется: от арифметической и структурной сложности алгоритмов переходят к вычислительной, временной, емкостной и структурно-программной сложности программ [6].

Существенно изменяется также соотношение указанных выше групп показателей. Для алгоритмов обычно наиболее значимы показатели точности, а показатели сложности менее существенны. Для программ показатели сложности нередко выходят на первый план и носят характер существенных ограничений при выборе программных реализаций алгоритмов. В то же время исследование таких показателей программ представлено в общих работах [19–22].

Таким образом, при выполнении аттестации программ обработки данных необходимо, с одной стороны, опираться на результаты аттестации исходного алгоритма, и с другой – использовать общие методы оценивания структурно-программных показателей. Отметим, что такие процедуры также следует конкретизировать для основных предметных областей, в частности для навигационного приборостроения это намечено в отраслевых документах [18, 23].

Заключение

1. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных реализуется как определение показателей качества алгоритмов и программ на выделенных моделях данных.

2. При проведении аттестации основные показатели точности алгоритмов и программ аналогичны традиционным показателям составляющих погрешностей измерений. Кроме них необходимо определять показатели надежности и сложности.

3. В зависимости от целей и задач обработки выделяют два вида аттестации – общую и метрологическую. Общая аттестация как наиболее полное исследование свойств алгоритма для широкого круга задач выполняется при его разработке. Метрологическая аттестация – изучение алгоритма применительно к заданной методике измерений (при аттестации методики).

4. При выполнении аттестации программ обработки данных целесообразно оценивать функциональные показатели на основе результатов аттестации исходного алгоритма обработки. При этом методы оценивания структурно-программных показателей регламентированы в общих стандартах на качество программного обеспечения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Челпанов И.Б.** Задачи выбора и аттестации алгоритмов обработки сигналов средств измерений // Метрология. 1981. № 6.
2. **Тарбеев Ю.В., Челпанов И.Б., Сирая Т.Н.** Аттестация алгоритмов обработки данных при измерениях // Измерения, контроль, автоматизация. 1991. № 3.
3. **Chelpanov, I.B., Ramasanova, A.G., Siraya, T.N.,** Certification of data processing algorithms, Mera-90, Abstr., vol. IV, Moscow, 1990.
4. **Chelpanov, I.B., Siraya, T.N.,** Certification of data processing algorithms in measurements: Principles and results, Methodological aspects of data processing and information systems in metrology, ed. D.Richter, V.A.Granovsky, PTB–Bericht IT-7, 1999.
5. **МИ 2174-91** ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения.
6. **Chelpanov, I.B., Granovsky, V.A., Siraya, T.N.,** Certification of data processing algorithms in measurement: Bridge between algorithms and programs, P. Ciarlini, M.G. Cox, F. Pavese, and D. Richter, editors, Advanced Mathematical Tools in Metrology, IV, 2000, Singapore, World Scientific, pp. 32–35.
7. **МИ 2517-99** ГСИ. Метрологическая аттестация программного обеспечения средств измерений параметров физических объектов и полей с использованием компьютерных программ генерации цифровых тестовых сигналов.
8. **Мостеллер Ф., Тьюки Дж.** Анализ данных и регрессия. М.: Финансы и статистика, 1984. Вып. 1, 2.
9. **Устойчивые статистические методы оценки данных** / под ред. Л.Р.Лонера, Г.Н.Уилкинсона. М.: Машиностроение, 1984.
10. **ГОСТ Р 8.563–2009.** ГСИ. Методики (методы) измерений.
11. **Chelpanov, I.B., Siraya, T.N.,** Problems of certification of navigation information processing algorithms, 5th St Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, CSPI “Electropribor”, 1998.
12. **МИ 1317-2004 ГСИ.** Результаты и характеристики погрешности измерений. Форма представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.
13. **ГОСТ Р 8.736-2011** ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения
14. **Грановский В. А., Сирая Т. Н**. Методы обработки данных при измерениях. Л.: Энергоатомиздат, 1990.
15. **Лячнев В. В., Сирая Т. Н., Довбета Л. И.** Метрологические основы теории измерительных процедур: Научное издание – учебное пособие / под ред. В.В. Лячнева. С.-Петербург: Элмор, 2011. 416 с.
16. **Siraya, T.N.,** Certification of algorithms for constructing calibration curves of measuring instruments, *Advances in Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing X* (vol.10), Series on Advances in Mathematics for Applied Sciences, vol. 86, World Scientific, Singapore, 2015, pp 367–374.
17. **МИ 2175-91** ГСИ. Градуировочные характеристики средств измерений. Методы построения, оценивание погрешностей.
18. **ОСТ 5Р.8924–2014.** Стандарт судостроения. Метрологическое обеспечение навигационного приборостроения. Метрологическая экспертиза алгоритмов и программ обработки данных при измерениях.
19. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 9126-93 ИТ.** Оценка программной продукции. Характеристики качества и руководство по их применению.
20. **ГОСТ Р ИСО/МЭК 12207-99 ИТ.** Процессы жизненного цикла программных средств.
21. **Липаев В. В.** Обеспечение качества программных средств. Методы и стандарты. М.: СИНТЕГ, 2001.
22. **Воробьев В.И., Копыльцов А.В., Пальчун Б.П., Юсупов Р.М.** Методы и модели оценивания качества программного обеспечения. С.-Петербург: СПИИРАН, 1992.
23. **ОСТ 5Р.8925–2014.** Стандарт судостроения. Метрологическое обеспечение навигационного приборостроения. Метрологическая аттестация программ обработки данных при измерениях.

T.N. Siraya (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia)

CERTIFICATION OF DATA PROCESSING ALGORITHMS AND PROGRAMS AS ESTIMATION OF DATA PROCESSING QUALITY IN MEASUREMENTS

While using complex data (signal) processing algorithms in measurements, the questions arise on the rational selection of algorithm and software as well as on the estimation of the result errors. For solving these problems the procedure of certification for data processing algorithms was developed in metrology. The certification of data processing algorithm is considered as the procedure of algorithm characteristics estimation for selected typical models of data.

In the paper a general scheme of data processing algorithm certification is presented, including choice of the quality characteristics of algorithm, and typical models of the initial data, and also the ways of estimating the values of characteristics.

Two kinds of the algorithm certification are considered, such as general and metrological ones. The general certification should be carried out while algorithm design and the metrological certification is a part of the measurement procedure certification.

The certification of the program is considered as a procedure of its quality evaluation, taking into account the functional characteristics of data processing algorithm.

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЙ ПОГРЕШНОСТИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО АСТРОУНИВЕРСАЛА В ЗАДАЧЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТА НАЗЕМНОГО ОРИЕНТИРА

Анализируется влияние случайных и систематических составляющих инструментальной погрешности автоматизированного астроуниверсала на точность определения астрономического азимута наземного ориентира. Полученные результаты могут быть использованы при разработке математической модели, а также при формировании требований к взаимной ориентации приборных осей при проектировании прибора.

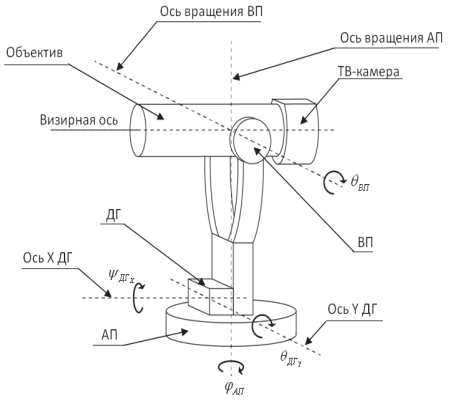


Рис. 1. Конструкция ААУ и его основные оси

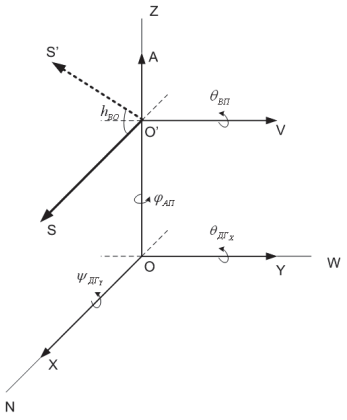


Рис. 2. Приборные оси ААУ в горизонтальной системе координат

Введение. В АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разработан астрономический стационарный комплекс определения азимута, который обеспечивает высокоточное и оперативное определение астрономического азимута по наблюдениям звезд [1]. Этот комплекс успешно эксплуатируется, однако его возможности ограничены использованием в специально оборудованном помещении на массивном развязанном фундаменте. Разрабатываемый автоматизированный астроуниверсал (ААУ), предназначенный для определения азимута в полевых условиях, строится по схеме классического астрономического теодолита и состоит из трех основных частей (рис. 1):

ААУ состоит из трех основных частей:

- визирного устройства (ВУ), состоящего из автоколлимационного объектива и ТВ-камеры;
- вертикального привода (ВП);
- азимутального привода (АП) с установленным на нем двухосным датчиком горизонта (ДГ).

АП и ВП обеспечивают повороты визирной оси в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Определение астрономических координат места установки с использованием ААУ аналогично работе автоматизированного зенитного телескопа [2] и в данной работе не рассматривается. Для решения задачи определения астрономического азимута наземного ориентира необходимо проанализировать и исследовать влияние инструментальных погрешностей ААУ.

Постановка задачи. На рис. 2 показана взаимная ориентация приборных осей ААУ и их положение в горизонтальной системе координат ONWZ. В «идеальном» случае (при отсутствии инструментальных погрешностей) оси чувствительности ДГ (векторы OX и OY) лежат в плоскости горизонта NOW. Вектор OA соответствует оси вращения АП, а вектор O'V – оси вращения ВП. Вектор O'S соответствует положению визирной оси ВУ, параллельной плоскости горизонта, при этом вектор O'S сонаправлен с вектором OX, а вектор O'V сонаправлен с вектором OY. Вектор O'S' соответствует положению визирной оси при наблюдении звезд на высоте h_{BO}, при этом по астрономическим наблюдениям определяется пространственная ориентация визирной оси в горизонтальной системе координат ONWZ (астрономический азимут визирной оси A_{BO}, высота визирной оси h_{BO}).

Датчики угла АП и ВП показывают поворот визирной оси O'S относительно их нулевых положений ($\varphi_{АП}$ и $\theta_{ВП}$ соответственно). Наклон ААУ относительно плоскости горизонта контролируется ДГ в продольном и поперечном направлениях ($\theta_{ДГ_X}$ и $\psi_{ДГ_Y}$ соответственно).

На рис. 3 показано расположение приборных осей при наличии инструментальных погрешностей, обусловленных технологическими погрешностями изготовления ААУ. Углы $\Delta\varphi_{SX}$, $\Delta\varphi_{XY}$, $\Delta\theta_{XA}$, $\Delta\psi_{YA}$, $\Delta\varphi_{SV}$, $\Delta\psi_{VA}$ описывают систематические составляющие инструментальной погрешности ААУ, возникающие при изготовлении и сборке прибора.

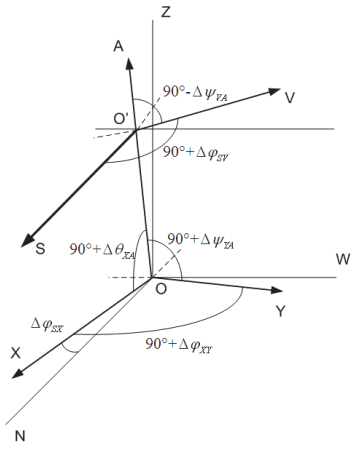


Рис. 3. Приборные оси ААУ при наличии инструментальных погрешностей

Кроме систематических составляющих инструментальная погрешность ААУ также содержит случайные составляющие, которые могут быть выражены средними квадратическими отклонениями (СКО) погрешности ДГ $\sigma_{ДГ_X}, \sigma_{ДГ_Y}$, СКО погрешности датчика угла ВП $\sigma_{ВП}$ и СКО погрешности датчика угла АП $\sigma_{АП}$.

Необходимо исследовать влияние каждой из описанных выше погрешностей на точность определения астрономического азимута наземного ориентира.

Алгоритм определения азимута наземного ориентира. Алгоритм определения астрономического азимута наземного ориентира условно можно разделить на три основные операции:

а) определение астрономического азимута визирной оси в момент наблюдения звезд в меридиане на фиксированной высоте $h_{ТРЕБ}$ по алгоритму, представленному в работе [3];

б) определение горизонтального угла γ между направлением визирной оси в момент наблюдения звезд в меридиане и направлением на наземный ориентир;

в) перекладка визирной оси, заключающаяся в последовательных поворотах визирной оси сначала вокруг оси вращения АП, а затем вокруг оси вращения ВП, так чтобы визирная ось была направлена в ту же область пространства, что и до поворотов.

Операции а) и б) производятся до и после перекладки визирной оси, в результате чего определяются азимуты визирной оси A^I_{BO} и A^{II}_{BO}, а также горизонтальные углы γ^I и γ^{II}. Здесь индексы «*I*» соответствуют положению визирной оси до перекладки, а «*II*» – после перекладки.

Астрономический азимут наземного ориентира определяется как

$$A_{HO} = \frac{A^I_{HO} + A^{II}_{HO}}{2}, \qquad (1)$$

где $A^I_{HO} = A^I_{BO} + \gamma^I$, $A^{II}_{HO} = A^{II}_{BO} + \gamma^{II}$ – азимут наземного ориентира до и после перекладки визирной оси.

Повороты визирной оси в горизонтальной системе координат. Для исследования влияния составляющих инструментальной погрешности на определение астрономического азимута наземного ориентира необходимо математически описать движение визирной оси в горизонтальной системе координат NWZ при поворотах вокруг осей вращения ВП и АП.

Поворот визирной оси в горизонтальной системе координат ONWZ вокруг оси вращения АП на угол μ_A описывается следующей матрицей:

$$C_{\mu A}(\mu_A) = \begin{bmatrix} \cos(\mu_A) + B_A x_A^2 & B_A x_A y_A - \sin(\mu_A) z_A & B_A x_A z_A + \sin(\mu_A) y_A \\ B_A y_A x_A + \sin(\mu_A) z_A & \cos(\mu_A) + B_A y_A^2 & B_A y_A z_A - \sin(\mu_A) x_A \\ B_A z_A x_A - \sin(\mu_A) y_A & B_A z_A y_A + \sin(\mu_A) x_A & \cos(\mu_A) + B_A z_A^2 \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

где $B_A = 1 - \cos(\mu_A)$;

x_A, y_A, z_A – декартовые координаты вектора OA (оси вращения АП) в системе координат NWZ.

Координаты x_A, y_A, z_A рассчитываются следующим образом:

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \end{bmatrix} = C_{\Delta\theta_{XA}} \cdot C_{\theta_{ДГ_Y}} \cdot C_{\Delta\psi_{YA}} \cdot C_{\psi_{ДГ_X}} \cdot \begin{bmatrix} x_{A0} \\ y_{A0} \\ z_{A0} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $x_{A0} = 0,\ y_{A0} = 0,\ z_{A0} = 1$ – координаты вектора OA в «идеальном» положении;

$C_{\Delta\theta_{XA}} = \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta_{XA}) & 0 & -\sin(\Delta\theta_{XA}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\Delta\theta_{XA}) & 0 & \cos(\Delta\theta_{XA}) \end{bmatrix}$, $C_{\theta_{ДГ_X}} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{ДГ_X} \cdot m_X) & 0 & -\sin(\theta_{ДГ_X}) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta_{ДГ_X} \cdot m_X) & 0 & \cos(\theta_{ДГ_X}) \end{bmatrix}$ – матрицы поворота вокруг оси OW на углы $\Delta\theta_{XA}$ и $\theta_{ДГ_X}$ соответственно;

$C_{\Delta\psi_{YA}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\Delta\psi_{YA}) & -\sin(\Delta\psi_{YA}) \\ 0 & \sin(\Delta\psi_{YA}) & \cos(\Delta\psi_{YA}) \end{bmatrix}$, $C_{\psi_{ДГ_Y}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\psi_{ДГ_Y}) & -\sin(\psi_{ДГ_Y}) \\ 0 & \sin(\psi_{ДГ_Y}) & \cos(\psi_{ДГ_Y}) \end{bmatrix}$ – матрицы поворота вокруг оси ON на углы $\Delta\psi_{YA}$ и $\psi_{ДГ_Y}$ соответственно.

Аналогичным образом описывается поворот визирной оси вокруг оси вращения ВП на угол μ_V для вектора O'V, который в идеальном положении имеет координаты $x_{V0} = 0,\ y_{V0} = 1,\ z_{V0} = 0$.

Условия моделирования. Систематические составляющие инструментальной погрешности $\Delta\varphi_{SX}$, $\Delta\varphi_{XY}$, $\Delta\theta_{XA}$, $\Delta\psi_{YA}$, $\Delta\varphi_{SV}$, $\Delta\psi_{VA}$ задавались в диапазоне углов от –60" до +60". Случайные составляющие имитировались в виде процессов с нормальным законом распределения и следующими статистическими характеристиками: математические ожидания $M_{\text{ВП}} = M_{\text{АП}} = M_{\text{ДГ}_\text{X}} = M_{\text{ДГ}_\text{Y}} = 0$ и СКО $\sigma_{ДГ_X} = 0{,}2",\ \sigma_{ДГ_Y} = 0{,}2",\ \sigma_{ВП} = 60"$ и $\sigma_{АП} = 0{,}2"$.

Моделирование проводилось по следующему алгоритму:

а) в горизонтальной системе координат формировались векторы, соответствующие приборным осям в «идеальном» состоянии (без инструментальных погрешностей) так, как показано на рис. 2. Векторы O'S и O'S' задавались в соответствии с выражениями:

$$O'S = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},\ O'S' = \begin{bmatrix} \cos(h_{BO})\cos(A_{BO}) \\ \cos(h_{BO})\sin(A_{BO}) \\ \sin(h_{BO}) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где $h_{BO} = h_{ТРЕБ} = 40^\circ$, а $A_{ВО} = 0^\circ$;

б) задавались инструментальные погрешности $\Delta\varphi_{SX}$, $\Delta\varphi_{XY}$, $\Delta\theta_{XA}$, $\Delta\psi_{YA}$, $\Delta\varphi_{SV}$, $\Delta\psi_{VA}$ и приборные оси системы поворачивались на соответствующие углы так, как показано на рис. 3;

в) имитировалось влияние случайных составляющих инструментальной погрешности $\sigma_{ДГ_X}$, $\sigma_{ДГ_Y}$, $\sigma_{ВП}$ и $\sigma_{АП}$, для выборки из $N_\text{К} = 10000$ реализаций, для этого:

- ✓ рассчитывался астрономический азимут визирной оси при наблюдении звезд A^I_{BOi} до перекладки, при этом учитывалось влияние случайных составляющих погрешности $\sigma_{ДГ_X}$ и $\sigma_{ДГ_Y}$:

$$A^I_{BOi} = \arcsin\left(\frac{y^I_{BOi}}{\sqrt{(x^I_{BOi})^2 + (y^I_{BOi})^2}}\right), \quad (5)$$

где $i = [1...N_К]$ – порядковый номер реализации; x^I_{BOi}, y^I_{BOi} – декартовые координаты визирной оси в горизонтальной системе координат при наблюдении звезд в меридиане до перекладки (с учетом инструментальных погрешностей);

- ✓ приборные оси системы поворачивались на угол $\varphi_{АП} \in [0;180]^o$ с учетом влияния случайной составляющей погрешности $\sigma_{АП}$ (имитировался поворот визирной оси на наземный ориентир) и рассчитывался астрономический азимут визирной оси при наблюдении наземного ориентира A^I_{HOi} до перекладки, при этом учитывалось влияние случайных составляющих погрешности $\sigma_{ДГ_X}$ и $\sigma_{ДГ_Y}$:

$$A^I_{HOi} = A^I_{BOi} + \gamma^I_i = \arcsin\left(\frac{y^I_{HOi}}{\sqrt{(x^I_{HOi})^2 + (y^I_{HOi})^2}}\right), \quad (6)$$

где x^I_{HOi}, y^I_{HOi} – декартовые координаты визирной оси в горизонтальной системе координат при наблюдении наземного ориентира до перекладки (с учетом инструментальных погрешностей);

- ✓ имитировалась полная перекладка визирной оси, для этого приборные оси ААУ последовательно поворачивались сначала вокруг оси вращения АП с использованием матрицы поворота $C_{\mu A}(\mu_A)$, а затем вокруг оси вращения ВП с использованием матрицы $C_{\mu V}(\mu_V)$, при этом $\mu_A = 180^o$, а $\mu_V = 180^o$ при работе с вектором O'S и $\mu_V = 2 \cdot (90^o - h^I_{BOi})$ при работе с вектором O'S'. При имитации полной перекладки также учитывались случайные составляющие инструментальной погрешности $\sigma_{ВП}$ и $\sigma_{АП}$;
- ✓ рассчитывался астрономический азимут визирной оси A^{II}_{BOi} после перекладки по формуле (5) для положения визирной оси с декартовыми координатами $x^{II}_{BOi}, y^{II}_{BOi}$;
- ✓ рассчитывался астрономический азимут визирной оси A^{II}_{HOi} после перекладки по формуле (6) для положения визирной оси с декартовыми координатами $x^{II}_{HOi}, y^{II}_{HOi}$;
- ✓ оценивалась погрешность определения астрономического азимута наземного ориентира по следующей формуле:

$$\Delta_{Аноi} = \frac{A^I_{HOi} + A^{II}_{HOi}}{2} - A^{ОП}_{HO}, \quad (7)$$

где $A^{ОП}_{HO} = \frac{A^I_{BOi} + A^{II}_{BOi}}{2} + \varphi_{АП}$ – опорный астрономический азимут наземного ориентира.

В результате выполнения моделирования формировался массив погрешностей $\Delta_{Аноi}$ из $N_К$ элементов и оценивалось его среднее значение $\Delta^{сист}_{Ано}$, которое соответствует систематической составляющей погрешности определения азимута наземного ориентира и СКО $\sigma_{Ано}$, которое характеризует ее случайную составляющую.

Результаты моделирования. Моделирование выполнялось в программной среде Matlab. В табл. 1 представлены результаты моделирования влияния систематических составляющих

$\Delta\varphi_{SX}$, $\Delta\varphi_{XY}$, $\Delta\theta_{XA}$, $\Delta\psi_{YA}$, $\Delta\varphi_{SV}$, $\Delta\psi_{VA}$ на систематическую составляющую $\Delta^{\text{сист}}_{Ано}$. Случайные составляющие инструментальной погрешности задавались нулевыми.

Таблица 1

Систематические составляющие инструментальной погрешности и их влияние

$\Delta\varphi_{SX}$,…"	$\Delta\varphi_{XY}$,…"	$\Delta\theta_{XA}$,…"	$\Delta\psi_{YA}$,…"	$\Delta\varphi_{SV}$,…"	$\Delta\psi_{VA}$,…"	$\Delta^{\text{сист}}_{Ано}$ **,…"**
60	–	–	–	–	–	**-**
60	60	–	–	–	–	**-**
–	–	60	–	–	–	**-**
–	60	60	–	–	–	**0,015**
60	60	60	60	–	–	**0,015**
60	60	60	60	60	60	**0,015**

В табл. 2 представлены результаты моделирования влияния случайных составляющих инструментальной погрешности $\sigma_{ДГ_X}$, $\sigma_{ДГ_Y}$ и $\sigma_{АП}$.

Таблица 2

Случайные составляющие инструментальной погрешности и их влияние

$\sigma_{ДГ_X}$,…"	$\sigma_{ДГ_Y}$,…"	$\sigma_{АП}$,…"	$\sigma_{А\text{но}}$ **,…"**
0,2	0	0	**0**
0	0,2	0	**0,12**
0	0	0,2	**0,20**
0,2	0,2	0,2	**0,23**

По представленным результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

1) на погрешность $\Delta^{\text{сист}}_{Ано}$ влияют только систематические составляющие инструментальной погрешности $\Delta\theta_{XA}$ и $\Delta\varphi_{XY}$ (неперпендикулярность оси X ДГ и оси вращения АП, неперпендикулярность осей X и Y ДГ). Остальные составляющие полностью компенсируются при перекладке визирной оси ААУ. При углах $\Delta\theta_{XA} = 60"$ и $\Delta\varphi_{XY} = 60"$ составляющая погрешности определения азимута наземного ориентира, вызванная технологическими погрешностями изготовления ААУ, составляет $\Delta^{\text{сист}}_{Ано} = 0{,}015"$;

2) из табл. 2 видно, что погрешность ДГ по оси X $\sigma_{ДГ_X}$ не влияет на погрешность определения азимута наземного ориентира;

3) составляющие $\sigma_{ДГ_Y}$ и $\sigma_{АП}$ независимы друг от друга. Суммарная случайная составляющая погрешности определения азимута наземного ориентира, вызванная погрешностями $\sigma_{ДГ_Y}$ и $\sigma_{АП}$, составляет $\sigma_{А\text{но}} = 0{,}23"$**.**

Также следует отметить, что моделирование проводилось при различных значениях угла $\varphi_{АП} \in [0;180]^{\text{o}}$, который фактически соответствует углу поворота вокруг оси вращения АП при переходе от наблюдения звезд в меридиане к наблюдению наземного ориентира. Результаты моделирования показали, что точность определения азимута наземного ориентира не зависит от угла поворота $\varphi_{АП}$.

Заключение. В работе приведены результаты моделирования влияния инструментальной погрешности автоматизированного астроуниверсала в задаче определения азимута наземного ориентира. Результаты показали, что инструментальная погрешность комплекса, вызванная технологическими погрешностями изготовления и собственными ошибками составных частей (двухосного датчика горизонта, датчиков углов азимтульного и вертикального приводов), вызывает случайную составляющую погрешности определения азимута наземного ориентира не более 0,23", а расчетная систематическая составляющая погрешности составляет 0,015". Полученные результаты в дальнейшем планируется использовать при разработке математической

модели погрешности работы астроуниверсала, а также для формирования требований к взаимной ориентации приборных осей комплекса при его проектировании.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гайворонский С.В., Цодокова В.В.** Алгоритм определения астрономического азимута оптико-электронным астровизиром // Навигация и управление движением. Материалы докладов XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. С. 136–142.
2. **Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли** / ред. В.Г. Пешехонов, О.А. Степанов. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
3. **Батрак Е.В., Кузьмина Н.В., Тарасов С.М.** Определение азимута визирной оси астрономического оптико-электронного комплекса по наблюдениям множества звезд // Навигация и управление движением. Материалы докладов XXII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020.

S.M. Tarasov (Concern CSRI Elektropribor», JSC, Saint Petersburg)

THE STUDY OF LANDMARK ASTRONOMIC AZIMUTH DETERMINATION ERRORS INFLUENCED BY INSTRUMENTAL ERRORS OF THE AUTOMATED ASTRONOMIC SYSTEM

This work presents the automated system for astronomic coordinates and landmark astronomic azimuth determination in field conditions, which called automated astronomic system. The algorithm of landmark astronomic azimuth determination and results of study of determination errors influenced by the instrumental errors of device are presented.

К. Д. КОПЫЛОВА, О. Н. ГРАНИЧИН
(СПбГУ, Санкт-Петербург)

МИНИМИЗАЦИЯ ПОГРЕШНОСТИ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА С ПОМОЩЬЮ РАНДОМИЗИРОВАННОГО АЛГОРИТМА СТОХАСТИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

В работе обсуждаются возможности рандомизированного алгоритма стохастической оптимизации для снижения влияния деформаций щитов радиотелескопа РАТАН-600 на точность измерений.

Введение. Успешное проведение наблюдений на радиотелескопе определяется качеством юстировки [1], калибровки радиотелескопа [2], состоянием поверхности главного зеркала, которое напрямую зависит от состояния отражающей поверхности отдельного элемента и точности установки каждого элемента в расчетное положение [3], что, в свою очередь, зависит от кинематических характеристик отражательных элементов радиотелескопа РАТАН-600 [4]. Наиболее востребованным методом юстировки радиотелескопа РАТАН-600 является автоколлимационный метод [1]. Как показали результаты выполненных в работе [1] измерений, для повышения эффективности самой юстировки радиотелескопа необходимо модернизировать кинематические механизмы элементов радиотелескопа. Целью работы является разработка методов автоюстировки системы зеркал радиотелескопа для компенсации влияния ошибок наведения и деформаций его конструкции на качество приема радиосигнала.

Основная часть. Наилучшими условиями приема сигнала от радиоисточника являются те, при которых в процессе наведения радиотелескопа:

- реальная геометрическая схема конструкции зеркальной системы совпадает с теоретической оптической схемой зеркальной системы,
- направление фокальной оси совпадает с направлением на космический радиоисточник,
- отражающие поверхности зеркал конструкции зеркальной системы радиотелескопа совпадают с теоретическими расчетными поверхностями этих зеркал.

Несовпадение указанных факторов приводит к ошибкам наведения радиотелескопа [5]. Проблема заключается в том, что при наведении радиотелескопа на космический радиоисточник под воздействием гравитационных, тепловых, ветровых и инерционных сил возникают некомпенсируемые деформации элементов зеркальной системы (ЗС) [4, 5]. Это приводит к расфокусировке ЗС и, как следствие, к понижению эффективности радиоприема. Основным назначением предлагаемого метода является оптимизация механического перемещения элементов зеркальной системы радиотелескопа и радиоприемного устройства (облучателя) в такое положение, которое обеспечивает наилучшие условия приема радиоизлучения от его космического источника.

При приеме радиосигналов от удаленных космических источников радиоизлучения посредством зеркальных систем радиотелескопов и радиоприемных устройств существует задача идентификации передаточной функции зеркальной системы в цепи преобразования КИР (космический источник радиоизлучения) – ЗС (зеркальная система) – РПУ (радиоприемное устройство) – РС (радиосигнал). Для решения этой задачи была реализована математическая модель этой цепи приема–передачи в среде Matlab и Simulink.

При отклонении элементов ЗС от своего теоретического положения и при отклонении фокальной оси главного зеркала от направления на КИР радиосигналы приходят в пятно фокусировки в разное время или, применительно к импульсным характеристикам чувствительного элемента (ЧЭ) приемника, в разной фазе.

Сложение гармонических сигналов одной частоты с разными фазами равносильно преобразованию к гармоническому сигналу, амплитуда которого как функция фазы периодически меняется.

Разработан алгоритм численного расчета влияния смещений элементов ЗС на характеристики суммарного выходного сигнала приемника, несущего полезную информацию о КИР. В итоге

определяется величина изменения амплитуды суммарного радиосигнала от факторов отклонения элементов ЗС от их теоретического положения или отклонения от направления на КИР (многолепестковая диаграмма направленности при оценке мощности сигнала). За счет использования алгоритма распределенной рандомизированного алгоритма стохастической оптимизации [6] для отстройки зеркал удается повысить точность наведения модели ЗС РТ.



Рис. 1. Диаграмма контура адаптации углов поворотов зеркал

На рис. 1 представлена общая схема работы метода. Параметрам на схеме соответствуют углы поворотов зеркал $(\gamma_i, \eta_i, \theta_i)$.

Будем считать, что в систему зеркал телескопа поступает синусоидальный сигнал и начальные значения положения зеркала (считается, что зеркало уже настроено способами, описанными выше). Для точки $S(r,t) = Acos(\omega t + \varphi_0 + (z,r))$, где ω – частота сигнала, вектор z определяется направлением распространения сигнала и длиной волны, $r = (x', y', z')$ – некоторая точка на поверхности одного из зеркал.

После отражения в каждом из параболических зеркал i сигнал поступает в приемник в виде

$$\bar{x}_i(t) = \bar{A}_i(\gamma_i, \eta_i, \theta_i) sin(\omega t + \bar{\varphi}_i(\gamma_i, \eta_i, \theta_i),$$

где $\bar{A}_i$ – амплитуда сигнала, поступившего от i-го зеркала (отражающего элемента),
$\bar{\varphi}_i$ – фаза сигнала, поступившего от i-го зеркала (отражающего элемента).

В приемник поступают сигналы $x_i(t)$, искаженные из-за неровностей i-го отражающего элемента, и с шумом от окружающей среды (на диаграмме это обозначено как помехи и деформации зеркал).

На выходе получаем сигнал

$$Y(t) = \sum y_i(t)$$

как сумму сигналов y_i с погрешностью

$$y_i(t) = x_i(t) + v_i(t),$$

где v_i – компонента сигнала от i-го зеркала (отражающего элемента), которая включает в себя все помехи.

Далее рассмотрим работу блока настройки параметров.

Введем общий вектор параметров системы τ, состоящий из всех контролируемых параметров – углов ориентации зеркал.

Разобьем временную ось на интервалы длительности h: k-й интервал – это [(k-1)h, kh]. Будем считать, что на k-м интервале использовались параметры τ_k.

На каждом интервале вычислим мощность сигнала

$$P(\tau_k) = \int |\mathrm{Y(t)}|^2 dt.$$

Рассматривается задача выбора оптимального набора τ, максимизирующего мощность принимаемого сигнала.

Для решения задачи предлагается использовать рандомизированный алгоритм стохастической оптимизации из [6]:

1) выбираем τ_0, параметры β и α $(\alpha, \beta > 0)$;
2) генерируем последовательно вектор Δ_k с компонентами из +/–1, выбранными равновероятно;
3) вычисляем
$$P_{2k-1}(\tau_k + \beta \mathrm{h}_k) \text{ и } P_{2k-1}(\tau_k - \beta h_k);$$
4) следующую оценку τ_{k+1} формируем по правилу
$$\tau_{k+1} = \tau_k - \alpha \Delta_k \frac{P_{2k-1}(\tau_k + \beta \Delta_k) - P_{2k-1}(\tau_k - \beta \Delta_k)}{2\beta}.$$

Следующий шаг состоит в том, что оптимизированные параметры используются для подстройки наведения зеркал.

Заключение. В результате проделанной работы были разработаны математические модели зеркальной системы радиотелескопа и принимаемого сигнала. Также были описаны модели помех при наведении телескопа на источник. К таким моделям был применен описанный выше алгоритм фильтрации помех на основе распределенной рандомизированной оптимизации. В дальнейшем планируется реализовать предложенный метод на установках БПР и РАТАН-600.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Хайкин В.Б., Бурсов Н.Н.** Автоколлимационная автоматическая юстировка и контроль КПД элементов радиотелескопа РАТАН-600систематических ошибок склонений фундаментальных звезд // Журнал радиоэлектроники. 2016. № 10. С. 4.
2. **Ковалев Ю.А., Сотникова Ю.В., Эркенов А.К., Попков А.В., Вольвач Л.Н., Васильков В.И., Лисаков М.М., Семенова Т.А., Цыбулев П.Г.** Особенности калибровки космического радиотелескопа «РадиоАстрон» и радиотелескопа РАТАН-600 // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 47. С. 38-42.
3. **Жаров В.И., Сотникова Ю.В.** Методика определения кинематических характеристик элементов главного зеркала радиотелескопа РАТАН-600 с использованием современных лазерных измерительных систем // Астрофиз. бюлл. 2017. Т. 72. № 4. С. 520–526.
4. **Хайкин В.Б., Стороженко А.А., Шлензин С.В., Лебедев М.К., Васильков М.Ю., Светлов Д.О., Богод В.М.** О проекте модернизации кинематических узлов, приводов и схемы управления щитами плоского отражателя радиотелескопа РАТАН-600 // Труды ИПА РАН. 2018. Вып. 47. С. 64–71.
5. **Дубаренко В.В., Кучмин А.Ю., Артеменко Ю.Н., Шишлаков В.Ф.** Радиотелескопы миллиметрового диапазона с регулируемыми поверхностями зеркал: монография. СПб.: ГУАП, 2019.
6. **Granichin, O., Volkovich, V., Toledano-Kitai, D.,** Randomized Algorithms in Automatic Control and Data Mining, Intelligent Systems Reference Library, 2015, vol. 67, Springer-Verlag: Heidelberg New York Dordrecht London, 251 p.

K.D. Kopylova (Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg), O.N. Granichin (Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg)

MINIMIZATION OF ERRORS OF A RADIO ASTRONOMICAL TELESCOPE USING A RANDOMIZED STOCHASTIC OPTIMIZATION ALGORITHM

The paper discusses the possibilities of a randomized algorithm for stochastic optimization to reduce the effect of deformations of panels of the RATAN-600 main mirror on the measurement accuracy.

Секция 4

■ ЭЛЕКТРОНИКА, ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ ■

Ю. В. ГРЕЧУШКИН, О. К. ЕПИФАНОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫМИ МОМЕНТНЫМИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ С БОЛЬШОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ ФАЗ В СОСТАВЕ БЕЗРЕДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ГИРОПРИБОРОВ

Рассматривается влияние индуктивности фаз бесконтактных моментных электродвигателей на параметры их работы в составе высокоточных безредукторных электроприводов. Описываются особенности уточненных законов управления электродвигателями с большой индуктивностью фаз, обеспечивающие оптимизацию их работы по различным критериям. Уточненные законы базируются на непрерывном регулировании взаимного пространственного расположения векторов токов и напряжений в обмотках электродвигателя. Приводятся сравнения характеристик электродвигателей при описанных законах управления, а также преимущества их применения.

Введение. Управление вращением подвижных объектов в современных навигационных системах осуществляется прецизионным безредукторными электроприводами (БЭП) на основе бесконтактных моментных электродвигателей (БМД) с постоянными магнитами. Они отличаются высоким удельным вращающим моментом, широким диапазоном регулирования и высокими показателями надежности [1–3]. Управление БМД в составе БЭП осуществляется путем формирования в обмотках его статора m-фазной системы синусоидальных напряжений с заданными амплитудой и фазовым углом пространственного вектора напряжения в функции угла поворота ротора БМД [1, 2, 4, 5]. Наличие индуктивности в фазах обмотки БМД при вращении его ротора вызывает изменение взаимного пространственного расположения векторов тока и напряжения в обмотках статора, что приводит к снижению вращающего момента и негативно сказывается на характеристиках работы БМД в составе БЭП [6, 7]. Таким образом, достижение наилучших характеристик работы БМД с большой индуктивностью фаз требует управления не только амплитудами, но взаимным пространственным расположением векторов тока и напряжения в обмотках его статора. Особенно это важно для высокомоментных БМД, обладающих повышенной плотностью магнитного потока и его концентрацией в магнитопроводах, а следовательно, и индуктивностью обмоток фаз [8, 9].

Одним из путей решения поставленной задачи является непрерывное управление фазовым углом вектора напряжения по законам, определяющим его взаимосвязь с взаимным пространственным расположением векторов в функции частоты вращения ротора БМД.

Предлагаемый доклад посвящен уточнению алгоритма управления БМД с большой индуктивностью путем синтеза законов управления фазовым углом вектора напряжения с их оптимизацией по критериям получения наибольших значений вращающего момента во всем диапазоне частот вращения ротора или его соотношения с потребляемой электрической мощностью.

Уточнение алгоритма управления БДМ с большой индуктивностью фаз

Вращающий момент и его связь с фазовым углом вектора напряжения. Векторная диаграмма БМД приведена на рис. 1, на котором приняты следующие обозначения: **U**, **E** и **I** –

пространственные вектора соответственно напряжения, противо-ЭДС и тока обмоток статора; **Ф** – пространственный вектор магнитного потока ротора; r – сопротивление обмоток статора постоянному току; $x = L/r$ – индуктивное сопротивление обмоток статора; L – индуктивность обмоток статора; Ψ – угол между пространственными векторами магнитного потока ротора **Ф** и тока обмоток статора **I**; Θ – угол между пространственными векторами магнитного потока ротора **Ф** и напряжения обмоток статора **U**.

В общем случае вращающий момент БМД можно представить в следующем виде [5, 7]:

$$M = C \cdot I \sin(\Psi), \tag{1}$$

где C – коэффициент момента; I – модуль пространственного вектора тока.

Инвертор, формирующий напряжения в обмотках статора БМД, осуществляет непосредственное управление модулем вектора напряжения, а также углом Θ по сигналам обратной связи от датчика углового положения. Как правило, при управлении БМД осуществляется задание и поддержание угла $\Theta=\pi/2$.

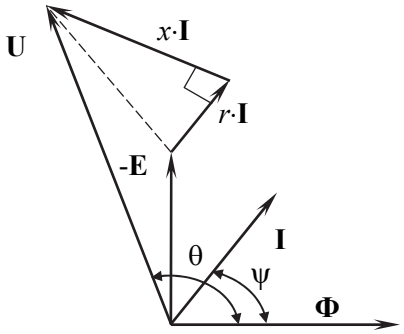


Рис. 1. Векторная диаграмма БМД

При малых частотах вращения ротора индуктивное сопротивления обмоток статора мало, и вектор тока практически совпадает с вектором формируемого в обмотках напряжения, т.е. $\Psi=\Theta=\pi/2$, что обеспечивает создание максимального вращающего момента. С ростом частоты вращения индуктивная часть сопротивления обмоток x растет и вызывает смещение вектора тока и нарушение равенства $\Psi=\Theta=\pi/2$, что требует коррекции угла Θ для достижения максимального момента. Для нахождения оптимального закона управления углом Θ необходимо определить зависимость от него угла Ψ, непосредственно влияющего на величину вращающего момента.

Согласно векторной диаграмме на рис. 1 выражения, описывающие падение напряжений в обмотках статора от их активного и индуктивного сопротивления, могут быть записаны как

$$(r^2 + x^2) \cdot I^2 = U^2 + E^2 - 2 \cdot U \cdot E \cdot \sin\Theta, \tag{2}$$

$$r \cdot I = U \cdot \cos\Theta \cdot \cos\Psi + (U \cdot \sin\Theta - E) \cdot \sin\Psi, \tag{3}$$

$$x \cdot I = (U \cdot \sin\Theta - E) \cdot \cos\Psi - U \cdot \cos\Theta \cdot \sin\Psi, \tag{4}$$

где U и E – модули пространственных векторов напряжения и противо-ЭДС соответственно.

На основании (2), (3) и (4) зависимость угла Ψ от Θ может быть записана в следующем виде:

$$\sin\Psi = \frac{U \cdot (r \cdot \sin\Theta - x \cdot \cos\Theta) - r \cdot E}{I \cdot (r^2 + x^2)}. \tag{5}$$

С учетом (5) выражение вращающего момента БМД (1) примет следующий вид:

$$M = C \cdot \frac{U}{r} \cdot \frac{(\sin\Theta - \tau_e \cdot p \cdot \Omega \cdot \cos\Theta) - \frac{Ce}{U} \cdot \Omega}{1 + (\tau_e \cdot p \cdot \Omega)^2}, \tag{6}$$

где Ω – частота вращения ротора; p – число пар полюсов; $\tau_e = x/(p \cdot \Omega \cdot r)$ – электромагнитная постоянная времени обмотки статора; $Ce = E / \Omega$ – коэффициент противо-ЭДС.

Управление фазовым углом вектора напряжения и критерии оптимальности. Закон управления фазовым углом вектора напряжения Θ, обеспечивающий наибольший вращающий момент БМД при любой частоте вращения его ротора, может быть получен в результате исследования выражения (6) на экстремум по аргументу Θ и записан в следующем виде:

$$\Theta = \operatorname{arcctg}(-\tau_e \cdot p \cdot \Omega). \tag{7}$$

Согласно выражению (5) при подстановке в него (7) синус угла Ψ будет отличаться от единицы, а сам угол Ψ не равен $\pi/2$. С учетом (1) из этого следует, что алгоритм управления, обеспечивающий достижение наибольшего вращающего момента во всем диапазоне частот, будет неоптимальным с точки зрения соотношения вращающего момента и потребляемого тока, т.е. потребляемой электрической мощности.

Для получения закона управления фазовым углом вектора напряжения Θ, обеспечивающего наибольшее соотношение вращающего момента и потребляемой электрической мощности, запишем на основании (2), (3) и (4) аналогично (5) выражение для косинуса угла Ψ и, приравняв его к нулю, выразим угол Θ. Полученное выражение примет следующий вид:

$$\Theta = \arccos\left(\frac{\tau_e \cdot p \cdot \Omega^2 \cdot Ce}{U \cdot \sqrt{1+(\tau_e \cdot p \cdot \Omega)^2}}\right) + \frac{\pi}{2} - \operatorname{arcctg}(\tau_e \cdot p \cdot \Omega). \qquad (8)$$

Характеристики БМД при различных законах управления. Для оценки эффективности полученных законов управления было выполнено расчетное моделирование работы БМД: без управления углом Θ с заданием его фиксированным Θ=π/2, с управлением углом Θ по закону (7) и с управлением углом Θ по закону (8). При моделировании были приняты следующие параметры БМД: напряжения питания *U*= 24 В; коэффициент момента *C*=3,44 Н·м/А; коэффициент противо-ЭДС *Ce*=2,29 В/(рад/с); число пар полюсов ротора *p*=32; сопротивление обмотки постоянному току *r*=0,825 Ом; электромагнитная постоянная времени τ_e=5 мс, что соответствует индуктивности обмотки *L*=4,125 мГн.

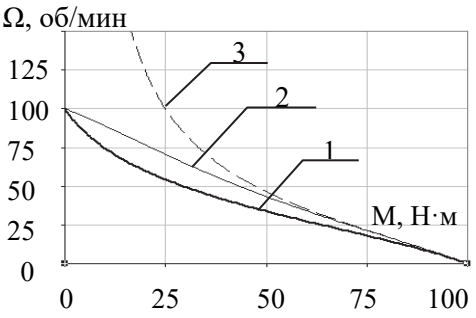


Рис. 2. Механические характеристики БМД: 1 – с заданием Θ= π/2; 2 – с управлением Θ по (8); 3 – с управлением Θ по (7)

Полученные в результате моделирования механические характеристики БМД приведены на рис. 2. Из них следует, что без управления углом Θ и заданием его фиксированного значения π/2 механическая характеристика имеет прогиб, выражающийся в потере момента с ростом частоты вращения. Управление углом Θ по закону (8) обеспечивает повышение вращающего момента за счет уменьшения его потерь при росте частоты вращения. При управлении углом Θ по закону (7), помимо роста вращающего момента, наблюдается повышение частоты холостого хода, а следовательно, расширение диапазона регулирования частоты вращения.

Для оценки влияния величины индуктивности обмоток статора на эффективность описанных законов управления углом Θ в части повышения вращающего момента было выполнено моделирование БМД при различных значениях электромагнитной постоянной времени τ_e=1; τ_e=2, τ_e=5 и τ_e=10 мс, соответствующих значениям индуктивности обмоток статора *L*=0,825; *L*=1,65; *L*=4,125 и *L*=8,25 мГн.

На рис. 3 приведены по результатам моделирования графики повышения вращающего момента за счет введения управления углом Θ относительно вращающего момента при задании фиксированного значения Θ=π/2, выраженные в процентах от пускового момента. Из них следует, что описанные законы наиболее эффективны при управлении БМД с большой индуктивностью фаз обмоток статора. При этом управление углом Θ по закону (7) обеспечивает получение наибольшего момента в более широком диапазоне частот вращения.

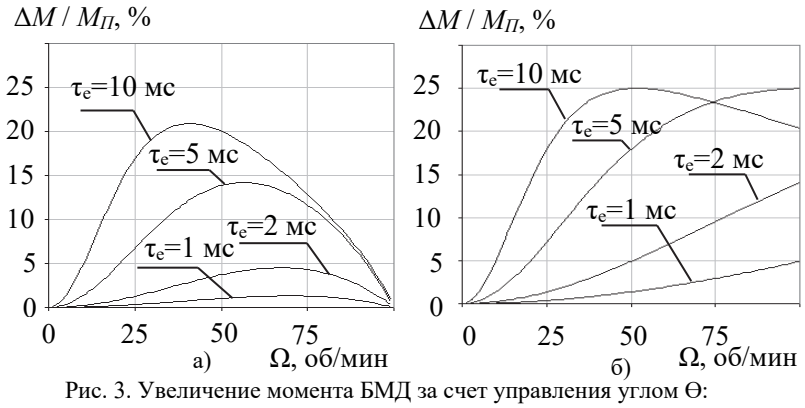


Рис. 3. Увеличение момента БМД за счет управления углом Θ: а) по закону (8), б) по закону (7)

На рис. 4 показаны соотношения вращающего момента и потребляемой электрической мощности при управлении углом Θ, приведенным к аналогичному соотношению при задании фиксированного Θ=π/2. Из этих графиков следует, что при управлении углом Θ по закону (7), обеспечивающем наибольший вращающий момент, энергетическая эффективность снижается с ростом частот вращения. При этом управление по закону (8) приводит к повышению энергетической эффективности БМД.

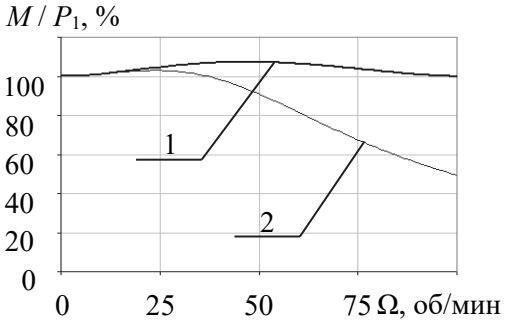


Рис. 4. Приведенное отношение момента БМД к потребляемой мощности с управлением Θ: 1 – по закону (8); 2 – по закону (7)

Заключение. Приведенные законы управления фазовым углом вектора напряжения, уточняющие алгоритм управления для БМД с большой индуктивностью, позволяют повысить его вращающий момент, расширить диапазон регулирования частоты вращения или повысить энергетическую эффективность. Показанный способ синтеза законов управления фазовым углом вектора напряжения на основании векторной диаграммы БМД позволяет оптимизировать параметры его работы в составе БЭП в соответствии с особенностями и потребностями конкретного гироприбора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Балковой А.П.** Прецизионный электропривод с вентильными двигателями. М.: Изд. дом МЭИ, 2010. 328 с.
2. **Баранов М.В., Бродовский В.Н., Зимин А.В., Каржавов Б.Н.** Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. М.: Изд.-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2006. 240 с.
3. **Медведев А.В., Молочников А.А., Епифанов О.К., Орлов М.В.** Система пространственной стабилизации линии визирования головной призмы подвижного объекта // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. Выпуск 7. С. 275−284.
4. **Томасов В.С., Усольцев А.А. Вертегел Д.А.** Особенности использования многоуровневых инвертеров в системах прецизионного сервопривода // Изв. вузов. Приборостроение. 2018. Т.61. № 12. С. 1052–1059.
5. **Томасов В.С., Усольцев А.А., Вертегел Д.А., Денисов К.М.** Исследование пульсаций электромагнитного момента в прецизионном сервоприводе при синусоидальной широтно-импульсной модуляции // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 359–368.
6. **Микеров А.Г.** Управляемые вентильные двигатели малой мощности. СПб: ГЭТУ, 1997. 64 с.
7. **Бут Д.А.** Бесконтактные электрические машины. М.: Высшая школа, 1990. 416 с.
8. **Епифанов О.К.** Современный ряд высокомоментных двигателей для безредукторных следящих систем // Электротехника. 2005. № 2. С. 36–48.
9. **Епифанова Л.М., Епифанов О.В., А.Г. Микеров** Новый ряд моментных двигателей для экстремальных условий применения // Экстремальная робототехника ЭР-2012: сб. докл. Всерос.науч.-техн. конф. СПб.: Издательство «Политехника-сервис», 2012. С. 1–7.

Y.V. Grechushkin (Concern CSRI Electropribor, Saint-Petersburg), O.K. Epifanov (Concern CSRI Electropribor, Saint-Petersburg)

FEATURES CONTROL OF A BRUSHLESS TORQUE MOTOR WITH HIGH PHASE INDUCTANCE IN A DIRECT DRIVE

The paper considers the influence of the phase inductance of a brushless torque motor on the parameters of its operation as a part of a precision direct drive. The article describes the features of the refined laws of control of a brushless torque motor with a high phase inductance, which provide optimization of their operation according to various criteria. The proposed laws are based on continuous regulation of the relative spatial location of current and voltage vectors in the motor windings. A comparison of the characteristics of the torque motor under the proposed control laws is demonstration. The achieved advantages are an increase in the electromagnetic torque and expansion of the range of rotation seeds of brushless torque motor with high phase inductance.

Ю. В. ГРЕЧУШКИН, О. К. ЕПИФАНОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОННОГО МОДУЛЯ БЕЗРЕДУКТОРНОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ЗАДАЧ ВЫСОКОТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ НАГРУЖЕННОЙ ОСИ

Анализируются показатели моментных характеристик, угловых ошибок, собственных частот и конечных упругостей электромеханотронного модуля безредукторной следящей системы, который выполняется по соосной схеме расположения многополюсных бесконтактного моментного двигателя и высокоточного датчика угла. Приводятся аналитические выражения и условия оптимизации по критериям достаточности вращающего момента, минимизации угловых ошибок и массогабаритных показателей, отсутствия резонансных частот принципиального и проектного решения модуля. Обсуждаются результаты расчетных исследований для вариантов построения модуля с различными типами моментных двигателей.

Введение. Синтез принципиального решения электромеханотронного модуля (ЭМ) [1, 2] безредукторной следящей системы (БСС) для высокоточного управления угловым движением нагруженной оси в различных по назначению робототехнических информационных и исполнительных устройствах наблюдения, ориентации и навигации предполагает определение и достижение взаимоувязанных технических параметров и значений их величин, обеспечивающих получение заданной точности управления движением ЭМ. Такой синтез имеет ряд особенностей, связанных с определением вращающего момента, который должен развивать бесконтактный моментный электродвигатель (БМД), статических и динамических угловых ошибок БСС и с минимизацией массогабаритных показателей ЭМ, достаточных для заданной точности управления угловым движением при условии отсутствия в нем резонансных частот в заданном диапазоне, чему посвящен предлагаемый доклад.

Исходные данные и основные соотношения для оценки параметров ЭМ. Как правило, ЭМ выполняется по сосной схеме расположения многополюсных высокоточного датчика угла (ДУ) и БМД с числом пар полюсов p.

В общем случае задаются следующие параметры углового движения нагруженной оси, которые должен обеспечивать ЭМ: максимальное угловое ускорение ε, максимальная угловая скорость ω, момент инерции J и момент неуравновешенности $M_{неур}$ нагрузки, масса нагрузки m или момент трения от нагрузки в узлах опор $M_{тр}$, статическая угловая ошибка БСС $\Delta\alpha_{ст}$ и динамическая угловая ошибка БСС $\Delta\alpha_{дин}$. Соосная схема расположения БМД, ДУ и узлов опор (подшипников) в конструкции ЭМ в качестве иллюстрации приведена на рис. 1.

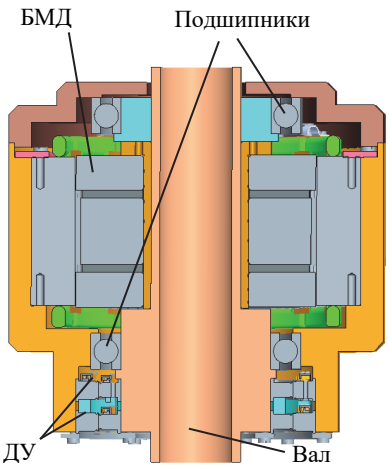


Рис. 1. Соосная схема расположения БМД, ДУ и подшипников в ЭМ

Оценка требуемого пускового момента БМД может быть получена из уравнения равновесия моментов (по уравнению Лагранжа для одномассовой системы электропривода [3]):

$$M_{п} = M_{тр} + J\varepsilon + M'_{о} \cdot K_{пр} + K_{пул}(M_{тр} + M'_{о} + J\varepsilon), \qquad (1)$$

где $M'_{о}$ – суммарный остаточный момент ЭМ; $K_{пр} \approx 1 \div 1{,}5$ – коэффициент перерегулирования; $K_{пул} \approx 0{,}1 \div 0{,}2$ – коэффициент пульсации момента; $M'_{о} = M_{о} + M_{пул} + M_{неур}$; $M_{пул}$ – пульсации момента БМД; $M_{о}$ – остаточный момент БМД.

Оценка $\Delta\alpha_{ст}$, вызываемой наличием гистерезисного момента БМД – $\Delta M_{н}^{const}$, может быть получена из выражения

$$\Delta\alpha_{ст} = \frac{\pi \cdot \Delta M_{н}^{const}}{p \cdot M_{п}}. \qquad (2)$$

Оценка $\Delta\alpha_{дин}$ с учетом номера гармоники ν M_o БМД может быть получена из выражения

$$\Delta\alpha_{дин} = \frac{M'_o + M_{тр}}{(\nu \cdot p \cdot \omega)^2 \cdot J}, \quad (3)$$

Вместе с тем к $\Delta\alpha_{дин}$ добавляется ошибка от угла закручивания вала φ [4].

Оценка угла закручивания и собственных частот вала ЭМ. С точки зрения минимизации массогабаритных показателей ЭМ важным аспектом является обоснованное определение геометрии вала ЭМ с закрепленными на нем БМД и ДУ.

Известно [3, 4], что полый вал ЭМ является эффективным средством снижения его массы и нагрузочных моментов (моментов сопротивления) для ЭМ и характеризуется коэффициентом пустотелости $c=d/D\approx 0{,}4\div 0{,}8$; где соответственно d и D – внутренний и наружный диаметр вала.

Угол закручивания указанного вала может быть определен аналитически [4] по выражению

$$\varphi = \frac{M_п}{C} = \frac{M_п \cdot l}{G \cdot J_п} = \frac{32 \cdot M_п \cdot l}{G \cdot \pi \cdot D^4 (1 - c^4)}, \quad (4)$$

где C – коэффициент жесткости при кручении, $C=G\cdot J_п / l$; l – длина вала; G – модуль сдвига; $J_п$ – полярный момент инерции, $J_п = 0{,}03125 \cdot \pi D^4 (1 - c^4)$; D – диаметр вала ЭМ.

Поскольку на валу ЭМ устанавливаются и жестко закрепляются роторы БМД и ДУ, то при оценке D, учитывая требуемую собственную частоту f ЭМ, могут рассматриваться наружные диаметры установленных роторов на i-х участках l_i длины вала ЭМ, и тогда, соответственно, рассматривается эквивалентный диаметр $D_{экв}$ вала ЭМ [3,4], т.е.

$$D = \sqrt[4]{\frac{f^2 J \cdot 128 \cdot \pi \cdot l}{G \cdot (1 - c^4)}} \quad \text{и} \quad D_{экв} = 1 \Big/ \sqrt[4]{\sum \frac{l_i}{l} \cdot \frac{1}{D_i^4}}. \quad (5)$$



Рис. 2. Расчетная модель вала ЭМ в Pro/Mechanice

Оценка собственной частоты f ЭМ по $D_{экв}$ определяется с учетом выражений (5) как

$$f = \sqrt{\frac{D_{экв}^4 \cdot G(1 - c^4)}{128\ \pi \cdot J \cdot l}}. \quad (6)$$

Следует отметить, что значение собственной частоты ЭМ должно находиться за пределами заданных резонансных частот для конструкции ЭМ. Определение φ и f, а также оценка влияния коэффициента пустотелости c на f, могут быть выполнены также средствами расчетного модуля конечного элементного анализа Pro/Mechanica из Pro/Engineer. На рис. 2 приведена расчетная модель вала ЭМ в Pro/Mechanice с установленными роторами БМД и ДУ, а на рис. 3 приведена зависимость собственной частоты для варианта конструкции ЭМ по рис. 1 от коэффициента пустотелости c.

Результаты расчетной оценки варианта конструкции ЭМ с различными БМД. В конструкции ЭМ размещались и рассматривались два типа БМД – МД [5] (МД220-30) и ДБМВ [6] (ДБМВ240-100).

Геометрические размеры их роторов и ротора ДУ и установочные диаметральные поверхности под подшипники на валу ЭМ являются определяющими для проектного решения ЭМ.

В качестве исходных данных, кроме указанных выше, принималось условие отсутствия резонансных частот в пределах 60 Гц.

Расчетная оценка является итерационной с уточнением значений $M_{тр}$, J и требуемого $M_п$, ее результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетной оценки параметров варианта конструкции ЭМ

Наименование параметра	ДБМВ240-100	МД220-30
Требуемый максимальный пусковой момент, Н·м	82,5	49,0
Число пар полюсов	28	64
Требуемый диаметр вала под установку БМД, мм	169	60
Статическая угловая ошибка, ″	23	0
Угол закручивания вала, φ, ″ (аналитический /ProMechanica)	3,22 / 3,35	1,2 / 1,28
Динамическая угловая ошибка, ″: • для ν = *p*; • для ν = 3*p*; • для ν = 6*p*.	 216 24 ---	 0 4,3 1,07
Масса вала ЭМ, кг (при *c*=0 / *c*=0,8)	34 / 13	17 / 7
Собственная частота при *c*=0,8, Гц	52	63

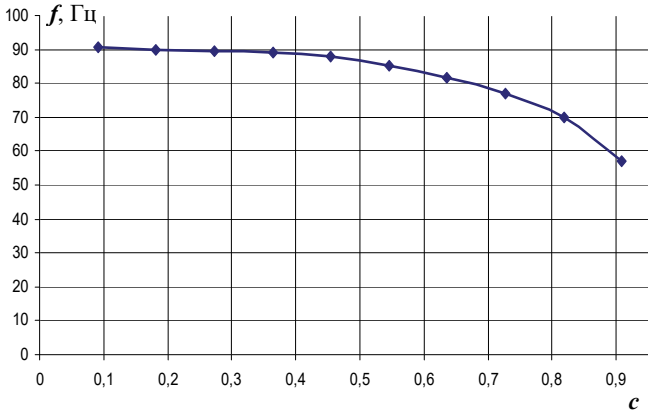


Рис. 3. Зависимость собственной частоты ***f*** от коэффициента пустотелости ***c*** вала ЭМ

Из полученных результатов расчетной оценки следует, что с увеличением пар полюсов в БМД статическая и динамическая ошибки БСС существенно уменьшаются. При этом БМД с большим числом пар полюсов развивают больший пусковой момент [5, 6] и, соответственно, обеспечивают улучшение массогабаритных показателей ЭМ. Вместе с тем выполнение и определение оптимальных параметров пустотелого вала ЭМ позволяют существенно снизить массу вала ЭМ с установленными на нем роторами БМД и ДУ.

Заключение. Приведенные аналитические выражения и условия оптимизации по критериям достаточности вращающего момента, минимизации угловых ошибок и массогабаритных показателей, отсутствия резонансных частот позволяют выполнить оценку возможностей принципиального и проектного решения ЭМ, соответствующего предъявляемым к нему требованиям.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Подураев Ю.В.** Мехатроника: основы, методы, применение. М.: Машиностроение, 2006. 256 с.
2. **Лукинов В.П.** Проектирование мехатронных и робототехнических устройств. СПб.: Издательство «Лань», 2012. 608 с.
3. **Фигаро Б.И.** Теория электропривода. Мн.: ЗАО «Техперспектива», 2004. 527 с.
4. **Сопротивление материалов** / под ред. акад. АН УССР Писаренко Г.С. К.: Вища шк. Головное издательство, 1986. 775 с.
5. **Епифанов О.К.** Современный ряд высокомоментных двигателей для безредукторных следящих систем // Электротехника. 2005. № 2. С. 36–48.
6. **Епифанова Л.М., Епифанов О.В., Микеров А.Г.** Новый ряд моментных двигателей для экстремальных условий применения // Экстремальная робототехника ЭР-2012: сб. докл. Всерос.науч.-техн. конф. СПб.: Издательство «Политехника-сервис», 2012. С. 1–7.

Y.V. Grechushkin (Concern CSRI Electropribor, Saint-Petersburg), O.K. Epifanov (Concern CSRI Electropribor, Saint-Petersburg)

FEATURES OF SYNTHESIS OF AN ELECTROMECHANOTRONIC MODULE OF THE GEARLESS SERVO SYSTEM FOR THE TASKS OF HIGH-PRECISION MOTION CONTROL OF THE LOADED AXIS

The parameters of torque characteristics, angular errors, natural frequencies and finite elasticity of an electromechanotron module of gearless servo system are analyzed, which is performed according to the axial arrangement of a multipole non-contact torque motor and high-precision angle resolver. Analytical expressions and conditions of optimization according to criteria of torque sufficiency, minimization of angular errors and mass-dimensional parameters, the absence of resonant frequencies of principle and design solution of module are given. The results of calculation studies for module design variants with different types of torque motors are discussed.

Н. А. ЛУКИН, Л. С. РУБИН
(Институт машиноведения УрО РАН, Екатеринбург)

МАРШРУТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ШИРОКОДИАПАЗОННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ «ТОК–КОД»

Описывается маршрут проектирования одного из классов измерительной техники – высокочувствительных преобразователей «ток–код» на основе технологии двухтактного интегрирующего преобразования. Этапы проектирования рассматриваются на примере конкретного аналого-цифрового преобразователя, предназначенного для разработки прецизионного измерителя малых токов.

Введение. Прецизионные измерения малых токов в реальном времени становятся актуальными в широком спектре применений – от кремниевых кластеров СБИС в составе МЭМС до мобильных систем контроля и оперативного измерения токов утечки при изготовлении микроэлектроники. Обеспечение высокой точности измерения и устойчивой работы электроники измерителя являются одними из наиболее важных задач, стоящих перед разработчиками измерителей. Проектирование подобных измерителей в виде СБИС либо их микроэлектронных кластеров представляет собой сложную научно-техническую проблему. Предлагаемый доклад посвящен маршруту проектирования одного из классов измерительной техники – высокочувствительных преобразователей «ток–код» на основе технологии двухтактного интегрирующего преобразования. Изложение маршрута проектирования ведется в виде мастер-класса на примере конкретного измерителя токов наноамперного диапазона.

Маршрут проектирования. Стандартный маршрут проектирования СБИС состоит, как правило, из следующих этапов [1]:

- системного проектирования;
- функционального проектирования;
- логического проектирования;
- физического проектирования;
- верификации.

Проектирование аналого-цифровых преобразователей (АЦП) вносит свою специфику как в состав этапов, так и в их содержание. В частности, на этапе системного проектирования должно производиться математическое моделирование, целью которого является выбор метода преобразования. Этап функционального проектирования предназначен для определения структурно-функциональной схемы АЦП, основных характеристик модулей структурной схемы, режимов их работы и разработки временной диаграммы АЦ-преобразования. На этапе логического проектирования производится моделирование на основе стандартных языковых средств типа Verilog только цифровой части АЦП. Этап физического проектирования предназначен для разработки электрической схемы АЦП. На этом этапе разрабатывается тестовое окружение, необходимое для верификации проекта АЦП. Этап верификации заключается в разработке, изготовлении макетов АЦП в целом или их составных частей и экспериментов с последующей обработкой результатов. В настоящем докладе рассматриваются этапы проектирования на примере конкретного АЦП, предназначенного для разработки прецизионного измерителя малых токов.

Этап системного проектирования АЦП. Характеристики АЦП определяются исходя из технического задания на головной объект – микроминиатюрный прецизионный измеритель малых токов. Основными являются следующие:

- диапазон измеряемых токов – 1нА,…., 1000нА;
- длительность цикла однократного измерения – 10 мс;
- суммарная относительная погрешность преобразования для 1 нА – не более 1%, для 1000 нА – не более 0.03%.

Результаты первичного анализа требований:

- разрядность выходного кода должна быть не менее 20 бит;
- базовый метод – двухтактное интегрирующее преобразование;
- входные цепи АЦП должны содержать схемы помехозащиты.

Результатом математического моделирования базового метода является переход от линейной шкалы преобразования к нелинейной, имеющей вид степенной функции. Метод преобразования изложен в [2].

Этап функционального проектирования АЦП. На основе базового метода преобразования производится проектирование структурно-функциональной схемы АЦП, которая состоит из двух частей – аналоговой и цифровой. Состав блоков аналоговой части схемы [3]:

- интегратор на базе ОУ с конденсатором в обратной связи,
- блок сравнения уровней напряжения,
- блок формирования тока разряда интегрирующего конденсатора,
- блок формирования уровня напряжения неинвертирующего входа ОУ,
- формирователь импульса сравнения,
- блок входных цепей инвертирующего и неинветирующего входов ОУ.

Цифровая часть проектируется на одном из стандартных микроконтроллеров.

На данном этапе разрабатывается временная организация работы АЦП. Цикл измерения состоит из двух тактов. В первом такте входной ток преобразуется в уровень напряжения на выходе интегратора, во втором – этот уровень преобразуется в цифровой код, и схема подготавливается для приема следующего значения входного тока.

Этап логического проектирования АЦП. Производится разработка цифровой части АЦП, в том числе выбор типа микроконтроллера и моделирование всей логики с использованием инструментария от IAR Systems, программатор-отладчик ST-Link. В качестве микроконтроллера применяется СБИС STM32L-Discovery.

Этап физического проектирования АЦП. Производится разработка схемы электрической аналоговой и цифровой частей АЦП. Интегратор создается на основе ОУ с емкостной обратной связью. Операционный усилитель должен иметь входной ток не более 10 пА, чтобы преобразовывать входной ток 1 нА без значимого влияния паразитных токов, иметь коэффициент усиления не менее 10^5, чтобы обеспечить точное интегрирование, и иметь питающие напряжения не менее ±15В, чтобы обеспечить линейный режим преобразования входного тока в уровень напряжения. Нелинейный разряд интегрирующего конденсатора обеспечивается специально спроектированной схемой [2]. В качестве ОУ выбрана микросхема TL071CP. На данном этапе разрабатывается временная диаграмма совместной работы аналоговой и цифровой частей АЦП. Основой диаграммы является циклическая работа преобразователя, при этом время цикла задается программой микроконтроллера.

Кроме того, разрабатывается тестовое окружение АЦП, состоящее из адаптера «АЦП – компьютер» на том же микроконтроллере, прикладного ПО для взаимодействия АЦП с компьютером.

Этап верификации проекта АЦП. На этом этапе разрабатывается технологическая позиция для отладки схемы и режимов работы АЦП. Основой позиции является контрольно-измерительное оборудование и компьютер. Технология верификации проекта основана на:

- программном задании номиналов эталонных значений токов на входе АЦП;
- периодическом включении АЦП (количество периодов задается программой контроллера);
- формировании файлов в памяти компьютера либо на внешнем носителе информации;
- статистической обработке результатов преобразования.

В качестве источника эталонных токов применяется источник-измеритель SourceMeter, модель Keithley 2450, позволяющий задавать токи в интересующем нас диапазоне от 0 нА до 1000 нА. Состав процедур обработки результатов экспериментов и испытаний: расчет текущего среднего, расчет стандартного отклонения, расчет метрологической кривой по множеству равных вход-

ных токов. Технологическая позиция позволяет проводить настройку всех схем аналоговой части АЦП и всех режимов работы цифровой его части как по отдельности, так и совместно.

Основные этапы верификации:

- многократное преобразование постоянного значения эталонного входного тока. Каждый раз оно задается с помощью внешнего источника-измерителя SourceMeter, модель Keithley 2450, диапазон значений – (0, …, 1000) нА;
- определение границы чувствительности АЦП;
- оценка влияния внешних шумов на работу блоков АЦП, определенных заранее.

Каждый этап верификации документируется. Получены следующие результаты. Разрядность выходного кода – 16 бит. Относительный разброс значений кодов на выходе АЦП составляет не более 0,1% для 1 нА, 0,002% – для 1000 нА. Разрешение – 10 пА. Уход средних значений за 14 ч непрерывной работы – не более 0,1% для 1 нА, 0,036% –для 1000 нА.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Руткевич А., Гречищев Д.** Маршрут и методика проектирования микросхемы контроллера класса «системы на кристалле» для SD-карт стандарта SDHC/Компоненты и технологии. 2012. №12. С. 2.
2. **Способ двухтактного** аналого-цифрового преобразования интегрирующего типа и устройство для его осуществления. Патент России № 2564909. 2015. Бюл.28 / Лукин Н.А., Рубин Л.С.
3. **Аналого-цифровой** преобразователь интегрирующего типа для измерения малых электрических сигналов. Патент России № 2693647. 2019.Бюл. 19 / Лукин Н.А., Рубин Л.С.

N.A. Lookin, L.S. Rubin (Institute of Engineering Sciences, Yekaterinburg)

DESIGNE ROUTE FOR HIGH-SENSITIVE WIDE-RANGE CONVERTER «CURRENT-CODE»

The design route of one of the classes of measuring equipment - highly sensitive current-to-code converters based on the push-pull integrating conversion technology – is described.The design stages are considered on the example of a specific analog-to-digital converter intended for the development of a precision low current meter.

А. М. ГРУЗЛИКОВ, Н. В. КОЛЕСОВ, М. В. ТОЛМАЧЕВА
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ВЫСОКОУРОВНЕВОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ИЗ ЗВЕНЬЕВ БЕЗ ПОТЕРИ ИНФОРМАЦИИ

Исследуется сетединамическая модель распределенной вычислительной системы реального времени. Модель встраивается в программное обеспечение системы и предназначена для тестового диагностирования нарушений в адресации обменов между программными модулями системы. Обсуждаются вопросы наблюдаемости и управляемости предложенной модели для случая, когда используются звенья без потери информации.

Введение. Рассмотрение вопросов диагностирования занимает важное место в процессе проектирования интегрированных навигационных систем (ИНС), поскольку от качества их решения зависит надежность и отказоустойчивость систем. Применяемые на практике решения основываются на техниках функционального и тестового диагностирования [1–3]. Одними из особенностей современных ИНС являются работа в реальном времени и использование распределенной обработки информации. В настоящем докладе объектом высокоуровневого диагностирования является произвольная распределенная вычислительная система (РВС) реального времени, которую можно представить как совокупность функционально связанных программных модулей (ПМ), размещенных на процессорах РВС и обменивающихся необходимой информацией асинхронно. Особенностью предлагаемого подхода, отличающей ее от большинства известных, является то, что в каждый программный модуль анализируемого системы вводится избыточность, что позволяет повысить эффективность тестирования и применять подход не только на этапе отладки, но и на этапе функционирования системы по прямому назначению. Вводимая избыточность по существу представляет собой модель системы, вычисляемую параллельно с основной программой. В настоящей статье предлагается использовать сетединамическую модель (СДМ). Данную диагностическую модель с точки зрения рассматриваемого класса отказов можно отнести к дискретно-событийным системам [4], когда работа системы описывается на языке последовательностей некоторых событий. Подобные модели широко применяются при анализе и тестировании сложных систем.

Предварительные сведения и постановка задачи. Описываемый в настоящей статье алгоритм синтеза СДМ опирается на результаты работы [5], которые, к сожалению, не обладают достаточной общностью. Приведем их в кратком изложении. Данный алгоритм справедлив для любой РВС реального времени и состоит из двух этапов. На первом этапе создается структура модели. Для этого на основе известных алгоритмов формируется множество вычислительных путей, составляющих покрытие дуг графа сети. При этом под вычислительным путем понимаем последовательность срабатывающих переходов сети, соединяющую некоторую входную позицию с некоторой выходной. Затем с каждым из полученных путей сопоставляется цепь из такого числа динамических звеньев, через сколько переходов (ПМ) проходит данный путь. После описанных построений модель системы представляется совокупностью функционально независимых цепей, а задача диагностирования может быть сведена к диагностированию отдельных цепей. На втором этапе формирования модели определяется вид динамических звеньев. При этом основополагающим является тот факт, что искомая динамическая модель системы далее используется для построения тестов. Известно [3], что процедура построения тестов упрощается, если модель системы, во-первых, линейна, а во-вторых, управляема и наблюдаема. Отсюда можно сформулировать требование к звеньям цепей модели. Они должны быть линейны. Кроме того, звенья должны быть таковы, чтобы модель системы была бы управляема и наблюдаема.

Средства диагностирования (СД) системы формируют для нее тестовые данные, дополняя ими входные данные, и анализирует выходную реакцию. В каждом из ПМ реальные информационные слова обрабатываются штатными алгоритмами. Параллельно с этим тестовые информационные слова обрабатываются специальными алгоритмами, реагирующими на события приема/выдачи информации, а результаты их обработки выдаются в составе выходных данных.

Поскольку механизм обмена реальными и тестовыми данными в системе является общим, возникает возможность по наблюдаемым в процессе работы тестовым результатам делать вывод о наличии или отсутствии нарушений в адресации обменов. Заметим, что искажения реальных данных в процессе обмена при сохранении графа информационных связей не входят в этот класс нарушений. Таким образом, проблема состоит в построении алгоритмов обработки тестов в ПМ, а также в построении по виду этих алгоритмов самих тестов. В статье рассматривается лишь первая задача. Алгоритм обработки тестовых данных является событийной моделью системы. Она, как будет показано ниже, имеет вид линейной дискретной периодически нестационарной системы. В терминах этой модели класс рассматриваемых нарушений определяется как всевозможные искажения матриц этой модели. После описанных построений структура модели системы представляется совокупностью независимых цепей, а задача диагностирования может быть сведена к диагностированию моделей отдельных цепей.

Динамическое описание цепи получается по следующим правилам. Используется вектор состояния $x(t)$, составленный из векторов состояния звеньев $x_i(t) \quad i = \overline{1, L}$, входящих в эту цепь, а с помощью матриц $F(t), G(t), H(t)$ описывается перенос информации между ПМ и СД в каждом *j*-м информационном обмене. Учтем, что в настоящей работе рассматриваются системы реального времени, которые характеризуются периодическим процессом обработки информации, а, значит, и периодическими обменными процессами. Следовательно, матрицы $F(t), G(t), H(t)$ будут периодически повторяться, а модель системы будет периодически нестационарной. В связи с этим свяжем с каждой последовательностью матриц свою последовательность индексов, множество которых обозначим через $\Gamma = \{\gamma_s \,|\, r = \overline{1, L+1}\}$. Их начальные отрезки на интервале длительностью в период получаются в результате циклического сдвига последовательности индексов 1, 2, …, L+1. При L = 2 имеем три последовательности индексов: Γ={1, 2, 3; 2, 3, 1; 3, 1, 2}.Тогда

$$x(t+1) = F(\gamma_s(j))x(t) + G(\gamma_s(j))u(t), \quad y(t) = H(\gamma_s(j))x(t), \quad j = \overline{1, L+1}.$$

Эти уравнения описывают L-1 межзвенных обменов и два обмена с СД (прием и выдача информации). Ниже рассматривается второй этап синтеза сетединамической диагностической модели. При этом предлагается его выполнить с использованием в качестве звеньев динамических систем без потери информации. Излагаемый материал позволяет в некоторых случаях более просто, чем в общем случае, находить желаемые решения. Введем понятие системы без потери информации.

Определение 1. Линейная динамическая система называется системой без потери информации, если по результатам анализа ее выходной последовательности может быть восстановлена входная последовательность.

Перейдем к анализу управляемости и наблюдаемости цепи.

Утверждение 1. Цепь, составленная из наблюдаемых звеньев без потери информации, наблюдаема.

Доказательство достаточно очевидно. Действительно, цепь, составленная из одного звена, наблюдаема по условию. Пусть цепь составлена из двух звеньев. Второе (выходное) звено наблюдаемо в составе цепи по условию. Первое звено наблюдаемо в составе цепи, поскольку его выходная последовательность в силу определения 1 определяется по выходу цепи. Это рассуждение легко индуктивно продолжить.

Утверждение 2. Звено (f, g, h) является наблюдаемым и управляемым, если матрица f – строчная фробениусовая, т.е.

$$f = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ & & & \dots & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\alpha_0 & -\alpha_1 & -\alpha_2 & \dots & -\alpha_{n-1} \end{bmatrix},$$

а также выполняется одно из условий:

1) $h=[h_{00}\quad 0\quad ...\quad 0\quad 0\quad 0]$, $g=[0\quad 0\quad ...\quad 0\quad 0\quad g_{m-1,0}]^T$,
2) $h=g=E$,
3) $h=E$, $g=[0\quad 0\quad ...\quad 0\quad 0\quad g_{m-1,0}]^T$,
4) $g=E$, $h=[h_{00}\quad 0\quad ...\quad 0\quad 0\quad 0]$.

Утверждение 3. Наблюдаемое неособенное звено (f,g,h) размерности m и со строчной фробениусовой матрицей динамики является звеном без потери информации в следующих случаях:

1) $h=[h_{00}\quad 0\quad ...\quad 0\quad 0\quad 0]$, $g=[0\quad 0\quad ...\quad 0\quad 0\quad g_{m-1,0}]^T$,
2) $h=E$, $g=[0\quad 0\quad ...\quad 0\quad 0\quad g_{m-1,0}]^T$,
3) $h=g=E$.

Утверждение 4. Цепь, составленная из наблюдаемых звеньев без потери информации типов 1 и 3 (утверждение 3), наблюдаема и управляема.

Данное утверждение достаточно очевидное. Действительно, наблюдаемость цепи показана в утверждении 1. В управляемости цепи в обоих случаях легко убедиться, если перейти к двойственной системе. Последняя будет цепью того же типа, что и исходная, поскольку матрицы *h* и *g* связаны в обоих случаях отношением транспонирования. Это свидетельствует о наблюдаемости двойственных систем, что, в свою очередь, говорит об управляемости исходных систем.

Заключение. В настоящем докладе рассматриваются вопросы синтеза сетединамической диагностической модели распределенной вычислительной системы реального времени. В системе реализуются параллельные асинхронные вычисления. Модель предназначена для высокоуровневого тестового диагностирования, встраивается в систему и обрабатывает тестовые данные параллельно с основным процессом обработки. В работе предлагается алгоритм синтеза модели, использующий звенья без потери информации. Для получаемой модели формулируются условия ее наблюдаемости и управляемости.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 19-08-00052)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Isermann, R.,** Fault-diagnosis applications: model-based condition monitoring: actuators, drives, machinery, plants, sensors, and fault-tolerant systems, Springer Science & Business Media, 2011.
2. **Patton, R.J., Frank, P.M., Clark, R.N. (ed.),** Issues of fault diagnosis for dynamic systems, Springer Science & Business Media, 2013.
3. **Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В.** Системы реального времени. Планирование, анализ, диагностирование. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор, 2014.
4. **Cassandras, C.G., Lafortune, S.,** Introduction to discrete event systems, Springer Science & Business Media, 2009.
5. **Грузликов А.М., Колесов Н.В.** Дискретно-событийная диагностическая модель распределенной вычислительной системы. Независимые цепи // Автоматика и телемеханика. 2016. №. 10. С. 140–155.

A.M. Gruzlikov, N.V. Kolesov, M.V. Tolmacheva (Concern CSRI Elektropribor)

HIGH-LEVEL TESTING OF DISTRIBUTED SYSTEMS BASED ON A LINK MODEL WITHOUT LOSS OF INFORMATION

A new dynamic model of a distributed real-time computing system is investigated. The model is embedded in the system software and is intended for test diagnostics of violations in addressing exchanges between the system's software modules. The questions of observability and controllability of the proposed model are discussed for the case when models of links are used without loss of information.

А. М. ГРУЗЛИКОВ, Н. В. КОЛЕСОВ, М. В. ТОЛМАЧЕВА
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗРЕШИМЫХ КЛАССОВ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ С МИНИМИЗАЦИЕЙ ДЖИТТЕРА

Рассматривается подход к планированию вычислительного процесса в распределенных системах реального времени с минимизацией джиттера. В основе подхода лежит понятие разрешимого класса систем, для которого существуют оптимальные алгоритмы планирования полиномиальной сложности.

Введение. Современные интегрированные навигационные системы осуществляют обработку информации в реальном времени и характеризуются высоким уровнем сложности. В их состав может входить не один десяток процессоров, решающих более сотни задач. В связи с этим проблемы организации вычислений и планирования в этих системах играют не последнюю роль. В современной научной литературе проблеме планирования уделяется большое внимание [1]. Среди рассматриваемых задач, конечно, значатся традиционные приложения в планировании производства, где можно выделить, например, планирование для технологических линий (flow-shop-планирование) [2]. С этим базовым направлением на идейном уровне переплетается планирование вычислений в системах реального времени (СРВ) [3]. В настоящей работе обсуждается последнее направление. Оптимальное решение проблемы планирования может быть получено переборными алгоритмами, однако все они характеризуются экспоненциальной вычислительной сложностью, и в силу этого их применение в целом ряде приложений оказывается невозможным. По этой причине широкое распространение на практике получили субоптимальные алгоритмы. В этой области широко представлено направление, посвященное планированию в многоканальных системах обработки информации, отождествляемое с flow-shop-планированием. По данной теме опубликовано значительное число работ, различающихся прежде всего особенностями предлагаемых алгоритмов, но также и видом критерия, в соответствии с которым формируется план. При этом наиболее часто используется, например, минимум общего времени выполнения плана или минимум максимального отклонения от заданных директивных сроков и др. Для систем реального времени могут применяться и другие характерные только для них критерии, например минимум потребляемой энергии или минимум джиттера («дрожание» момента старта или завершения некоторой задачи от периода к периоду) [4]. Для многих систем реального времени этот параметр имеет важное значение, когда некоторые задачи системы должны быть «привязаны» к заданным моментам времени. Именно последней теме и посвящено основное содержание настоящего доклада, где в отличие от [4] проблема рассматривается в отношении распределенных flow-shop-систем. При этом в ее фокусе лежит подход, основанный на использовании так называемых разрешимых классов систем, – РКС-алгоритм.

Предварительные сведения. Опишем постановку задачи flow-shop-планирования. Рассматривается распределенная вычислительная система. Предполагается, что рассматриваемое множество задач разбито на независимые группы задач, связанных отношением предшествования (далее – задания). В результате планированию подлежат m независимых равноприоритетных заданий $\tau = \{\tau_j \mid j = \overline{1,m}\}$, обрабатывающих входные данные, поступающие с периодом T. Каждое j-е задание состоит из n задач $\tau_{j,i}$ длительностью $e_{j,i}$, $i = \overline{1,n}$. Будем предполагать, что значения длительностей известно точно. Все используемые процессоры из множества P имеют одинаковую производительность. Произведенное назначение заданий соответствует случаю flow-shop-системы. Графы заданий являются направленными, ациклическими, содержащими в общем случае не один путь между любыми выделенными вершинами. Далее для рассматриваемой системы будем использовать обозначение $C(F,\tau)$. Исследуемый ниже алгоритм flow-shop-планирования – РКС-алгоритм основан на использовании понятия разрешимого класса системы. Важным следствием принадлежности системы к разрешимому классу является существование для нее оптимального алгоритма flow-shop-планирования линейной сложности [3]. Для

определения разрешимых классов предварительно введем на множестве процессоров отношение доминирования «>».

Определение 1. Процессор P_q доминирует над процессором P_r ($P_q > P_r$), если $\min_j e_{q,j} \geq \max_j e_{r,j}, (j = \overline{1,m})$.

Определение 2 (класс 1). Множество процессоров критического пути представляет собой последовательность $P_1 > P_2 > ... > P_{n^*}$, убывающую по отношению доминирования.

Определение 3 (класс 2). Множество процессоров критического пути представляет собой последовательность $P_1 < P_2 < ... < P_{n^*}$, возрастающую по отношению доминирования.

Определение 4 (класс 3). Множество процессоров критического пути представляет собой пару соединенных последовательностей

$$P_1 < P_2 < ... < P_{h^*} > ... > P_{n^*-1} > P_{n^*}, \quad 1 \leq h \leq n^*,$$

первая из которых возрастает, а вторая убывает по отношению доминирования (h^* – номер процессора стыковки двух последовательностей).

Определение 5 (класс 4). Множество процессоров критического пути представляют собой пару соединенных последовательностей

$$P_1 > P_2 > ... > P_{h^*} < ... < P_{n^*-1} < P_{n^*}, \quad 1 \leq h^* \leq n^*,$$

первая из которых убывает, а вторая возрастает по отношению доминирования.

Четвертый класс не является в полном смысле разрешимым, поскольку для него неизвестен оптимальный алгоритм планирования линейной сложности, а известный алгоритм субоптимален.

Алгоритмы планирования по критерию минимума джиттера в flow-shop-системах из разрешимых классов. В настоящем разделе предлагаются оптимальные алгоритмы flow-shop-планирования при использовании в качестве критерия минимума джиттера, характерного для систем реального времени. Будем говорить, что j-я задача привязана к моменту времени t_j с точностью δ_j, если время начала решения этой задачи лежит в интервале $[t_j - \delta_j, t_j + \delta_j]$. Неопределенность длительности выполнения задачи определим величиной $\Delta_j = \frac{1}{2}(\bar{e}_j - \underline{e}_j)$.

Рассмотрим решение проблемы планирования по критерию минимума выходного джиттера (неточность привязки конца задания) при flow-shop-планировании.

Утверждение 1. Минимальное значение среднего по заданиям выходного джиттера $\overline{\Delta}_1(\pi)$ для системы из класса 1 достигается в плане π, в котором задания упорядочены по неубыванию джиттера их первых задач критического пути, т.е.

$$\Delta(e^*_{1,1}) \leq \Delta(e^*_{1,2}) \leq ... \leq \Delta(e^*_{1,m}).$$

Утверждение 2. Минимальное значение среднего по заданиям выходного джиттера $\overline{\Delta}_2(\pi)$ для системы из класса 2 достигается в плане π, для которого выполняется:

1) задания упорядочены по неубыванию джиттера последних задач критического пути, т.е.
$$\Delta(e^*_{n^*,1}) \leq \Delta(e^*_{n^*,2}) \leq ... \leq \Delta(e^*_{n^*,m});$$
2) первое задание плана π удовлетворяет условию
$$j^* = \arg\min_j \sum_{i=1}^{n^*-1} \Delta(e^*_{i,j}).$$

Утверждение 3. Минимальное значение среднего по заданиям выходного джиттера $\overline{\Delta}_3(\pi)$ для системы из класса 3 достигается в плане π, для которого выполняется:

1) задания упорядочены по неубыванию джиттера задач стыковки критического пути, т.е.
$$\Delta(e^*_{h^*,1}) \leq \Delta(e^*_{h^*,2}) \leq ... \leq \Delta(e^*_{h^*,m});$$
2) первое задание плана π удовлетворяет условию
$$j^* = \arg\min_j \sum_{i=1}^{h^*-1} \Delta(e^*_{i,j}).$$

Утверждение 4. Минимальное значение оценки $\hat{\overline{\Delta}}_4(\pi)$ среднего по заданиям выходного джиттера $\overline{\Delta}_4(\pi)$ для системы из класса 4 достигается в плане π, для которого выполняется:

1) задания упорядочены по неубыванию суммарного джиттера первых и последних задач критического пути, т.е.
$$(\Delta(e^*_{1*,1}) + \Delta(e^*_{n*,1})) \le (\Delta(e^*_{1*,2}) + \Delta(e^*_{n*,2})) \le \ldots \le (\Delta(e^*_{1*,m}) + \Delta(e^*_{n*,m}));$$
2) первое задание плана π удовлетворяет условию
$$j^* = \arg\min_j \sum_{i=h^*+1}^{n^*-1} \Delta(e^*_{i,j}).$$

Если в конкретном случае условия в утверждениях 2, 3 или 4 противоречат друг другу, то лучший из вариантов может быть определен перебором.

Очевидно, что на практике для распределенной flow-shop-системы общего вида, описанной в постановке задачи, условия ее принадлежности к тому или иному разрешимому классу чаще всего не выполняются. В результате исчезают гарантии оптимальности описанных выше алгоритмов. В связи с этим предлагается пусть приближенный, но справедливый для любой из рассматриваемых систем рекурсивный алгоритм планирования, выполняемый за число шагов не большее, чем число заданий. На каждом шаге рекурсии определяется некоторый аналог критического пути, называемый псевдокритическим. Далее используется алгоритм планирования (утверждения 1–4), соответствующий тому разрешимому классу, к которому наиболее близка рассматриваемая на данном шаге система $C' = \{P, \tau'\}$, где τ' – множество неразмещенных заданий ($\tau' \subseteq \tau$). При этом выбранное задание занимает первую позицию из интервала свободных позиций формируемого плана. После размещения это задание исключается из исходного множества, и осуществляется переход к следующему шагу рекурсии, реализуемому уже для оставшегося множества заданий на множестве свободных позиций плана. В результате алгоритм последовательно размещает в плане все рассматриваемые задания в направлении от начала плана к его концу.

Заключение. Рассмотрены вопросы flow-shop-планирования вычислительного процесса в распределенных системах реального времени. Особенностью предложенного РКС-алгоритма является простота. При планировании в качестве критерия используется минимум джиттера.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект № 19-08-00052)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Liu, J.W.S.,** Real-Time Systems, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2000. 600 p.
2. **Nawaz, M, Enscore Jr., E.E., Ham, I.,** A Heuristic Algorithm for the m-Machine, n-Job Flow-shop Sequencing Problem, Omega – International Journal of Management Science, 1983, no. 11, pp. 91–95.
3. **Gruzlikov, A.M., Kolesov, N.V., Skorodumov, Yu.M., Tolmacheva, M.V.,** Using solvable classes in flowshop scheduling, Int J Advanced Manufacturing Technology, 2016.
4. **Колесов Н.В., Толмачева М.В., Юхта П.В.** Минимизация джиттера при планировании вычислений в системах реального времени // Программирование. 2014. №1. С. 28–34.

A.M. Gruzlikov, N.V. Kolesov, M.V. Tolmacheva (Concern CSRI Elektropribor)

USING OF SOLVABLE CLASSES OF SYSTEMS FOR SCHEDULING OF REAL-TIME COMPUTATIONS TO JITTER MINIMIZE

An approach to planning a computational process in distributed real-time systems with jitter minimization is considered. The approach is based on the concept of a solvable class of systems for which there are optimal planning algorithms of polynomial complexity.

Г. М. ТРИГУБОВИЧ, С. О. ШЕВЧУК, А. С. СВЕРКУНОВ
(ЗАО «Аэрогеофизическая разведка», Новосибирск)

Н. С. КОСАРЕВ, В. Н. НИКИТИН
(ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», Новосибирск)

РАЗРАБОТКА СОВМЕЩЕННОЙ НАВИГАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПИЛОТИРУЕМОЙ АЭРОГЕОФИЗИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Комплексная электромагнитная аэрогеофизическая съемка выполняется, как правило, с использованием пилотируемых носителей. В процессе съемки на борту, как правило, находятся дополнительные члены экипажа – оператор-геофизик и внештатный штурман.

Доклад посвящен разработке объединенной навигационно-измерительной системы, рассмотрены ее функции и архитектура, предложен интуитивно-понятный интерфейс, позволяющий пилотам выполнять съемку без привлечения дополнительных членов экипажа.

Введение. Аэрогеофизическая съемка, в частности электромагнитная разведка методом становления поля в комплексе с магнито- и спектрометрией, эффективно применяется для выполнения инженерно-геофизических и инженерно-геологических изысканий [1–5].



Рис. 1. Схема электромагнитного измерительного комплекса на примере «Импульс-Аэро»

Как правило, для выполнения таких съемок используются сложные геофизические измерительные системы, включающие в себя электроразведочные приемно-генераторные конструкции (платформы). За рубежом подобные измерительные системы используются достаточно широко, в частности такими компаниями, как Furgo N.V., Geotech, U.S. Geological survey и др. [4, 5]. Примером отечественных разработок в данной области могут служить вертолетные электромагнитные комплексы с выносными платформами серии «Импульс-Аэро» (рис. 1) («Сибгеотех», «Аэрогеофизическая разведка») [2, 3].

Съемочная аппаратура таких комплексов частично располагается на борту носителя, однако электромагнитные (ЭМ) измерительные системы выносятся за борт на трос-кабеле на платформу. Например, для измерительных систем серии «Импульс» (рис. 1) длина кабеля составляет 30-50 м, типичный диаметр платформы составляет около 15-25 м. Масса может достигать 450-750 кг. Применяемый гамма-спектрометр также может иметь внушительную массу – около 200 кг. Съемка с применением указанного комплекса выполняется с обтеканием рельефа на скорости 80-130 км/ч.

Несмотря на общую тенденцию в аэрогеофизике, аэрофотосъемке и других отраслях к вытеснению пилотируемых летательных аппаратов беспилотными авиационными системами (в первую очередь при магниторазведке [6–10]), комплексная многометодная аэроэлектромагнитная съемка выполняется с пилотируемыми носителями.

Это обусловлено несколькими факторами: массогабаритными характеристиками измерительной аппаратуры, сложностью пилотирования в силу наличия выносных конструкций, выполнением съемки на сверхнизких высотах (на уровне 30-50 м над земной поверхностью).

Как следствие, при выполнении таких съемок необходимо уделять особое внимание управлению летательным аппаратом с обеспечением безопасности пилотирования, снабжением пилотов и экипажа необходимыми навигационными и информационными данными, а также про-

ведением мониторинга качества получаемой измерительной информации во избежание брака и повторных залетов.

Эти задачи решаются навигационной штатной аппаратурой, дополняемой нештатными авиационными приемниками глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и специальными программно-аппаратными съемочными комплексами для агрегации и мониторинга измерений геофизических датчиков. Указанные системы требуют наличия оператора-геофизика, а также внештатного штурмана (который, однако, может отсутствовать при использовании специализированных навигационных комплексов и выполнении предполетного обучения пилотов).

Предлагаемый доклад посвящен разработке совмещенного навигационно-измерительного комплекса, применение которого устраняет необходимость в наличии нештатного персонала на борту летательного аппарата во время съемки.

Навигационное обеспечение съемки. Вопросы навигационного обеспечения регламентированы в инструкциях по каждому виду съемки [11, 12], описываются в методических пособиях [13, 14], а также конкретизируются в техническом задании, при составлении которого указанные источники должны учитываться. Главными задачами навигационного обеспечения является выдерживание съемочных маршрутов с контролем уклонений внутри заданных допусков. Также контролю подлежат скорость съемки, высота над земной поверхностью и другие навигационные параметры [15]. В случае значительных отклонений навигационных величин от допустимых пределов принимается решение о повторной съемке текущего маршрута.

Решение указанных задач выполняется посредством применения авиационных ГНСС-приемников (например, CCNS [16]), высотомеров, а также штатной аппаратуры летательного аппарата. Существуют также различные специализированные навигационные комплексы [17, 18]. При непосредственном участии авторов разработан навигационный комплекс на основе программы RouteNav [19, 20] для нужд аэрогеофизики.

Одним из преимуществ данной программы является простой пользовательский интерфейс, максимально приближенный к виду современных автомобильных и пеших навигаторов (и навигационных приложений смартфонов), что требует от пилотов минимального обучения.

Мониторинг геофизических измерений. Комплексная геофизическая съемка требует выполнения агрегации и мониторинга данных с различных геофизических датчиков, их анализ в реальном времени и, при наличии сбоев, принятия решения о повторном прохождении текущего маршрута или прекращении съемки.

Примером такой программы может являться программный комплекс QAeroRecorder, разработанный в ЗАО «Аэрогеофизическая разведка». Основные функции программы QAeroRecorder:

- вывод диагностической информации о состоянии подключенного оборудования;
- управление состоянием записи геофизической информации на внешний носитель, отображение статуса записи;
- логическое разбиение информации на маршруты в процессе съемки;
- установка меток-событий в процессе съемки;
- визуализация измеряемых сигналов ЭМ поля, напряженности магнитного поля вдоль текущего маршрута, графиков энергии гамма-квантов и производных численных характеристик, состояния сопутствующего оборудования;
- профилирование электромагнитного поля вдоль маршрута;
- визуализация текущей высоты и тревожное предупреждение о превышении максимально и минимально возможной дистанции «земля – платформа».

Интерфейс программы рассчитан на взаимодействие со специалистом, который на основе получаемой информации принимает решение о дальнейшей стратегии полета. Важно отметить, что в определенном приближении данная задача может решаться автоматически.

Концепция объединенной навигационно-съемочной системы. Объединенная система должна предоставлять пилоту информацию о текущем положении летательного аппарата относительно съемочных маршрутов и рекомендации по дальнейшей стратегии полета в виде предупреждений (в случае приближения навигационных и измеряемых величин к критическим

значениям) и предписаний (повторное прохождение или прекращение полета при наличии серьезных сбоев). В табл. 1 приведены текущие критерии принятия решений навигационно-измерительным комплексом о стратегии полета на основании анализа измеряемых навигационных и геофизических параметров.

Таблица 1

Критерии принятия решений навигационно-измерительного комплекса

Критерий		Условие	Оценка / действие
Навигационные данные	Боковое уклонение от текущего маршрута	Превышение ½ заданного предела	Предупреждение
		Превышение заданного предела	Брак (повторный залет)
	Высота полета	Превышение заданного предела	Предупреждение
	Путевая скорость	Превышение заданного предела	Предупреждение
Геофизические данные	Корректность работы геофизической аппаратуры	Отсутствие сигналов хотя бы одного прибора	Брак (повторный залет или завершение миссии)
	Соответствие сигналов протоколу и формату данных	Сбой потока данных хотя бы одного прибора	Брак (повторный залет или завершение миссии)
	Непрерывность данных	Пропуски данных (сбои измерительной аппаратуры)	Брак (повторный залет)
	Качество геофизической информации	Соответствие данных определенным критериям	Предупреждение или брак (в зависимости от критерия)

Объединенный навигационно-измерительный комплекс может быть реализован на основе QAeroRecorder и RouteNav (рис. 2).

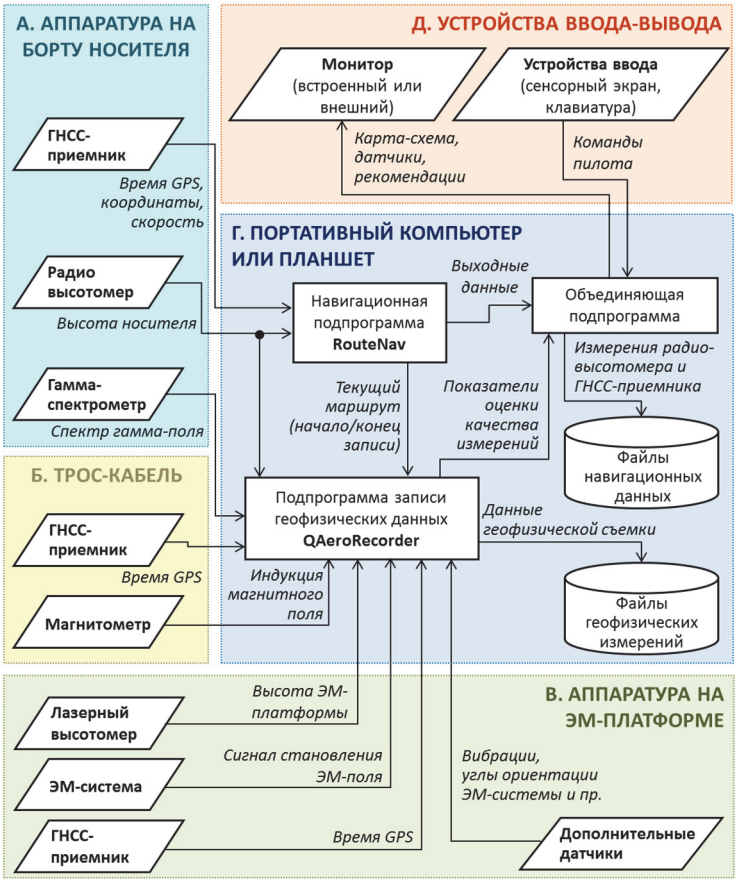


Рис. 2. Схема объединения навигационной и съемочной программ в единый навигационно-измерительный комплекс

Концепция данного объединения состоит в создании объединяющей подпрограммы на основе графического интерфейса RouteNav, дополнительно осуществляющего вывод рекомендаций от QAeroRecorder, а также обмена данными между указанными модулями.

Этот подход позволит пилоту выполнять съемку самостоятельно на основе рекомендаций объединенной программы.

Заключение. Предложенная объединенная навигационно-измерительная система должна в значительной мере повысить автоматизацию полета, предоставить пилоту максимально удобный интерфейс мониторинга навигационной и измерительной информации, что, в свою очередь, позволит ему выполнять съемку самостоятельно. Отсутствие нештатных членов экипажа на борту вертолета должно повысить безопасность полета, снизить издержки, а также освободить более 100 кг полезной нагрузки, которые могут быть использованы, в частности, под транспортировку дополнительного топлива для увеличения продолжительности единичного вылета.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kamenetsky, F.M., Stettler, E.H., Trigubovich, G.M.,** Transient Geo-Electromagnetics, Ludwig-Maximilian-University of Munich, Dept. of the Earth and Environmental Sciences, Section Geophysics, Munich, 2010, 296 p.
2. **Тригубович Г.М.** Инновационные поисково-оценочные технологии электроразведки становлением поля воздушного и наземного базирования // Разведка и охрана недр. 2007. №8. С. 80–87.
3. **Барсуков С.В., Белая А.А., Дмитриев Ю.Ю, Сверкунов А.С. [и др.]** Особенности построения высокоточной аэрогеофизической системы серии «Импульс-Аэро» // Недропользование. Горное дело. Новые направления и перспективы поиска и разведки месторождений полезных ископаемых Сибири: VIII междунар. научный конгресс «ИНТЕРЭКСПО ГЕО-Сибирь-2012», 10–20 апр. 2012 г. Новосибирск, 2012. Т. 1. С. 224–229.
4. **Exploration** trends and development – March 2013 [Elecronical resource] / Condor consulting. URL: http://www.condorconsult.com/downloads/Trends%20In%202012%20Northern%20Miner%20March%202013.pdf.2.
5. **Ball, L.B., Smith, B.D., Minsley, B.J., Abraham, J.D., et al.,** Airborne electromagnetic and magnetic geophysical survey data of the Yukon Flats and Fort Wainwright areas, Central Alaska, June 2010, U.S. Geological.
6. **Geophysics** Mini UAV / ECA Group [Electronic resource]. URL : https://www.ecagroup.com/en/solutions/geophysics-mini-uav.
7. **Tezkan, B., Stoll, J.B., Bergers, R., Großbach, H.,** Unmanned aircraft system proves itself as a geophysical measuring platform for aeromagnetic surveys, First Break, 2011, vol. 29(4), pp. 103–105.
8. **Stoll, J.B.,** Unmanned Aircraft Systems for Rapid near Surface Geophysical Measurements, International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Rostock, Germany, 2013, vol. XL-1/W2, pp. 391–394.
9. **Фирсов А.П., Злыгостев И.Н., Савлук А.В., Вайсман П.А., Вальд А.К., Дядьков П.Г., Колесов А.С., Шеремет А.С.** Применение беспилотных летательных аппаратов при геолого-геофизическом картировании // Материалы V Всероссийской научно-практической конференции «Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России», 31 марта – 2 апреля 2015 г. 2015. С. 529–533.
10. **Jean, M.,** Legault Airborne Electromagnetic Systems – State of the Art and Future Directions [Text] Recorder, 2015, vol. 40, no. 06, pp. 38–49.
11. **Инструкция** по магниторазведке (наземная магнитная съемка, аэромагнитная съемка, гидромагнитная съемка) / М-во геологии СССР. Л.: Недра, 1981.263 с.
12. **Инструкция** по топографо-геодезическому и навигационному обеспечению геологоразведочных работ. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1997. 106 с.
13. **Прихода А.Г., Лапко А.П., Мальцев Г.И., Бунцев И.А.** GPS-технология геодезического обеспечения геологоразведочных работ [Текст]: метод. рекомендации. Новосибирск: СНИИГГиМС, 2008. 274 с.
14. **Глаголев В. А**. Спутниковое навигационно-геодезическое обеспечение геофизических измерений в движении. СПб.: ВИРГ-Рудгеофизика, 2003. 104 с.
15. **Trigubovich, G.M., Shevchuk, S.O., Kosarev, N.S., Nikitin, V.N.,** Complex Technology of Navigation and Geodetic Support of Airborne Electromagnetic Surveys [Text], Gyroscopy and Navigation, 2017, vol. 8, no. 3, pp. 226–234.
16. **CCNS-5** / IGI – Integrated Geospatial Innovations [Electronic Resource]. URL: http://www.igi-systems.com/ccns-5.html.
17. **Жодзишский, П.Ю., Пухов В.А.** Повышение эффективности выполнения аэрогеофизических исследований [Текст] // Геопрофи. 2010. № 2. С. 23 –25.
18. **Технологии** / ООО «Геолого-геофизическая компания» [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.geogk.ru/rus/technologies.shtml.
19. **Шевчук, С.О.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614500 / Российская Федерация / Программа для навигационного обеспечения аэрогеофизических работ RouteNav [Текст] / С. О. Шевчук, С. В. Барсуков; заявитель и правообладатель Закрытое акционерное общество «Аэрогеофизическая разведка» (RU); дата поступления 09 янв. 2017 г.; дата регистрации 18 апр. 2017 г.
20. **Шевчук С.О.** Программа для навигационного обеспечения аэрогеофизических работ RouteNav // Вестник СГУГиТ. 2017. №4. (22). С. 113–125.

G.M. Trigubovich, S.O. Shevchuk, A.S. Sverkunov (Aerogeophysical surveys CSJC, Novosibirsk, Russia), N.S. Kosarev, V.N. Nikitin (Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk)

DEVELOPING A JOINT NAVIGATION AND MEASURING COMPLEX FOR AERIAL GEOPHYSICAL SURVEY FOR MANNED AIRCRAFT

Complex aerial geophysical survey is provided by manned vehicles in most of cases. Due to the survey the additional crew members (geophysicist and navigator) are necessary. In the article the joint navigation and measuring complex for manned geophysical aerial survey is considered. The main goal is to provide the survey by pilots without additional crew at the board.

Секция 5

■ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ ■

А. В. СОКОЛОВ, А. А. КРАСНОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

А. Б. КОНОВАЛОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»)

АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КВАРЦЕВОЙ УПРУГОЙ СИСТЕМЫ МОБИЛЬНОГО ГРАВИМЕТРА

Описана усовершенствованная технология изготовления кварцевой упругой системы гравиметров серии «Чекан». Развитие технологии было направлено на автоматизацию процессов изготовления составных частей упругой системы с целью повышения качества и производительности работ. Приведены результаты стендовых и объектовых испытаний упругой системы, изготовленной с использованием усовершенствованной технологии.

Введение. Чувствительный элемент морского гравиметра в виде двойной кварцевой упругой системы, помещенной в демпфирующую жидкость, был предложен более полувека назад в Институте физики Земли. За прошедшие годы создано несколько поколений гравиметрических комплексов на основе чувствительного элемента данного типа [1].

Технология изготовления кварцевой системы все годы оставалась неизменной [2]. Она заключается в обработке кварцевых заготовок и ручной сборке упругой системы при нагреве кварца до температуры около 2000ºС. Упругая система является миниатюрной: габаритные размеры деталей в современных гравиметрах не превышают 60 мм, а их диаметр составляет от 0,08 до 2 мм. Таким образом, ручное изготовление кварцевой упругой системы доступно только опытному мастеру, а продолжительность его работы может составлять до одного месяца.

В настоящее время сохраняется потребность в проведении высокоточных гравиметрических работ в интересах геологоразведки, геодезии и высокоточной инерциальной навигации [3–6]. Широкий круг задач выполняется с использованием современных гравиметров серии «Чекан» [7, 8]. Поэтому актуальной является задача сохранения и усовершенствования технологии изготовления кварцевой упругой системы гравиметров данной серии, которой и посвящена настоящая работа.

Конструкция упругой системы и изготовление кварцевых стержней. Элементы кварцевой упругой системы гравиметра схематично изображены на рис. 1. Нити предварительно закручены на угол ϕ таким образом, что маятник находится в положении, близком к горизонтальному. При изменении силы тяжести маятник отклоняется от горизонта, образуя угол $\Delta\phi$. Для измерения этого угла к маятнику приварено зеркало (на рисунке не показано). С целью компенсации влияния горизонтальных ускорений в единый корпус устанавливаются две

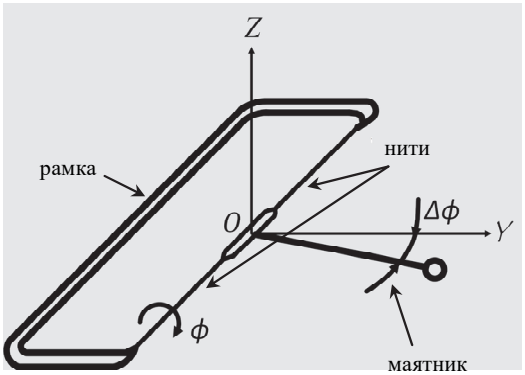


Рис. 1 Элементы упругой системы

упругие системы, в которых маятники расположены навстречу друг другу. При изготовлении важно обеспечить идентичность геометрических размеров и упругости одинарных систем, так как их различие нивелирует преимущества описанной системы перед другими типами чувствительных элементов мобильных гравиметров [9]. Для демпфирования маятников корпус упругой системы заполняется вязкой жидкостью.

Заготовками для элементов упругой системы: нитей, маятников и рамок – являются кварцевые стержни соответствующих диаметров. Для их изготовления предложено использовать новую технологию и оборудование, применяемые в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» для вытяжки специального волокна при производстве волоконно-оптических гироскопов. В лабораторной башне OFC-20SF из преформ вытягивают кварцевые стержни различных диаметров от 0,5 до 2 мм, используемые для изготовления деталей упругой системы. Автоматическая подстройка скорости вытяжки волокна обеспечивает высокую точность изготовления стрежней, которая составляет 0,005 мм и недоступна при ручной обработке заготовок. Очевидно, что реализованная автоматизированная технология и традиционная ручная несопоставимы по точности, экологичности и производительности.

Вытяжка нитей и сборка упругой системы. Единственным недостатком описанной технологии является невозможность вытяжки волокна диаметром 0,08 м для нитей упругой системы. Минимальную толщину волокна ограничивают высота башни и скорость вытяжки. В связи с этим было принято решение формировать на установке OFC-20SF заготовки диаметром 0,5 мм, из которых затем вытягивать нити требуемого диаметра.

Ручной процесс вытягивания нитей представляет собой одну из самых сложных операций в работе мастера-кварцедува. На одну упругую систему требуется две пары идентичных нитей, изготовление которых даже у кварцедува с многолетним опытом работы занимает несколько дней. Учитывая сложность данной операции, было предложено ее автоматизировать, применив описанное в [2] технологическое приспособление. В разработанном приспособлении кварцевая заготовка крепится между двумя колодками. Кварцедув с использованием пламени горелки размягчает кварцевый стержень, а затем по его сигналу пневматическая схема с заданной скоростью раздвигает колодки на расстояние, соответствующее длине нити упругой системы. Предусмотрен также режим медленного сдвига колодок для контроля симметричности вытянутой нити. Сразу после изготовления на отдельном технологическом приспособлении выполняется проверка упругости нити и прочности на кручение.

Диаметр вытягиваемой нити зависит от толщины заготовки, скорости движения колодок и ширины размягченного участка стержня. Из-за постоянства толщины заготовок и стабильной скорости раздвижения колодок приспособление обеспечивает высокую степень идентичности кварцевых нитей. Так, для партии нитей в количестве 30 шт. разброс значений длины не превысил 7%, а упругости – 10%. Необходимо отметить, что изготовление партии нитей, вместе с контролем их симметричности и упругости, было выполнено за 5 ч. Изготовление аналогичной партии по традиционной технологии даже у опытного кварцедува потребовало бы на два порядка большего времени.

Дальнейшее совершенствование приспособления может быть направлено на синхронизацию моментов времени нагрева кварцевого стержня и раздвигания колодок, что позволит стабилизировать ширину размягченного участка заготовки и еще более повысит идентичность вытягиваемых нитей.

Следует отметить важность постоянства разогревающего пламени не только при вытягивании нитей, но и при выполнении каждой технологической операции по изготовлению деталей и сборке упругой системы. Операции с кварцевыми заготовками (изгиб, резка, приваривание) требуют типов пламени, характеризующихся различным соотношением водорода и кислорода в подаваемой на горелку газовой смеси. Поэтому магистрали подачи водорода и кислорода были оборудованы автоматическими системами регулировки рабочего давления, построенными на базе электронных расходомеров Siera Smart-Trak 100. Отказ от ручной регулировки пламени при работе с газовой горелкой существенно упростил работу кварцедува.

Когда все детали упругой системы готовы, выполняется ее сборка, состоящая из последовательности из десяти технологических операций. Наиболее важными операциями являются термокомпенсация одинарных систем и приваривание свинцового груза на маятники. С целью повы-

шения качества изготовления упругой системы и производительности работы кварцедува для каждой операции спроектированы и изготовлены специализированные технологические приспособления.

С применением описанной технологии был изготовлен опытный образец упругой системы гравиметра, внешний вид которой представлен на рис. 2.



Рис. 2 Внешний вид упругой системы

Заполнение корпуса демпфирующей жидкостью. После сборки кварцевой системы производится заполнение корпуса полиметилсилоксановой жидкостью ПМС-30000. Из-за вязкости жидкости заполнение производится под вакуумом. Также вакуум необходим для того, чтобы не допускать образования пузырей воздуха внутри корпуса собранной упругой системы. Для выполнения данной операции была адаптирована установка для заполнения жидкостью поплавковых акселерометров и гироскопов, разработанная и внедренная в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Установка состоит из насоса и вакуумной камеры, представляющей собой притертый к основанию прозрачный колпак, и обеспечивает средний вакуум порядка 1 мм рт. ст. Заполнение производится капельным путем при нагреве жидкости до температуры 45ºС; вся процедура занимает около 8 ч.

Юстировка собранной упругой системы. Отладка собранной и заполненной жидкостью упругой системы производится с использованием оптико-электронного преобразователя из состава штатной системы съема данных в чувствительном элементе гравиметров серии «Чекан». Преобразователь работает в автоколлимационном режиме. Положению маятников кварцевой системы соответствуют изображения светящейся щели на КМОП-матрице преобразователя. При отладке выполняется юстировка положения маятников в поле зрения оптико-электронного преобразователя, обеспечивается необходимый запас упругой системы по диапазону, а также выставка по углу отклонения от горизонта. Также методом наклона в гравитационном поле производится предварительная оценка масштабного коэффициента и постоянной времени упругой системы.

Результаты испытаний упругой системы. Изготовленный по новой технологии образец упругой системы был установлен в гравиметр серии «Чекан» и подвергнут расширенным конструкторским испытаниям.

В результате стендовых испытаний получено, что среднеквадратическая погрешность гравиметра от воздействия ускорений качки не превысила $1 \cdot 10^{-6}$ м/с^2. Натурные испытания проводились в акватории Ладожского озера на борту малоразмерного катера. Была выполнена сеть измерительных галсов в районе размером 10 × 20 км. Точность съемки оценивалась по невязкам измерений в точках пересечения галсов и составила $3 \cdot 10^{-6}$ м/с^2. В результате работ построена гравиметрическая карта масштаба 1:100 000. Результаты стендовых и натурных испытаний упругой системы, изготовленной по усовершенствованной технологии, подтвердили полное соответствие требованиям, предъявляемым к чувствительным элементам современных гравиметров серии «Чекан».

Заключение. В АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разработана и внедрена автоматизированная технология изготовления кварцевой упругой системы гравиметров серии «Чекан». Она использует современные достижения фотоники, вакуумных и оптоэлектронных технологий. Автоматизация наиболее сложных и трудоемких операций позволила повысить качество изготовления упругой системы, в десятки раз увеличить производительность работы мастера, а также снизить требования к квалификации кварцедува.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ 18-19-00627.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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. Т. 27. №4 (107). 2019. С. 162–180.
2. **Кочетков Б.М., Попов Е.И.** Упругая система морского гравиметра // Аппаратурные и опытно-методические работы по морской гравиметрии. М.: Наука. 1973. С. 6–31.
3. **Пешехонов В.Г. и др.** Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 390 с.
4. **Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Погорелов В.В. и др.** Изученность гравитационного поля Арктики – состояние и перспективы // Физика Земли. 2016. №3. С.113–122.
5. **Соколов А.В., Краснов А.А., Кузьмина Н.В., Яшникова О.М.** Пути решения проблемы уклонений отвесной линии как источника ошибок инерциальных навигационных систем // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2019. С.1342–1347.
6. **Носов А.С., Степанов О.А., Торопов А.Б.** Навигационная информативность геофизических полей и выбор траекторий в задаче уточнения координат с использованием карты // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. №5. С. 74–92.
7. **Соколов А.В., Краснов А.А., Железняк Л.К.** Методы повышения точности морского гравиметра // Гироскопия и навигация. Т. 27. №2 (105). 2019. С. 70–81.
8. **Соколов А.В., Краснов А.А., Коновалов А.Б.** Измерения ускорения силы тяжести с борта воздушных носителей различных типов // Измерительная техника. №6. 2016. С. 10–13.
9. **Железняк Л.К., Попов Е.И.** Упругая система гравиметра типа УСГ // Приборы и методы обработки гравиинерциальных измерений. М.: Наука. 1984. С. 54–66.

A.V. Sokolov, A.A. Krasnov (Concern CSRI Elektropribor, JSC; ITMO University, Saint Petersburg, Russia), A.B. Konovalov (Concern CSRI Elektropribor, JSC)

AUTOMATION OF MANUFACTURING TECHNOLOGY OF MOBILE GRAVIMETER QUARTZ ELASTIC SYSTEM

An improved technology for manufacturing quartz elastic system of Chekan gravimeters is described. The aim of this technology development was to automate the processes of the elastic system components manufacturing in order to improve the work quality and performance. The results of bench and field tests of an elastic system made by the advanced technology are presented.

А. Ю. ФИЛИППОВ С. Н. ФЕДОРОВИЧ, А. Г. ЩЕРБАК
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РОТОРОВ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Представлен комплекс технологических решений, позволяющих оптимизировать процесс изготовления и обеспечить совокупность требований, предъявляемых к сферическим роторам электростатических гироскопов. Рассмотрены основные этапы технологического процесса формирования функциональных параметров роторов, включая диффузионную сварку, прецизионную сферодоводку и балансировку. Приведены практические результаты изготовления роторов и перспективы повышения точности.

Введение. Совершенствование гироскопа с электростатическим подвесом ротора (ЭСГ) требует решения комплекса задач, среди которых важнейшей является обеспечение более жестких требований к параметрам сферического ротора [1, 2]. Поскольку в электростатическом подвесе на ротор действуют силы, нормальные к поверхности, то в роторе, имеющем форму идеального шара, момент электростатических сил относительно центра будет равен нулю [3]. Поэтому для минимизации уводящих моментов жесткие требования предъявляются не только к дисбалансу, но и к параметрам, определяющим форму ротора. Так, величина осевого и радиального дисбаланса не должна превышать сотых долей микрометра, а амплитуды гармоник отклонений формы от заданной конфигурации – сотых и тысячных долей микрометра. Качество сферической поверхности ротора отвечает тринадцатому классу шероховатости, что соответствует требованиям, предъявляемым к металлооптике. Обеспечение столь жестких требований является чрезвычайно сложной технической задачей, поэтому технологическим аспектам процесса изготовления сферических роторов ЭСГ уделяется особое внимание.

Постановка задачи. Алгоритм процесса изготовления ротора включает три основных этапа, на которых последовательно формируются функциональные параметры ротора. На первом этапе осуществляется формообразование сферической заготовки и создание моментов инерции ротора. Основной операцией при изготовлении полого ротора здесь является диффузионная сварка в вакууме (ДСВ) по плоскостям разъема двух полусферических оболочек с переменной, монотонно уменьшающейся от экватора к полюсу, толщиной стенки или, для сплошного ротора, сварка армирующих элементов с бериллиевой основой. На втором этапе обеспечиваются наиболее важные параметры, во многом определяющие точность ротора: дисбалансы, форма и диаметр ротора. На заключительном, третьем этапе процесса изготовления формируются триботехнические и оптические свойства [4].

В качестве материала при изготовлении роторов различных модификаций ЭСГ широко используется бериллий, специфические свойства которого необходимо учитывать при формировании функциональных параметров ротора [5]. Общепринятая технология изготовления роторов базируется на двух основополагающих принципах. Во-первых, каждая предыдущая операция должна создавать оптимальные условия и предпосылки для выполнения последующих операций, а во-вторых, на каждой последующей операции необходимо сохранять значения параметров ротора, полученные на предшествующем этапе. Решение проблемы повышения точности ротора ЭСГ возможно при комплексном подходе к построению технологии, когда учитываются особенности и взаимосвязь, а также обеспечивается согласованность основных технологических операций изготовления ротора.

Цель работы заключалась в выявлении и согласовании комплекса взаимосвязанных технических решений, позволяющих в конечном итоге обеспечить технические требования к ротору ЭСГ.

Формирование сферической заготовки. Основной операцией на данном этапе для полого ротора является ДСВ по плоскостям разъема бериллиевых полусфер с обеспечением их надежного соединения. Формирование условий для повышения эффективности последующей балан-

сировки и сферодоводки ротора обеспечивалось оптимизацией процесса сварки [6, 7]. Моделирование термомеханического цикла сварки и распределения напряжений в деформируемой области полусфер методом конечно-элементного анализа позволило выявить технические решения по оптимизации ДСВ, основанные на управлении процессом последовательного деформирования элементов сварочного модуля и деформации осадки одноосного сжатия фланцев полусфер с компенсацией этой деформации. При этом процесс деформирования соответствует условиям высокотемпературной установившейся ползучести бериллия, а в термомеханическом цикле сварки предусмотрен этап релаксации сварочных напряжений и термической стабилизации материала ротора, что минимизирует напряжения в роторе и обеспечивает условия для повышения точности его изготовления [8, 9].

Корректировка масс и прецизионная сферодоводка. Корректировка масс, связанная с устранением дисбаланса ротора, и формирование точной сферы с обеспечением заданного диаметра являются важнейшими операциями, определяющими точность гироскопа, а требуемые значения дисбаланса и точности обеспечения формы нормируются сотыми и тысячными долями микрометра. На данном этапе необходимо решать две основные задачи – создание специализированного нестандартного оборудования [10, 11], с помощью которого можно обеспечить эти точности, и устранение противоречий между операциями направленной доводки при корректировке дисбаланса и сферодоводки [4].

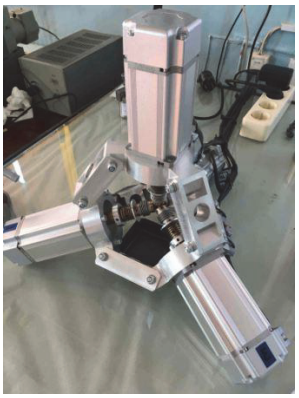


Рис. 1. Сферодоводочный стенд с пространственно-равномерным расположением шпинделей

Для обеспечения требуемой кинематики и условий функционирования традиционно использовался трехшпиндельный доводочный стенд, имеющий привод, вращательное движение на притиры от которого передавалось с помощью редукторной передачи. На первом этапе совершенствование стендового оборудования осуществлено за счет сообщения вращения каждому шпинделю от своего шагового двигателя, управляемого по заданной автономной программе. Поскольку было установлено, что использование машин с планарной трехшпиндельной компоновкой имеет ограничения по достигаемой точности, то потребовалась разработка принципиально нового оборудования с моделированием процесса движения обрабатываемой сферы при пространственно-равномерном расположении четырех шпинделей (рис. 1) [12]. При создании модели были выполнены исследования трибологических процессов в паре «притир–ротор» для различных материалов притиров и абразивных суспензий, определено оптимальное пространственное расположение притиров и параметры их движения [13]. Последовательная модернизация и совершенствование конструкции оборудования позволила для бериллиевых роторов уменьшить амплитуды гармоник (начиная с третьей) до единиц нанометров.

Исключение противоречий между операциями направленной доводки и сферодоводки связано с использованием таких перспективных методов, как устранение при направленной доводке преимущественно радиального дисбаланса с получением требуемого диаметра ротора и последующая финишная корректировка дисбаланса посредством формирования на поверхности ротора выемок расчетной конфигурации [14].

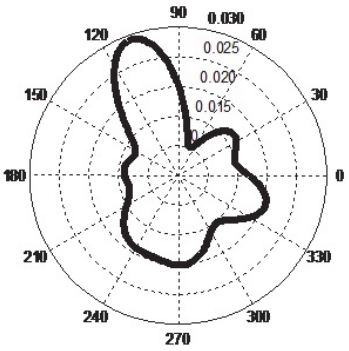


Рис. 2. Шпиндельная ошибка кругломера Talyrond 73

Обеспечение указанных точностей дисбаланса и формы ротора во многом связано с метрологическими аспектами. Установлено, что значения контролируемых геометрических параметров роторов стали сравнимы с погрешностями используемого кругломера Talyrond 73 [15]. Было показано, что основная погрешность обусловлена шпиндельной ошибкой (рис. 2), которую на достаточном длительном временном промежутке можно считать постоянной. Исходя из этого, был предложен и внедрен метод учета данной погрешности измерений. Вторая проблема обусловлена тем, что требования к форме поверхности ротора предъявлялись к параметрам,

характеризуемым значениями амплитуд гармоник формы, полученных усреднением измерений в четырех меридиональных сечениях. Обычно ограничиваются четвертой–шестой гармониками ряда Фурье, поскольку для более высокочастотных членов ряда амплитуды гармоник быстро убывают. Недостатком данного метода осреднения является то, что фаза гармоник в каждом конкретном сечении не учитывается, и этот параметр проявляет себя как случайная величина, вносящая погрешности в оценку формы ротора.

Ю.Г. Мартыненко [3] установил, что наиболее полную информацию о форме ротора дают параметры, описывающие «ометаемый» объем, которые позволяют более адекватно моделировать силы и моменты, действующие на взвешенное в электростатическом подвесе тело. Под ометаемым объемом понимается виртуальная форма ротора, описываемая средним для данной широты радиусом ротора [16]. Представленные исследования позволяют повысить точность электростатического гироскопа путем создания более адекватной математической модели его поведения за счет учета при описании формы ротора физики взаимодействия его с силовым полем подвеса. При этом при изготовлении и паспортизации параметров ротора одним из основных критериев является степень отклонения формы поверхности от базовой, в качестве которой, в зависимости от типа ЭСГ, может выступать для сплошного ротора сфера, а для полого – эллипсоид.

Формирование триботехнических и оптических параметров. Эти параметры создаются посредством нанесения на поверхность ротора тонкопленочного покрытия нитрида титана и выполнения на покрытии методом лазерного маркирования растрового рисунка [4]. Основной задачей в данном случае является сохранение значений дисбаланса и формы, полученных на предшествующих операциях балансировки и сферодоводки, что связано с решением многокритериальных и многоцелевых задач. Эффективным является выбор оптимального варианта из альтернативных технических решений [17], например обеспечение условий корректировки дисбаланса за счет смещения центра сферического напыленного слоя относительно геометрического центра ротора, что задается либо переменным расстоянием от источника при нанесении покрытия, либо переменной скоростью вращения ротора [4, 18]. Перспективным направлением исследований является создание методов управления оптическими характеристиками растрового рисунка за счет модификации поверхности при нанесении наноразмерных слоев пигментообразующих материалов [19]. Это позволяет уменьшить толщину покрытия и интенсивность лазерного воздействия на ротор, снижая влияние этих факторов на точность формы и дисбаланс ротора.

Заключение. Разработка эффективных технологий изготовления таких узлов, как ротор ЭСГ, требуют комплексных исследований на основе системного моделирования с выявлением научно обоснованной совокупности согласованных технических решений. Важным аспектом является сопоставление процесса формирования функциональных параметров и последовательности технологических операций при изготовлении ротора с выявлением альтернативных методов и средств технологии. Оптимизация технологии обусловлена тем, что при формировании функциональных параметров ротора учитываются особенности предшествующих, и создаются условия для наиболее эффективного выполнения последующих операций. При этом наибольшая эффективность может быть обеспечена выявлением технических решений, позволяющих решать многоцелевые и многокритериальные задачи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1 (72). С. 3–17.
2. **Ландау Б.Е. и др.** Бескарданная инерциальная система ориентации на электростатических гироскопах для орбитального космического аппарата // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54. № 6. С. 66–74.
3. **Мартыненко Ю. Г.** Движение твердого тела в электрических и магнитных полях. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 368 с.
4. **Юльметова О.С.** Ионно-плазменные и лазерные технологии в гироскопическом приборостроении. Диссертация … доктора технических наук. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019 г. 244 с.
5. **Филиппов А.Ю., Федорович С.Н., Ганенко А.А., Щербак А.Г.** Исследование структурно-чувствительных характеристик бериллия, применяемого при изготовлении прецизионных деталей точного

приборостроения // Материалы XXIX конференции памяти Н.Н. Острякова. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2014. С. 58–64.
6. **Щербак А. Г., Кедров В. Г.** Прецизионная технология диффузионной сварки узлов точного приборостроения. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1997, 166 с.
7. **Патент РФ № 2085348**. Способ диффузионной сварки полусфер ротора шарового гироскопа. В.Г. Пешехонов, А.С. Анфиногенов, А.Г. Щербак, В.Г. Кедров, Б.Н. Агроскин, Ю.А. Ежов, С.М. Осипов, О.И. Парфёнов, Р.И. Андреев, опубликовано 01.07.1994.
8. **Елисеев Д.П., Леонова Т.Г., Федорович С.Н., Филиппов А.Ю., Щербак А.Г.** Применение методов рентгенографии для анализа качества сварного соединения бериллиевых деталей // В мире неразрушающего контроля. 2020. Т. 23. №1. С. 76–80.
9. **Патент РФ № 2713033,** Способ изготовления ротора шарового гироскопа. Филиппов А.Ю., Елисеев Д.П. Федорович С.Н., Леонова Т.Г., Щербак А.Г. Опубликован 03.02.2020, бюллетень № 4.
10. **Орлов П.Н.** Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки. М.: Машиностроение, 1988. 384 с.
11. **Федорович С.Н.** Современное состояние и перспективы развития технологии сферодоводки прецизионных узлов // Металлообработка. 2018. № 1 (103). С. 52–57.
12. **Федорович С.Н., Филиппов А.Ю.** Разработка средств технологического оснащения процесса формообразования сферических роторов шаровых гироскопов // Материалы XVIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». 2016.
13. **Федорович С.Н.** Перспективные технологии прецизионной сферодоводки // Материалы XIX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». 2017.
14. **Филиппов А.Ю., Ландау Б.Е., Юльметова О.С., Беляев С.Н., Новиков В.И., Щербак А.Г.** Балансировка сплошного ротора электростатического гироскопа // Металлообработка. 2016. № 6 (100). С. 62–68.
15. **Федорович С.Н.** Метод оценки формы в технологическом цикле изготовления сферического ротора // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», 2018.
16. **Федорович С.Н., Ландау Б.Е., Леонова Т.Г., Филиппов А.Ю.** Совершенствование методов оценки формы ротора как фактор повышения точности электростатического гироскопа // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 345–350.
17. **Юльметова О.С., Щербак А.Г.** Интерпретация альтернативных целевых функций при моделировании процесса балансировки сферических узлов // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 4. С. 143–148.
18. **Патент РФ № 2638870.** Способ изготовления ротора электростатического гироскопа и устройство для осуществления. О.С. Юльметова, М.А. Туманова, А.Ю. Филиппов, С.Н. Беляев, А.М. Фомичев, А.Г. Щербак, опубликовано 18.12.2017, бюллетень № 35.
19. **Павлова М.В., Юльметова О.С., Щербак А.Г.** Технология формирования тонкопленочного хромового покрытия на сферических узлах // XXVIII Международной научно-технической конференции «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации». Сборник трудов. М., 2019. С. 51–52.

A.U. Filippov, S.N. Fedorovich, A.G. Scherbak (Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg)

THE INTEGRATED APPROACH TO THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING ELECTROSTATIC GYRO ROTORS

A set of technological solutions is presented that allows to optimize the manufacturing process and ensure the set of requirements for spherical rotors of electrostatic gyroscopes. The main stages of the technological process of creating rotors, including diffusion welding, precision spherical lapping and balancing, are considered. The practical results of the manufacture of rotors and the possibilities of increasing the accuracy are presented.

А. Ю. ФИЛИППОВ, С. Н. ФЕДОРОВИЧ, А. Г. ЩЕРБАК
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ ТОНКОСТЕННЫХ ПОЛУСФЕР РОТОРА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Представлена модель диффузионной сварки по плоскостям разъема тонкостенных полусфер с созданием давления термического натяга. Выявлены целевые функции, управляющие факторы и значимые параметры процесса, основанного на построении термомеханического цикла сварки с управляемым микропластическим деформированием деталей и элементов сварочного модуля. Приведены примеры практической реализации выявленных технических решений и результаты испытаний, включая данные по прочности сварного соединения и размерной стабильности роторов.

Введение. Перспективы развития электростатического гироскопа (ЭСГ) во многом связаны с повышением точности обеспечения параметров бериллиевого ротора, что определяется уровнем технологического обеспечения процесса его изготовления, включая диффузионную сварку в вакууме (ДСВ) тонкостенных полусфер [1], где наиболее важной является проблема регулирования микропластических деформаций [2,3]. Использование локализации сварочного давления [4], необходимого для формирования надежного соединения, позволило существенно улучшить однородность кольцевого сварного шва и обеспечить его герметичность. Вместе с тем микропластические деформации при сварке непосредственно влияют и на прочность соединения, и на размерную стабильность ротора, нормируемую сотыми долями микрометра. Это обусловливает важность исследований по минимизации деформаций до уровня, обеспечивающего и требуемую прочность сварного соединения, и возможность релаксации сварочных напряжений. Поэтому актуальной технологической задачей является разработка методов и средств управления процессом микропластического деформирования.

Постановка задачи. Наиболее эффективной является технология ДСВ двух полусфер с наружными кольцевыми фланцами расчетной конфигурации [1], к которым прикладывается сварочное давление и которые удаляются при последующей обработке ротора. Сварочный модуль (рис. 1) представляет собой систему, обеспечивающую создание давления термического натяга $P_{\text{св}}$ и включающую свариваемые детали: 1 – фланцы полусфер, установленные с исходным зазором $\Delta_0^{\text{ä}}$, на которые передается давление $P_{\text{св}}$, кольцевые пуансоны 2 и стяжки 3, жестко фиксирующие пуансоны между собой.

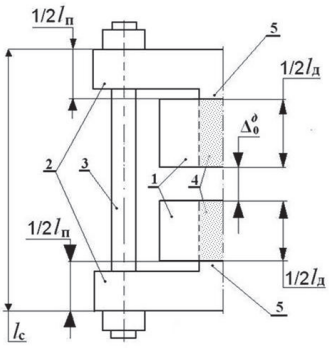


Рис.1. Сварочный модуль

При этом создание давления $P_{\text{св}}$ обеспечивается за счет разности величин термического коэффициента линейного расширения (ТКЛР) материалов стяжек $\alpha_{\text{с}}$, пуансонов $\alpha_{\text{п}}$ и бериллиевых полусфер $\alpha_{\text{д}}$. Давление $P_{\text{св}}$, определяемое зазором Δ_0^{∂}, высотой $l_{\text{д}}$, $l_{\text{п}}$, $l_{\text{с}}$ соответственно деталей, пуансонов и стяжек, а также физико-механическими (предел текучести) и теплофизическими (ТКЛР) свойствами материалов элементов модуля, обусловливает в процессе ДСВ в системе сварочного модуля пластические деформации $\Sigma\varepsilon = \varepsilon_{\text{д}} + \varepsilon_{\text{с}}$, включающие деформацию стяжек $\varepsilon_{\tilde{n}}$ и деформацию ε_{∂} осадки одноосного сжатия фланцев, при деформации пуансонов $\varepsilon_{\text{п}} = 0$ [1].

Управлять процессом деформирования, задавая температуру стыковки $T_{\text{ст}}$ изменением зазора $\Delta_0^{\ddot{a}}$ и формируя интервал температур $\Delta T_{\text{св}} = T_{\text{св}} - T_{\text{ст}}$, в котором осуществляется этот процесс, недостаточно эффективно. Это связано с неопределенностью расчета соотношения деформаций $\varepsilon_{\text{д}}$ и $\varepsilon_{\text{с}}$ в суммарной деформации $\Sigma\varepsilon$ элементов модуля. При этом оптимальным

условием [4, 5] является начало деформирования деталей при температурах не менее чем 0,8-0,9 от температуры сварки $T_{св}$.

Цель работы заключалась в выявлении комплекса технических решений, позволяющих обеспечить управляемый процесс микропластического деформирования при сварке роторов.

Моделирование процесса микропластического деформирования. Основными принципами построения технологии ДСВ, обеспечивающей управление процессом микропластического деформирования, являлись: разнесение во времени процессов деформирования стяжек и деталей и формирование термомеханического цикла сварки с началом процесса деформирования деталей при температурах 0,8-0,9 от $T_{св}$ [6].

Это задавалось выбором материала и геометрических размеров стяжек с обеспечением на первом этапе термомеханического цикла сварки преимущественного деформирования стяжек, а на втором этапе (по достижении температуры, близкой к $T_{св}$) – деформирования свариваемых деталей [7], осуществляемого в условиях высокотемпературной ползучести для максимальной эффективности процесса релаксации сварочных напряжений [4, 7].

Моделирование процесса ДСВ целесообразно осуществлять последовательными преобразованиями [8] соответствующих зависимостей и выражений, определяющих последовательные состояния системы сварочного модуля [1]. Для создания условий преимущественного деформирования деталей, начиная с температуры, близкой к $T_{св}$, вводится промежуточная температура $T_р$, определяемая из соотношения $T_{ст}<T_р<T_{св}$, и используется зависимость предела текучести материала $\sigma_{тт}$ от гомологической температуры процесса [9] (отношение текущей температуры T к температуре плавления этого материала $T/T_{пл}$) $\sigma_{тт} = \sigma_т\left(1-\frac{T}{T_{пл}}\right)^2$, где $\sigma_т$ – значение предела текучести материала при 298 К.

Выбирая материал стяжек с температурой плавления $T^{с}_{пл}$ большей, чем температура плавления $T^{д}_{пл}$ материала деталей, и оперируя при обозначении сопротивления элементов модуля пластическим деформациям понятием критического параметра $P_{кр}$, равного произведению предела текучести $\sigma_{тт}$ материала при данной температуре на площадь поперечного сечения (т.е. $P_{кр}=\sigma_{тт}\cdot S$), указанную схему можно реализовать, обеспечивая пересечение в заданной точке М (рис. 2) зависимостей $P^{д}_{кр}=P^{д}_{кр}(T)$ и $P^{с}_{кр}=P^{с}_{кр}(T)$ при определенной температуре равновесия $T_р$ в момент времени $t_р$. С учетом зависимости предела текучести $\sigma_{тт}$ от гомологической температуры и условия равенства критических параметров для стяжек и свариваемых деталей при температуре $T_р$ в точке М можно записать:

$$\sigma^{с}_{т}(1 - T_р/T_{пл})^2 S^{с} = \sigma^{д}_{т}(1 - T_р/T_{пл})^2 S^{д}, \quad (1)$$

где $S^{с}$ – площадь поперечного сечения стяжек, $\sigma^{с}_{т}$ и $\sigma^{д}_{т}$ – значения пределов текучести материалов стяжек и деталей при 298 К, а учитывая условие $T_р<T_{св}$, при достаточно близких значениях этих температур, т.е. задавая $T_р=K\cdot T_{св}$, где K – коэффициент, равный (0,8...0,9), выражение (1) можно представить в виде зависимости для определения площади $S^{с}$ [6]:

$$S^{с} = \frac{\sigma^{д}_{т}\cdot S^{д}}{\sigma^{с}_{т}}\cdot\frac{\left(T^{с}_{пл}\right)^2\cdot\left(T^{д}_{пл}-K\cdot T_{св}\right)^2}{\left(T^{д}_{пл}\right)^2\cdot\left(T^{с}_{пл}-K\cdot T_{св}\right)^2}. \quad (2)$$

Преобразуя выражение (2) и принимая коэффициент K в качестве оптимизируемого параметра, а $S^{с}$ – управляющего фактора, целевую функцию можно представить в виде

$$K = \frac{T^{с}_{пл}T^{д}_{пл}(1-\sqrt{C})}{T_{св}(T^{с}_{пл}-T^{д}_{пл}\sqrt{S^{с}})}, \quad (3)$$

где $C = \frac{\sigma^{с}_{т}}{\sigma^{д}_{т}S^{д}}$. Выбором коэффициента K задается температура $T_р$ и, соответственно, температурный интервал $\Delta T^{*}_{св} = T_{св} - T_р$ микропластического деформирования деталей.

Для второго этапа процесса ДСВ, на котором осуществляется микропластическое деформирование фланцев полусфер, моделирование связано с анализом изменения линейных размеров элементов сварочного модуля в интервале температур $\Delta T^{*}_{св} = T_{св} - T_р$. Соотнося в этом интерва-

ле деформацию фланцев с изменением линейных размеров элементов модуля при тепловом расширении, последовательными преобразованиями можно получить выражение

$$\varepsilon_{д} = \Delta T^{*}_{св}(l_{с}\alpha_{с} - l_{п}\alpha_{п} - l_{д}\alpha_{д}), \quad (4)$$

устанавливающее взаимосвязь между значимыми параметрами процесса ДСВ и определяющее основной управляющий фактор, которым является высота $l_{с}$ стяжек в сварочном модуле.

Оценка эффективности разработанных методов. В работе исследовался температурный диапазон сварки от 1193 до 1273 К. Задаваемая величина сварочных деформаций осадки одноосного сжатия каждого фланца была выбрана $\varepsilon_{д}$ = 0,04 мм.

Анализировались и сравнивались результаты сварки по двум режимам: режим 1 – с началом процесса деформирования деталей при температурах 0,85 от $T_{св}$ и режим 2 – традиционная технология ДСВ с температурой стыковки $T_{с}$ = 673К, задаваемой зазором $\Delta^{а}_{0}$.

Практическая реализация и сравнительная оценка результатов осуществлялась выбором в качестве материала стяжек ковара 29НК, имеющего ТКЛР при $T_{св}$ в пределах $\alpha_{с}$=(6,7–7,2)·10^{-6} 1/К, а материала пуансонов – стали Х18Н9Т с $\alpha_{п}$ = 20,4·10^{-6} 1/К) [10].

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости прочности соединения $\sigma_{св}$ от температуры сварки для режима 1 (кривая 1) и режима 2 (кривая 2). Из графиков следует плавное (экспоненциального типа) увеличение $\sigma_{св}$ с ростом $T_{св}$, что в целом характерно для процессов ДСВ. Из сравнения кривых 1 и 2 наглядно следует более высокая прочность соединения для режима 1 во всем диапазоне температур.

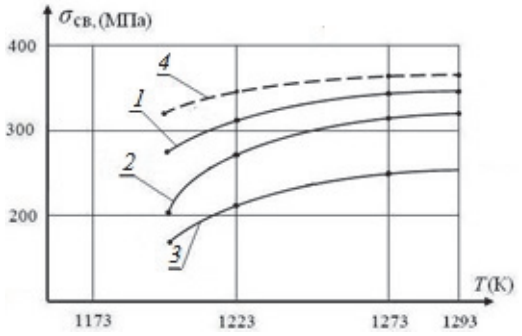


Рис.2. Зависимости прочности соединения от условий процесса сварки

Для наглядности на рис. 2 приведены зависимости $\sigma_{св}$= $\sigma_{св}(T_{св})$ для процесса ДСВ при $\Delta^{д}_{0}$=0 (кривая 3), т.е когда давление термического натяга создается в интервале 298К-$T_{св}$. Очевидно, что наибольшие значения $\sigma_{св}$ имеют место при классической схеме ДСВ (кривая 4) с приложением сварочного давления по достижении температуры сварки [1, 4, 5, 9].

Размерная стабильность сварных узлов определяется такой структурно-чувствительной характеристикой, как внутреннее трение (Q^{-1}), и его зависимостью от температурных воздействий [1].

Из сравнения температурных зависимостей Q^{-1} образцов для режима 1 и для режима 2 следует более высокая разменная стабильность узлов, полученных по первой схеме. Как непосредственно после сварки, так и после термообработки образцов, сваренных по режиму 1, уровень фона Q^{-1} существенно ниже, при этом на спектре $Q^{-1}(T)$ отсутствуют явно выраженные релаксационные максимумы. Анализ показывает, что максимальным сопротивлением микропластическим деформациям обладают образцы, сваренные по режиму 1, по сравнению с образцами, полученными по режиму 2.

Наглядное представление о размерной стабильности роторов дают результаты анализа изменения наиболее характерных для оценки формы ротора и условий его функционирования второй A_2 и третьей A_3 гармоники амплитудного спектра отклонений от сферической формы. В течение годичного цикла исследований у ротора, сваренного по режиму 1, гармоника A_2 имеет меньшую и более стабильную величину, не превышающую 0,02 мкм, тогда как для ротора, сваренного по режиму 2, значение этой гармоники колеблется в пределах 0,025-0,032 мкм. Гармоника A_3, соответственно, лежит в пределах 0,02-0,03 мкм и 0,04-0,055 мкм.

Заключение. На основе моделирования процессов деформирования при сварке полусфер ротора ЭСГ обоснована эффективность использования технического решения, связанного с разделением процессов деформипрвания в системе сварочного модуля на два этапа, на первом из которых осуществляется преимущественное деформирвание стяжек, а на втором – микропластическое деформирование свариваемых деталей, причем второй этап реализуется в температурном интервале $\Delta T_{св} = T_{св} - T_{ст}$, где $T_{ст}$=0,85$T_{св}$, со скоростью нагрева, обеспечивающей протекание процесса в условиях высокотемпературной ползучести. Экспериментальная

проверка подтвердила адекватность разработанных моделей и показала более высокие показатели прочности сварного соединения и размерной стабильности роторов по сравнению с роторами, изготовленными по традиционной технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Щербак А. Г., Кедров В. Г.** Прецизионная технология диффузионной сварки узлов точного приборостроения. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 1997, 166 с.
2. **Гаврюсев В.И., Беляев С.Н.** Исследование процессов микропластического деформирования при диффузионной сварке бериллиевых роторов электростатического гироскопа // Материалы XXIV конференции памяти Н.Н. Острякова. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2006.
3. **Беляев С.Н., Щербак А.Г**. Моделирование процессов сварки давлением прецизионных узлов с использованием различий в свойствах элементов сварочного модуля // Рефераты докладов XI Конференции молодых ученых. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2009.
4. **Каракозов Э.С.** Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 280 с.
5. **Конюшков Г.В., Копылов Ю.Н.** Диффузионная сварка в электронике. М.: Энергия, 1974. С. 73.
6. **Патент РФ № № 2713033** G01C 25/00. Способ изготовления ротора шарового гироскопа. Опубликовано 03.02.2020. Бюл. № 4.
7. **Чадек Й.** Ползучесть металлических материалов. Пер. с чешского. М.: Мир, 1987. 304 с.
8. **Чикуров Н.Г**. Моделирование систем и процессов: учебное пособие. М.: ИЦ РИОР, НИЦ ИНФРА-М, 2013. 398 с.
9. **Кочергин А.К., Шестаков А.И.** К вопросу о зависимости между давлением и температурой при прессовой и диффузионной сварке металлов // Сб. Сварка, Судостроение. 1968. №11. С. 118–120.
10. **Арзамасов Б.Н., Брострем В.А., Буше Н.А. и др.** Конструкционные материалы: Справочник. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.

A.Y. Filippov, S.N. Fedorovich, A.G. Scherbak (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

MODELING OF THE THERMOMECHANICS CYCLE OF DIFFUSION WELDING OF THIN-WALLED HEMISPHERES OF THE ROTOR OF THE ELECTROSTATIC GYROSCOPE

We modelled welding of thin-walled hemispheres along the equatorial plane with forming thermal strain. We found target functions, control factors and significant parameters of the process, based on creating a thermomechanics cycle of the welding with controlled microplastic deformation of elements of the welding module and parts. Examples of practical realization of new-found technical solutions and diagnostics results including durability of the welded joint and size stability of the rotors were shown.

М. В. ПАВЛОВА, М. А. ТИТ, О. С. ЮЛЬМЕТОВА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРА ШАРОВОГО ГИРОСКОПА

Представлен комплекс технологических методов и средств, обеспечивающий управление процессом формирования оптических параметров растрового рисунка ротора бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ). Обоснована эффективность нанесения сверхтонкого покрытия хрома для структурно-фазовой модификации поверхности. Определены управляющие факторы процесса модификации, позволяющие регулировать коэффициент отражения растра. Выявлены эволюция и механизм изменения цветовой гаммы и оптических характеристик на основе термодинамического анализа последовательных топохимических взаимодействий.

Введение. В современной технике в качестве датчиков угловой ориентации объектов широко применяются различные модификации электростатического гироскопа [1]. Наибольший интерес представляют используемые в космических объектах бескарданные электростатические гироскопы (БЭСГ) со сплошным сферическим бериллиевым ротором [2]. На поверхность ротора БЭСГ после его балансировки и доводки наносится износостойкое покрытие нитрида титана, на котором выполняется контрастный растровый рисунок [3] для считывания информации об угловом положении ротора в подвесе. Требования по оптическим параметрам растра связаны с коэффициентом контраста K, определяемым выражением $K = \frac{K_б - K_р}{K_б + K_р}$, где $K_б$ и $K_р$ – коэффициенты отражения базовой поверхности нитрида титана и растра, полученного локальной лазерной модификацией этой поверхности с образованием оксида титана, преимущественно TiO_2 [4]. Очевидно, что изменение контраста возможно за счет варьирования величины $K_б$ и $K_р$. При этом повышение контраста K за счет увеличения $K_б$ обусловлено формированием нитрида титана формулы TiN_x, где коэффициент x<1, при уменьшении парциального давления азота в процессе напыления покрытия. Это имеет определенные ограничения, т.к. термические коэффициенты линейного расширения нитрида титана зависят от его стехиометрии [5]. Уменьшение $K_р$ обусловлено большей интенсивностью лазерного воздействия на ротор при маркировке, что нежелательно, исходя из условия сохранения формы и дисбаланса ротора. Это определяет актуальность и важность исследований по расширению технологических возможностей регулирования оптическими характеристиками растрового рисунка.

Постановка задачи. Цель работы заключалась в создании технологических методов и средств управления процессом формирования оптических параметров растрового рисунка на роторе БЭСГ. В качестве исходного принципа при разработке технологии было выбрано использование дополнительных наноразмерных пигментных покрытий, которые формируются на поверхности растрового рисунка и в результате твердофазных топохимических взаимодействий обеспечивают структурно-фазовую модификацию поверхности с изменением ее оптических свойств. По совокупности характеристик в качестве материала дополнительного покрытия был выбран хром, слои которого толщиной 20-50 нм не влияют на геометрию и дисбаланс ротора [6, 7].

Структурно-фазовая модификация поверхностного слоя. Для исследования механизма цветообразования предлагается теоретико-расчетный метод, основанный на сопоставлении термодинамических условий протекания конкретных взаимодействий с цветовой гаммой соединений, образующихся в результате топохимических реакций. А формирование наиболее вероятного соединения имеет место при отрицательном значении и наибольшей абсолютной величине энергии Гиббса. Для оценки изменения цветовой гаммы после нанесения хрома необходим анализ топохимических взаимодействий хрома с нитридом и оксидами титана – процессов, влияющих на изменение цветовой гаммы и, как следствие, на контраст растрового рисунка,

что описывается реакциями: $TiN + Cr = CrN + Ti$ и $Ti_xO_y + Cr = Ti_mO_n + Cr_aO_b$, где *a, b, m, n. x, y* – стехиометрические коэффициенты.

Из указанных реакций в диапазоне температур 298–1000 К, т.е. в реальных условиях нанесения хрома, термодинамически разрешены только взаимодействия диоксида титана TiO_2 с хромом с образованием оксида титана состава Ti_2O_3 и оксидов CrO и Cr_2O_3:

$$2TiO_2 + 2Cr = Ti_2O_3 + 2CrO, \quad (1)$$

$$6TiO_2 + 2Cr = 3Ti_2O_3 + Cr_2O_3. \quad (2)$$

При этом более вероятно (т.к. отрицательное значение энергии Гиббса больше по абсолютной величине) образование оксида CrO, который имеет черный цвет. Также черный или фиолетовый цвет имеет образующийся сексвиоксид титана Ti_2O_3. Этим объясняется усиление контраста за счет того, что уменьшается коэффициент отражения зоны растра.

Эволюция и закономерности изменения оптических параметров растрового рисунка. При формировании растрового рисунка число проходов лазера варьировалось от 1 до 4, чтобы в зависимости от структурно-фазового состава маркированной поверхности оценить влияние хромового покрытия на контрастность растра.

При первом проходе лазера был получен золотистый цвет маркированного слоя, на втором проходе – коричневый, на третьем – фиолетовый и на четвертом – синий. Далее экспериментально были подобраны режимы напыления пленок хрома за 4, 5 и 9 минут напыления, что соответствует толщинам 20-25 нм и 40-50 нм. Для оценки контраста полученных структур на плоском образце и поверхности сферического ротора определялись коэффициенты отражения базовой поверхности нитрида титана и маркированной поверхности, а также контраст растрового рисунка.

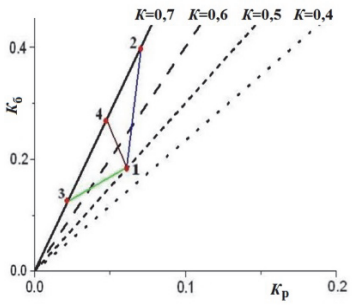


Рис. 1. Линии равного контраста

Анализ результатов показывает, что напыление хрома понижает значения коэффициентов отражения как базовой поверхности, так и наносимого оптического рисунка, но в разной степени, что в конечном счете приводит к общему повышению коэффициента контрастности. Для наглядности можно представить совокупность линий равного контраста для различных сочетаний коэффициентов отражения базовой поверхности и зоны растра (рис. 1). В данном случае видно, что увеличение величины контраста, например, с 0,5 до 0,7 возможно по линиям 1–2, что соответствует увеличению как коэффициента отражения базовой поверхности $K_б$, так и коэффициента отражения растра $K_р$, 1–3 – вариант, когда уменьшаются оба коэффициента, и 1–4 в случае увеличения $K_б$ и уменьшения $K_р$. Можно считать, что представленные экспериментальные данные соответствуют линии перехода 1–3.

Процесс регулирования значений коэффициентов контраста можно представить структурной схемой (рис. 2), которая учитывает основные технологические операции и изменение всех оптических параметров. Из представленной структурной схемы следует, что управляющими факторами являются количество проходов лазера для формирования растрового рисунка и толщина хромового покрытия. Оценивая полученные данные, можно считать, что при напылении хромового покрытия уменьшаются коэффициенты отражения как базовой поверхности, так и поверхности растра с повышением значения контраста поверхности. Изменения цвета объясняются в том числе и ростом толщины оксидной пленки [8], поскольку цвет обусловлен явлениями световой интерференции. Таким образом, термодинамический подход может быть использован в качестве расчетного метода для прогнозирования формирования наиболее вероятного соединения, количество которого может быть увеличено посредством многопроходной лазерной обработки.

Для наглядности на рис. 3 представлены графические зависимости изменения контраста от числа проходов лазера и толщины хромового покрытия. Наибольшее увеличение контраста происходит при формировании растрового рисунка за два прохода лазера и при напылении хромового покрытия в течение 4,5 минут. При этом значение контраста, полученное при формировании растрового рисунка за два прохода лазера с последующим напылением хромового покрытия на протяжении 4,5 минут, практически совпадает со значением контраста при четы-

рех проходах лазера без покрытия хрома. Это позволяет формировать растровый рисунок при меньшем количестве проходов лазера без потери контраста поверхности и обеспечивает уменьшение толщины покрытия нитрида титана, что минимизирует возможное искажение первичной формы бериллиевого ротора.

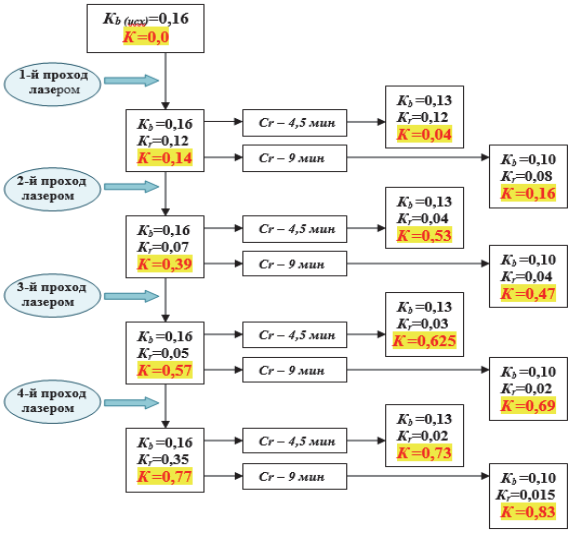


Рис. 2. Структурная схема процесса управления оптическими параметрами

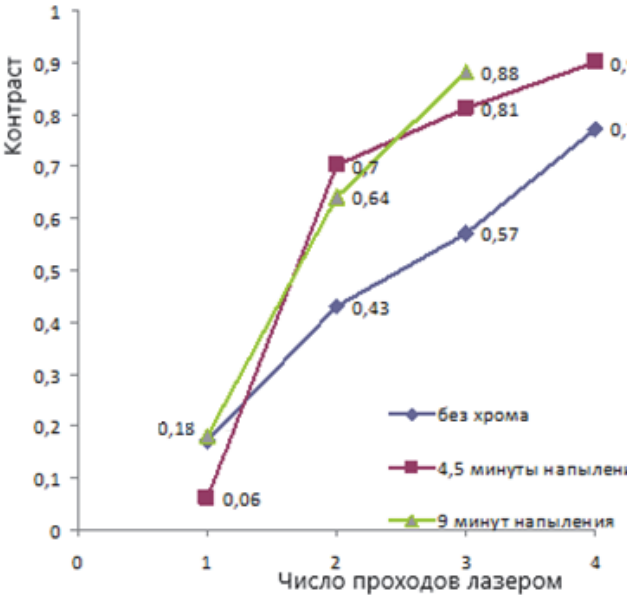


Рис. 3. Зависимость контраста от числа проходов для разных толщин пленок хрома

Представленные данные показывают эффективность технического решения, при котором лазерное маркирование растрового рисунка осуществляется при минимальном воздействии лазерных импульсов. Контраст поверхности на уровне 0,1-0,2 является недостаточным для функционирования системы съема информации, однако минимизирует воздействие на ротор при маркировании. Последующее напыление хрома толщиной 20-50 нм позволяет повысить контраст до требуемых значений порядка 0,4.

Заключение. Выявлен комплекс технологических методов и средств, обеспечивающий управление оптическими параметрами растрового рисунка БЭСГ. Обоснована эффективность использования для структурно-фазовой модификации поверхности ротора тонкопленочного покрытия хрома толщиной 20-50 нм. Определены управляющие факторы процесса модификации поверхностной структуры, позволяющие регулировать коэффициент отражения поверхности растра. Выявлен механизм изменения цветовой гаммы и оптических характеристик на основе термодинамического анализа последовательных гетерофазных топохимических взаимодействий в процессе нанесения хромового покрытия и установлено образование оксида хрома черного цвета, выступающего в качестве пигмента и влияющего на контраст растра. Это позволяет уменьшить толщину напыляемого покрытия нитрида титана и уменьшить интенсивность лазерного воздействия при маркировке, что минимизирует искажение формы и ухудшение дисбаланса ротора. При этом толщина покрытия хрома не влияет ни на геометрию, ни на дисбаланс ротора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Шульман Г.Е.** Шаровые гироскопы: (Обзор зарубежной литературы). Ленинград: Судостроение, 1979. 92 с.
2. **Ландау Б.Е.** Электростатический гироскоп со сплошным ротором // Гироскопия и навигация. 1993. № 1. С. 6–12.
3. **Юльметова О.С.** Ионно-плазменные и лазерные технологии в гироскопическом приборостроении. Диссертация … доктора технических наук. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2019. 244 с.
4. **Yulmetova, O.S., Tumanova, M.A.,** Laser marking of contrast images for optical read-out systems, Journal of Physics: Conference Series, 2017, vol. 917, no. 3. DOI: 10.1088/1742-6596/917/5/052007.

5. **Матлахов В.П.** Зависимость физико–механических свойств нитрид–титановых покрытий от давления азота // Вестник БГТУ. 2006. №2. С. 93–96.
6. **Павлова М.В., Юльметова О.С., Щербак А.Г.** Технология формирования тонкопленочного хромового покрытия на сферических узлах // XXVIII Международная научно-техническая конференция «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации». Сборник трудов. М., 2019.
7. **Павлова М.В. Юльметова О.С.** Исследование влияния модификации поверхностных тонкопленочных структур на функциональные параметры сферических узлов гироскопических приборов // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. СПб: Университет ИТМО, 2020.
8. **Diamanti, M.V., Del Curto, B., and Pedeferri, M.,** Interference colors of thin oxide layers on titanium, Color Res. Appl., 2008, no. 33, pp. 221–228.

M.V. Pavlova, M.A. Tit, O.S. Yulmetova (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, Russia)

CONTROL OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF FORMATION OF OPTICAL PARAMETERS OF THE ROTOR OF A SPHERE GYROSCOPE

We demonstrate the complex of technological methods and instruments that provide control of the process of formation of optical parameters of raster pattern on rotor of a strapdown electrostatic gyroscope. We justify efficiency of coating with ultra-thin chromium films for structural-phase surface modification. We define control factors of the modification process which allow regulating the raster reflectance. Based on thermodynamics analysis of subsequent topochemical interactions, we identified evolution and mechanism of variation of colors and optical characteristics.

Н. С. КАРАНИН, М. А. ТИТ, С. Н. БЕЛЯЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ВЛИЯНИЕ СТЕХИОМЕТРИИ НА СВОЙСТВА БИНАРНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ НА УЗЛАХ ГИРОПРИБОРОВ

Приводятся результаты исследований влияния стехиометрии на такие механические и оптические характеристики тонкопленочных структур нитрида титана, как сопротивление износу и контраст растрового рисунка. Рассматриваются технологические методы создания функциональных бинарных структур карбида и нитрида ниобия при изготовлении ротора криогенного гироскопа. Показано, что при этом основным является термодинамическая оценка возможных топохимических взаимодействий, при которых осуществляется структурно–фазовая модификация материала.

Введение. Тонкопленочные покрытия широко используются в гироприборостроении, например, в качестве износостойких покрытий нитрида титана на фланцах и опорах подшипника двухстепенного поплавкового гироскопа (ДПГ) [1], а также для обеспечения посадок ротора электростатического гироскопа (ЭСГ) [2]. При этом у ротора ЭСГ на поверхности покрытия методом лазерного маркирования [3] формируется растровый рисунок, обеспечивающий функционирование оптоэлектронной системы съема информации. Контраст растра определяется коэффициентами отражения базовой поверхности нитрида титана и модифицированного лазерной обработкой слоя. Для ротора криогенного гироскопа, на сферическую основу которого, выполненную из углеситалла УСБ-15 [4], наносится ниобиевое покрытие, актуальным является использование в составе ротора таких материалов, как нитрид и карбид ниобия, имеющих температуру перехода в сверхпроводящее состояние выше, чем у ниобия, и обладающих улучшенными механическими характеристиками. При этом необходимо учитывать зависимость от стехиометрии свойств бинарных соединений, механических и оптических для нитрида титана [5, 6] и сверхпроводящих для нитрида и карбида ниобия [7, 8].

Целью работы являлось исследование зависимости свойств функциональных тонкопленочных структур от стехиометрического состава и выявление технологических методов и средств решения многоцелевых задач при создании узлов гироприборов.

Зависимость механических характеристик нитрида титана от стехиометрии. Нитрид титана представляет собой фазу внедрения с широкой областью гомогенности, которая составляет от 14,8 до 22,6 % азота (по массе) [5, 6], что соответствует соединениям от $TiN_{0,6}$ до $TiN_{1,0}$. Учитывая зависимость термических коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) и изменения цветовой гаммы нитрида титана от количества азота [9], для исследований были определены соединения нитрида титана $TiN_{0,9}$ и $TiN_{1,0}$.

Принципиальным фактором в процессе напыления покрытий являлось использование парциального давления азота для управления стехиометрией покрытия. Оценка термодинамической вероятности протекания химических реакций, в данном случае $2Ti+xN_2 \rightarrow 2TiN_x$, осуществляется на основе расчета энергии Гиббса ΔG^o_T рассматриваемых гетерофазных взаимодействий с учетом газовой среды [10] в соответствии с выражением

$$\Delta G^0_T = \Delta H^0_{298} - T \cdot \Delta S^0_{298} + \int_{298}^{T} C_p dt - T \cdot \int_{298}^{T} 1/T \Delta C_p dt + RT \ln P_g^{-k}, \quad (1)$$

где ΔH^o_T – тепловой эффект процесса (изменение энтальпии), ΔS^o_T – изменение энтропии системы, C_p – теплоемкость, T – температура, P_g – относительное парциальное давление компонента g газовой среды (азота), принимающего участие в реакции, k – стехиометрический коэффициент, R – универсальная газовая постоянная.

Средние значения энергий Гиббса для соединений $TiN_{0,9}$ и $TiN_{1,0}$ при заданных параметрах температуры (T = 600 К) и давления азота ($P_g = (1{,}2 – 1{,}5)\cdot 10^{-3}$ мм. рт. ст.) составляют –218,4 кДж/моль и –232,1 кДж/моль соответственно, что свидетельствуют о термодинамической разрешенности образования нитридов титана $TiN_{0,9}$ и $TiN_{1,0}$ в интервале температур от 298 до 600 К. Рентгено-

фазовый анализ подтвердил образование $TiN_{0.9}$ и $TiN_{1,0}$, что обусловлено выбором парциального давления азота, которое является управляющим фактором процесса.

Микротвердость $HV_{0,2}$, оцениваемая по методу Виккерса, для покрытия $TiN_{0.9}$ составила 1119, а для покрытия TiN – 987. Обработка результатов испытаний покрытий в условия трения–верчения позволила получить аналитические зависимости моментов трения $M_{тв}(t)$ для $TiN_{0.9}$ и $TiN_{1,0}$:

$$TiN_{0.9}: \ M_{тв}(t)=0.0135/(1+\exp(-0.32(t-10))), \quad (2)$$

$$TiN_{1,0}: \ Mтв(t)=0.014/(1+\exp(-0.32(t-10))). \quad (3)$$

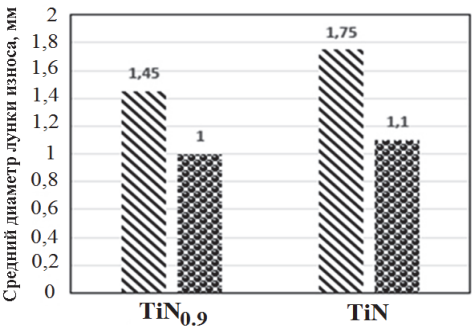


Рис.1. Средний диаметр лунки износа: ▨ – на испытуемых образцах, ▩ – на шаре

Из зависимостей (2) и (3) видно, что средний момент трения верчения составил 0,0135 Нм для $TiN_{0.9}$ и 0,0140 Нм для $TiN_{1,0}$. Наименьшее значение момента трения верчения и минимальный разброс его значений наблюдаются у покрытия $TiN_{0.9}$. Результаты проведенных испытаний на износ представлены на диаграмме (рис. 1). Наименьший средний диаметр лунки износа как на испытуемом образце, так и на шаре наблюдается у покрытия состава $TiN_{0.9}$. По результатам испытаний можно сделать вывод, что покрытия с меньшим содержанием азота в соединении нитрида титана, которое соответствует области гомогенности, показывают более высокую устойчивость к трению и износу, а также обладают большей микротвердостью.

Формирование оптических параметров. Использование покрытия нитрида титана в качестве базовой поверхности и последующее формирование рисунка методом локального лазерного окисления обеспечивают наименьшее изменение геометрии и шероховатости поверхности ротора и максимальную равномерность контраста [11]. Оптимизируемым параметром целевой функции в данном случае является контрастность рисунка K. Для увеличения контраста K, определяемого отношением разности коэффициентов отражения нитрида титана $K_б$ и растра $K_р$ к их сумме, при данном значении $K_б$ необходимо уменьшать $K_р$, что не всегда возможно. А увеличение коэффициента $K_б$ позволяет получить требуемый контраст при меньшей интенсивности лазерного воздействия на ротор в процессе маркирования, что важно с точки зрения сохранения геометрической точности изделия. Это определяется зависимостью $K \approx K_{\max} - Ae^{-W/W_0}$, где $K_{\max}$ соответствует максимально достижимой контрастности; W_0 – мощность, при которой $K_р$ уменьшается в e раз; A – константа, определяемая условиями процесса лазерной обработки и свойствами материала [12].

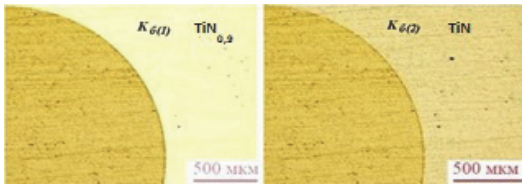


Рис.2. Контрастные изображения на поверхности нитрида титана

На рис. 2 представлены снимки покрытия нитрида титана состава $TiN_{0,9}$ и $TiN_{1,0}$ с нанесенными светоконтрастными изображениями, обладающими одинаковыми коэффициентами отражения $K_р$. Как видно из рис. 2, покрытие нитрида титана $TiN_{0,9}$ обладает большим коэффициентом отражения $K_{б(1)}$ по сравнению с покрытием $TiN_{1,0}$ ($K_{б(2)}$), что обеспечивает большую контрастность сформированного на его поверхности изображения. Это определяет предпочтительность использования покрытия $TiN_{0,9}$ при изготовлении роторов ЭСГ.

Бинарные соединения на основе ниобия. Перспективная конструкция сферического ротора криогенного гироскопа представляет собой сферическую основу, выполненную из углеситалла УСБ-15 [4], на которую наносится ниобиевое покрытие. Ниобий, обладая температурой

перехода ($T_{сп}$) в сверхпроводящее состояние 9,2К [13], имеет сравнительно невысокие механические характеристики. Применение бинарных структур на основе ниобия с $T_{сп}$ выше, чем у самого ниобия, таких как карбиды и нитриды ниобия, которые при этом имеют более высокие твердость и прочность, позволит улучшить эксплуатационные характеристики приборов. В системе *Nb–C* можно предположить протекание взаимодействий с образованием монокарбида ниобия (*NbC*) и диниобия карбида (Nb_2C). При этом карбиды ниобия состава NbC_x обладают широкой областью гомогенности: $0{,}7 < x < 1$. Оценка вероятности их формирования в заданных условиях основана на термодинамическом анализе твердофазных взаимодействий $2Nb + C = Nb_2C$ и $Nb + C = NbC$, для которых в интервале температур 298–1300 К отрицательные значения энергии Гиббса (от –132,66 до –193,55 кДж/моль) определяют возможность их протекания.

Предпочтительным является формирование монокарбида ниобия, у которого температура перехода в сверхпроводящее состояние *NbC* составляет 12,1 К. Перспективы применения карбида ниобия связаны с изготовлением ротора криогенного гироскопа [14], когда на сферическую основу наносят сверхпроводящее покрытие в виде двух расположенных один на другом слоев из материалов с различной $T_{сп}$. При этом материал внутреннего слоя имеет более высокую $T_{сп}$, чем наружного, что позволяет повысить надежность работы гироскопа, так как в случае потери сверхпроводимости наружного слоя при повышении температуры ротор будет продолжать находиться во взвешенном состоянии на внутреннем слое. В системе углеситалл–ниобий возможно обеспечить формирование промежуточного сверхпроводящего слоя карбида ниобия [15] с монотонным изменением фазового состава, определяемого процессами диффузии и образованием структуры, соответствующей соединению *NbC*. Такая конструкция решает проблемы размерной стабильности ротора.

Формирование промежуточного слоя карбида ниобия осуществлялось на углеситалловых образцах, на поверхность которых наносилось ниобиевое покрытие. На рис. 3 приведена зависимость изменения интенсивности, которая пропорциональна изменению концентрации ниобия и углерода при движении измерительного зонда в поперечном направлении относительно переходной зоны в контакте углеситалл–ниобий после термической обработки образцов при температуре 1273 К и выдержке в течении 12 часов.

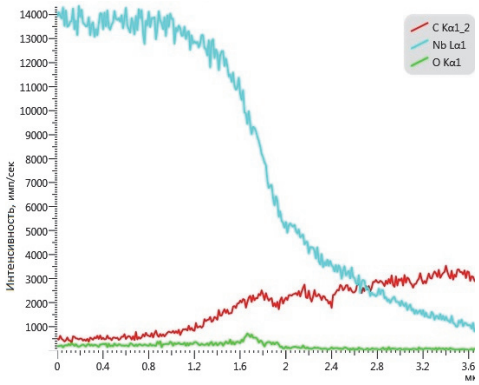


Рис. 3. Изменение концентрации ниобия и углерода в зоне перехода после термообработки

Из рис. 3 видно, что в области гомогенности можно выделить зону формирования карбида ниобия, составляющую величину порядка 0,5 мкм. В переходной зоне можно предполагать существование метастабильных твердых растворов, синтез Nb_2C и непосредственный синтез *NbC* [16].

Нитрид ниобия также является весьма перспективным материалом для формирования элементов подвеса криогенного гироскопа. При этом взаимодействия в системе *Nb–N* предполагают образование двух устойчивых нитридов *NbN* и Nb_2N, из которых только *NbN* обладает сравнительно высокой $T_{сп}$ – до 17 К [13]. Область гомогенности нитрида ниобия NbN_x лежит в пределах $0{,}88 < x < 1{,}06$. Оценка вероятности этих реакций также проводилась на основе термодинамических расчетов, которые определяют возможность образования как мононитрида, так и нитрида диниобия в интервале температур (298–600) К методом осаждения в вакууме или нитридизацией ниобия лазерной обработкой в среде азота. В этом случае необходимо учитывать парциальное давление азота, которое является управляющим фактором процесса формирования покрытия.

Практическое применение нитридов ниобия связано с формированием сверхпроводящих контуров на поверхности ротора криогенного гироскопа, которые являются дополнительными элементами системы раскрутки ротора, что сокращает время готовности прибора [17].

Заключение. Проведено исследование механических и оптических характеристик тонкопленочных покрытий нитрида титана состава *TiN* и $TiN_{0,9}$. Выявлено, что покрытия с меньшим содержанием азота в соединении обладают более высокой микротвердостью и устойчивостью к износу, а также показывают лучшие оптические характеристики для формирования на их по-

верхности контрастных изображений. Представлены аналитические зависимости моментов трения $M_{тв}(t)$ для тонкопленочных покрытий состава $TiN_{0,9}$ и $TiN_{1,0}$. Сформулированы принципы и предложены перспективные технические решения формирования бинарных сверхпроводящих структур на основе ниобия, имеющих температуру перехода в сверхпроводящее состояние выше, чем у ниобия, что в перспективе позволит улучшить условия работы и повысить эксплуатационные характеристики приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Яковлева С.А.** Исследование и разработка технологических методов повышения точности и размерной стабильности прецизионных деталей и узлов гироскопических приборов: дисс. … к.т.н.. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012. М., 2012.
2. **Ландау Б.Е.** Электростатический гироскоп со сплошным ротором // Гироскопия и навигация. 1993. № 1. С. 6–12.
3. **Юльметова О.С., Щербак А.Г.** Исследование процесса формирования светоконтрастного растра посредством лазерного маркирования // Научно–технический вестник ИТМО. 2010. № 05. С. 28–34.
4. **Махаев Е.А., Рябова Л.П., Чесноков П.А.** Разработка конструкции и технологии изготовления ротора криогироскопа // Материалы XXX Конференции памяти Н.Н. Острякова. 2016. С. 116–123.
5. **Сайдахмедов Р.Х.** Плазменные покрытия на основе нитридов и карбидов переходных металлов с регулируемой стехиометрией. Ташкент: Фан, 2005. 226 с.
6. **Панькин Н.А.** Влияние условий конденсации ионно-плазменного потока на структуру и свойства покрытий нитрида титана. Автореферат дисс. … кандидата физико-математических наук. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, 2008. 18 с.
7. **Тулеушев А.Ж., Тулеушев Ю.Ж., Лисицын В.Н. и др.** Патент РФ 2173733, МПК C23C14/35, Способ формирования сверхпроводящего пленочного покрытия из нитрида ниобия и проводника на его основе.
8. **Патент США N 4726890**, C 23 C 14/34, 88.02.23, Бюлл. № 4.
9. **Матлахов В.П.** Зависимость физико–механических свойств нитрид–титановых покрытий от давления азота // Вестник БГТУ. 2006. №2. С. 93–96.
10. **Линчевский, Б.В.** Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами. М.: Металлургия, 1986. 222 с.
11. **Yulmetova, O.S., Scherbak, A.G.,** Contrast image formation based on thermodynamic approach and surface laser oxidation process for optoelectronic read-out system, Optics and laser technology, 2018, vol. 101, pp. 242–247.
12. **Yulmetova, O.S., Tumanova, M.A.,** Laser marking of contrast images for optical read-out systems, Journal of Physics: Conference Series, 2017, vol. 917, no.05, pp. 052007.
13. **Webb, G.W., Marsiglio, F., Hirsch, J.E.,** Superconductivity in the elements, alloys and simple compounds, Physica C: Superconductivity and its Applications, 2015, vol. 514, pp. 17–27
14. **Колосов В.Н., Шевырев А.А.** Патент РФ № RU 2460971, МПК G01C25. Способ изготовления ротора криогенного гироскопа. Опубликовано 10.09.2012 г.
15. **Туманова М.А., Щербак А.Г.** Технологические аспекты формирования функциональных элементов при изготовлении узлов криогенных гироскопических приборов // Материалы XXXI Конференции памяти Н.Н. Острякова. 2018. С. 338–344.
16. **Володин В.Н., Тулеушев Ю.Ж., Жаканбаев Е.А.** Структура и фазовый состав напыленных пленок системы ниобий–углерод // Физика металлов и металловедение. 2013. Т. 114. № 5. С. 432–436.
17. **Патент RU №2678707** / Левин С.Л., Туманова М.А., Юльметова О.С., Святый В.В., Щербак А.Г., Рябова Л.П. Способ изготовления чувствительного элемента криогенного гироскопа. 2019.

N.S. Karanin, M.A. Tit, S.N. Belyaev (Concern CSRI Elektropribor JSC, St. Petersburg)

THE INFLUENCE OF STOICHIOMETRY ON THE PROPERTIES OF BINARY FUNCTIONAL COATINGS ON NODES OF GYRO DEVICES

The research results of stoichiometry influence on such mechanical and optical characteristics of thin-film titanium nitride structures, such as wear resistance and raster pattern contrast, are presented. Technological methods of creating functional binary structures of niobium carbide and nitride in the manufacture of a cryogenic gyroscope rotor are considered. It is shown that in this case the main thing is the thermodynamic estimation of possible topochemical interactions which makes possible to accomplish the structural-phase modification of the material.

Н. С. КАРАНИН, С. Н. БЕЛЯЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ФОРМИРОВАНИЕ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ УГЛЕРОДНЫХ НАНОКЛАСТЕРОВ И ФТОРА НА УЗЛАХ ДВУХСТЕПЕННОГО ПОПЛАВКОВОГО ГИРОСКОПА

Рассматривается модификация поверхности узлов двухстепенного поплавкового гироскопа (ДПГ) посредством нанесения эпиламирующих фторсодержащих покрытий и покрытий на основе аддуктов нанокластеров углерода (АНКУ). Представлены результаты испытаний по улучшению трибологических характеристик и по минимизации выкрашивания материала винтовых пар балансировочных узлов поплавковой камеры, а также данные по изменению гидрофобилизирующих свойств и по микротопографии модифицированных бериллиевых поверхностей и описание их микрогеометрии.

Введение. Точность и надежность двухстепенного поплавкового гироскопа (ДПГ) во многом обусловлены качеством поплавковой камеры (ПК), корпус которой изготавливается из бериллия [1, 2]. В составе ПК ДПГ предусмотрены балансировочные узлы, включающие винты из бериллиевой бронзы и резьбовые отверстия в корпусе ПК. Поскольку бериллий является хрупким материалом [3], при корректировке дисбаланса посредством вворачивания винтов в отверстия может происходить выкрашивание материала, что в принципе недопустимо. Решение этой проблемы обусловлено исследованием процесса модификации бериллиевой поверхности с использованием протекторных покрытий, которые, кроме того, обеспечивают пассивацию поверхности, изменяя ее гидрофобилизирующие свойства. Поэтому разработка методов и средств технологии, обеспечивающих исключение выкрашивания микрочастиц в балансировочных узлах ПК и пассивацию поверхности бериллия с минимизацией взаимодействия поверхности с рабочей жидкостью, является актуальной задачей.

Постановка задачи. В современных изделиях точного приборостроения для модификации поверхностей широкое применение находят покрытия на основе углерода АНКУ, которые представляют собой молекулярное соединение углеродных нанокластеров, и эпиламирующие фторсодержащие покрытия [4, 5]. Эти покрытия существенно улучшают условия эксплуатации различного рода сопряженных деталей, повышая их антифрикционные, протекторные, пассивирующие, антиадгезионные и другие свойства. Следует отметить, что если эпиламирующие покрытия адсорбируются поверхностью и образуют на ней пленку толщиной 30-50 ангстрем, то энергетическая активность углеродных наночастиц в покрытиях АНКУ позволяет им проникать в структуру материала, модифицируя его, что может обеспечивать более эффективные протекторные свойства. Цель работы заключалась в выявлении комплекса технических решений, позволяющих обеспечить микромодификацию поверхности узлов ПК ДПГ, используя покрытия эпилама и АНКУ, и получение улучшенных эксплуатационных свойств поверхности.

Модификация бериллиевой поверхности. В отношении бериллиевой поверхности решались задачи пассивации, что связано с понятиями гидрофобности или более общего понятия «лиофобность» – характеристик межмолекулярного взаимодействия вещества и жидкой среды, в которой оно находится [6]. Кроме того, оценивалась возможность снижения шероховатости поверхности, полученной токарной обработкой.

Установлено, что эпиламирование приводит к значительному изменению краевого угла смачивания Θ бериллиевой поверхности, который становится больше 90°, что определяет проявление гидрофобности материала.

Анализ характера микрорельефа осуществлялся на базе непараметрических критериев оценки: топографий, кривых Аббота, гистограмм распределения ординат и пиков. На рис. 1 приведены результаты анализа микроструктуры поверхности до и после нанесения нанопокрытий, откуда видно, что после нанесения эпилама и АНКУ поверхность образца становится более гладкой, об этом свидетельствует более светлая цветовая палитра. При этом цветовой оттенок соотносится с уровнем микронеровностей, приведенных в микрометрах.

Следует отметить, что до нанесения покрытия средняя величина микронеровностей точеной бериллиевой поверхности стабильна и составляет 4,5 мкм, при этом максимальная варьируется в пределах от 7,42 до 7,91 мкм, а поверхность, покрытая эпиламом, имеет среднюю величину микронеровностей 2,4 мкм – практически в 2 раза меньше, чем после токарной обработки. Точеная поверхность бериллия, покрытого АНКУ, нестационарна: измеренная в разных местах поверхности имеет разную величину микронеровностей – от 3,5 до 4,5 мкм. При этом максимальная высота микронеровностей колеблется от 5,37 до 7,81 мкм.

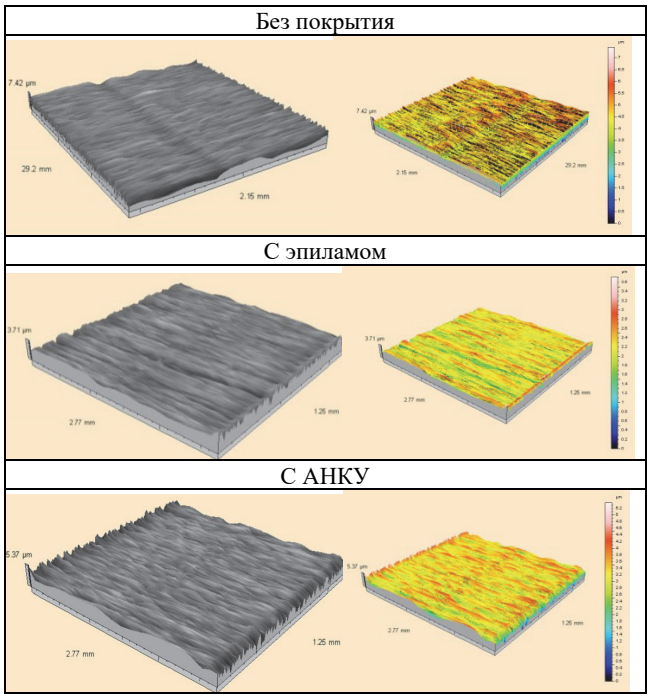


Рис. 1. Топография бериллиевой поверхности без покрытия, с покрытием эпиламом и с покрытием АНКУ

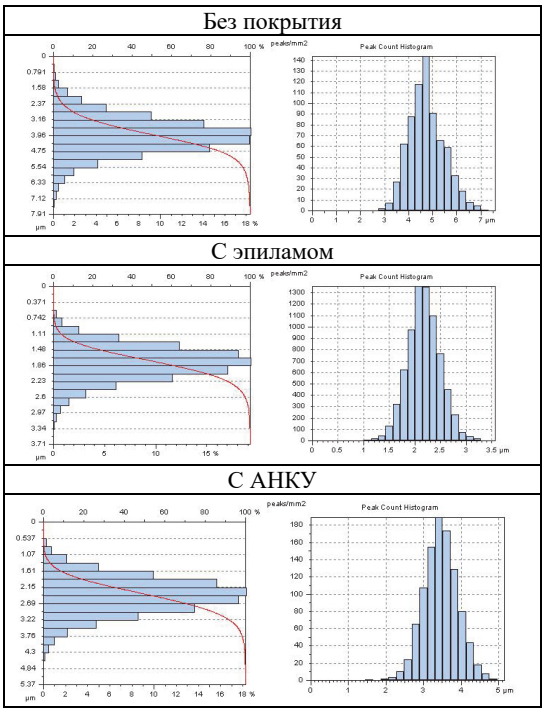


Рис. 2. Непараметрические критерии оценки микрогеометрии поверхности

Непараметрические кривые – гистограммы плотности распределения ординат и кривые Аббота, приведенные слева на рис. 2, свидетельствуют о существенной разнице в шероховатости поверхности до и после нанесения покрытий. Гистограммы показывают, что для непокрытой поверхности максимальный пик приходится на значение шероховатости 3,96–4,75 мкм, для поверхности, покрытой эпиламом, – 1,86 мкм, а для поверхности, покрытой АНКУ, пик гистограммы приходится на величину шероховатости 2,15–2,69 мкм. Эти данные коррелируют с данными, полученными при построении топографий поверхностей. Максимальный пик гистограммы плотности распределения ординат соответствует максимальной вероятности появления значения шероховатости.

В табл. 1 приведены значение шероховатости поверхностей (без покрытия, с эпиламом и АНКУ), полученные на базе построения топографий, гистограммы распределения ординат и гистограммы распределения пиков поверхности.

Таблица 1

Значения шероховатости поверхностей

Вид поверхности	Анализ на базе построения топографий	Анализ на базе построения гистограммы распределения ординат	Анализ на базе построения гистограммы распределения пиков
	Средний уровень шероховатости поверхности в мкм		
Без покрытия	4,5	3,96–4,75	4,5–5
С покрытием эпиламом	2,4	1,86	2,5
С покрытием АНКУ	3,5–4,5	2,15–2,69	3,5

Справа на рис. 2 построены гистограммы распределения пиков. По оси абсцисс отложен разброс высотных значений пиков, а по оси ординат – их количество, приходящееся на единицу

площади в 1 мм^2. Эти гистограммы показывают, что для неэпиламированной поверхности пики с величиной шероховатости 4,5–5 мкм появляются 140 раз на единице площади, для эпиламированной число пиков увеличивается до 1300 с высотой микронеровности 2,5 мкм, а для поверхности, покрытой АНКУ, приходится 180 пиков с высотным значением 3,5 мкм.

Балансировочный узел. Были изготовлены винтовые пары с выполнением резьбы на части отверстий с использованием эпиламированного метчика. Винты из бериллиевой бронзы покрывались эпиламом на длине, равной половине длины резьбы, с целью получения сравнительных данных по величине момента проворачивания, непосредственно по мере вворачивания винта в отверстие. Контроль момента проворачивания балансировочных винтов осуществлялся тарированными отвертками 60 гс·см ($6\cdot10^{-3}$ Н·м); 100 гс·см ($10\cdot10^{-3}$ Н·м); 200 гс·см ($20\cdot10^{-3}$ Н·м).

Проверка момента проворачивания балансировочных винтов показала, что значение момента на участке резьбовой пары, где имеется покрытие, уменьшилось в 2 раза с 200 до 100 гс·см. На образцах, где резьба выполнена эпиламированным инструментом, значение момента уменьшилось на 40 % – со 100 до 60 гс·см. На образцах, где имелось покрытие как на инструменте (метчик), так и на резьбе и на части винта, значение момента снизилось с 200 гс·см до 60 гс·см.

Следует отметить, что профиль резьбы в отверстии, где резьба выполнена эпиламированным метчиком, более ровный. Сравнительно больший эффект дает эпиламирование балансировочного винта по сравнению с эпиламированием резьбы, когда моменты проворачивания одинаковы (60 гс·см) как для резьбы с эпиламным покрытием, так и без него. При этом нанесение эпиламного покрытия существенно уменьшает степень выкрашивания материала в резьбовой паре.

Полученные экспериментальные результаты позволяют говорить о существенном снижении коэффициента трения в винтовой паре, что выражается в уменьшении момента проворачивания в 2 раза и, как следствии, повышении износостойкости сопряженных деталей.

Заключение. Пассивирующее покрытие – как эпилам, так и АНКУ – уменьшает угол смачивания бериллиевых поверхностей, а также существенно изменяет микроструктуру поверхности, что подтверждает анализ, проведенный на базе построения непараметрических критериев оценки микрорельефа поверхности.

В целом полученные экспериментальные результаты позволяют говорить о перспективном направлении в технологии – микромодификации поверхности материалов наномодификаторами – как о блоке технологических приемов и методов, позволяющих эффективно использовать уникальные свойства углеродных наносистем в целях получения конструкционных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами. Спектр практического применения может быть значительно расширен и позволит получить значительный технико-экономический эффект.

Проведенные испытания по проверке экранирующего и протекторного действия эпиламных нанопокрытий показали эффективность их применения для решения локальных технических проблем, связанных с трибологическими характеристиками поверхностей контактирующих пар.

Перспективными направлениями для продолжения работ являются исследование технологии пассивации поверхностей материалов, создание методов и средств улучшения трибологических свойств функциональных поверхностей узлов гироприборов и использование эпиламирующих покрытий для нанесения на рабочие поверхности инструмента для мехобработки (фрезы, резцы, притиры, метчики, лерки и т.д.).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Джашитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В.** Общая и прикладная теория гироскопов с применением компьютерных технологий / Под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. 154 с.
2. **Пельпор Д.С., Михалев И.А., Бауман В.А.** Гироскопические приборы и системы. Учебник для вузов под ред. Д.С. Пельпора. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1988. 424 с.
3. **Бериллий.** Наука и технология / пер. с англ. под ред. Г.Ф. Тихинского и И.И. Папирова. М.: Металлургия, 1984. 624 с.
4. **Semenov, A.P.,** The Role of Epilames in Tribology, Journal of Friction and Wear, 2010, vol. 31, no. 6, pp. 469–480.
5. **Gantsevich, I.B. and Lyakh, F.V.,** Nature and Mechanism of Epilame Action, Trenie i Iznos, 1992, vol. 13, no. 3, pp. 550–553.
6. **Сумм Б.Д., Горюнов Ю.В.** Физико-химические основы смачивания и растекания, М., 1976; Физико-химическая механика и лиофильность дисперсных систем. Респ. межвед. Сборник. К., 1978. Вып. 11.

N.S. Karanin, S.N. Belyaev (Concern CSRI Elektropribor JSC, St. Petersburg)

FORMATION OF CARBON- AND FLUORINE-BASED COATINGS ON UNITS OF A TWO-DEGREE FLOAT GYROSCOPE

We consider surface modification of units of a two-degree float gyroscope by its covering with epilamating fluorine-containing coatings and coatings based on carbon nanocluster adducts. We demonstrate the results of tests to improve tribological properties, to minimize coloration of the material of screw pairs for balancing units of the float chamber. We also demonstrate the data of changing water-repellent properties and data of topography modified beryllium surfaces and description of their geometrical properties.

С. А. НОСКОВ, Е. Е. ТАТАРИНОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОДОЛЬНЫХ ПАЗОВ В КВАРЦЕВЫХ ПРЕФОРМАХ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА С СОХРАНЕНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Данный доклад посвящен усовершенствованию технологии изготовления анизотропного оптического волокна с сохранением поляризации. Для формирования эллиптической «напрягающей» оболочки в кварцевой преформе оптического волокна необходимо осуществлять диаметрально противоположные пропилы продольных пазов. Данный этап производства оптического волокна неизбежно связан с рядом проблем, таких как вибрации, неравномерная подача преформ, неидеальная по длине геометрия преформы и т.п., которые способны привести к разрушению оптической преформы или снижению качества оптического волокна. Для решения данных проблем была разработана автоматизированная система формирования продольных пазов в кварцевых преформах с модулем анализа и оповещения оператора об износе инструмента.

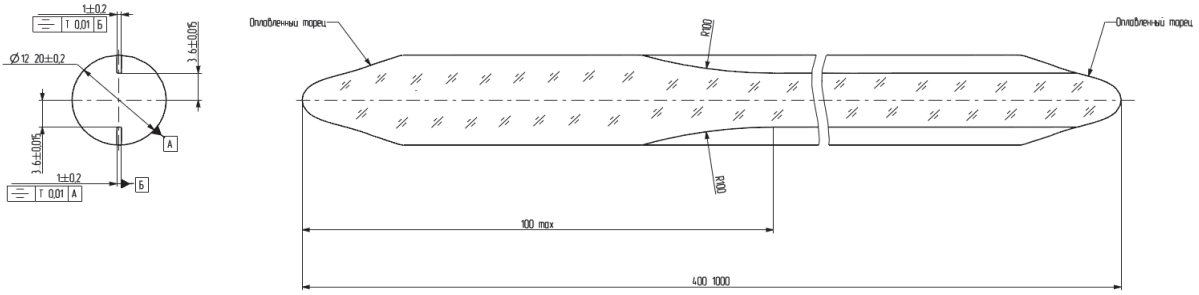
Введение. Оптические волокна (ОВ) находят в настоящее время широкое применение в различных волоконно оптических датчиках физических величин и в волоконно-оптических устройствах. Специфика этого применения требует создания ОВ с особыми свойствами. К числу таких специальных ОВ, формируемых на основе высокочистого кварцевого стекла, относятся в первую очередь ОВ, сохраняющие поляризацию излучения. В настоящее время наиболее распространенными волокнами с сохранением поляризации являются анизотропные оптические волокна (АОВ). Существует три основных вида таких ОВ: АОВ с эллиптической «напрягающей» оболочкой, АОВ типа «галстук-бабочка» и АОВ типа «PANDA». Из них наиболее простым и при этом не менее эффективным является АОВ с эллиптической «напрягающей» оболочкой. В этих ОВ сохранение поляризации создается за счет анизотропии напряжений, вызываемой формой так называемой «напрягающей» оболочки. Легирование бором дает значительно большее увеличение указанных напряжений, поэтому для формирования «напрягающей» оболочки или «напрягающих» элементов в АОВ используется боросиликатное стекло.

Для формирования эллиптичности «напрягающей» оболочки в кварцевой преформе осуществляется пропил продольных диаметрально противоположных пазов, после чего на станке MCVD производится кругление пропиленной преформы. Вследствие кругления «напрягающая» оболочка растягивается по оси пропилов и представляет собой эллипс, за счет которого возникает анизотропии напряжений.

Однако бор в «напрягающей» оболочке за счет повышенных напряжений ведет к возрастанию хрупкости преформы. Поэтому процесс придания эллиптичности «напрягающей» оболочке требует предельной осторожности и повышенного внимания к вибрациям преформы. При осуществлении пропилов пазов вручную из за неравномерности подачи преформы велик риск возникновения сколов на кромке паза. Это ведет к тому, что на этапе кругления на поверхности преформы образуются пузыри, которые при вытягивании из преформы волокна негативно сказываются на прочности, а также на стабильности диаметра волокна.

Темой данного доклада является разработка технологии автоматизированного формообразования продольных пазов в кварцевых стержнях круглого сечения диаметром 12…20 мм, длиной 400…1000 мм.

Разработка оснастки для осуществления пропилов пазов в кварцевых преформах. Требования к пазам представлены на эскизе:



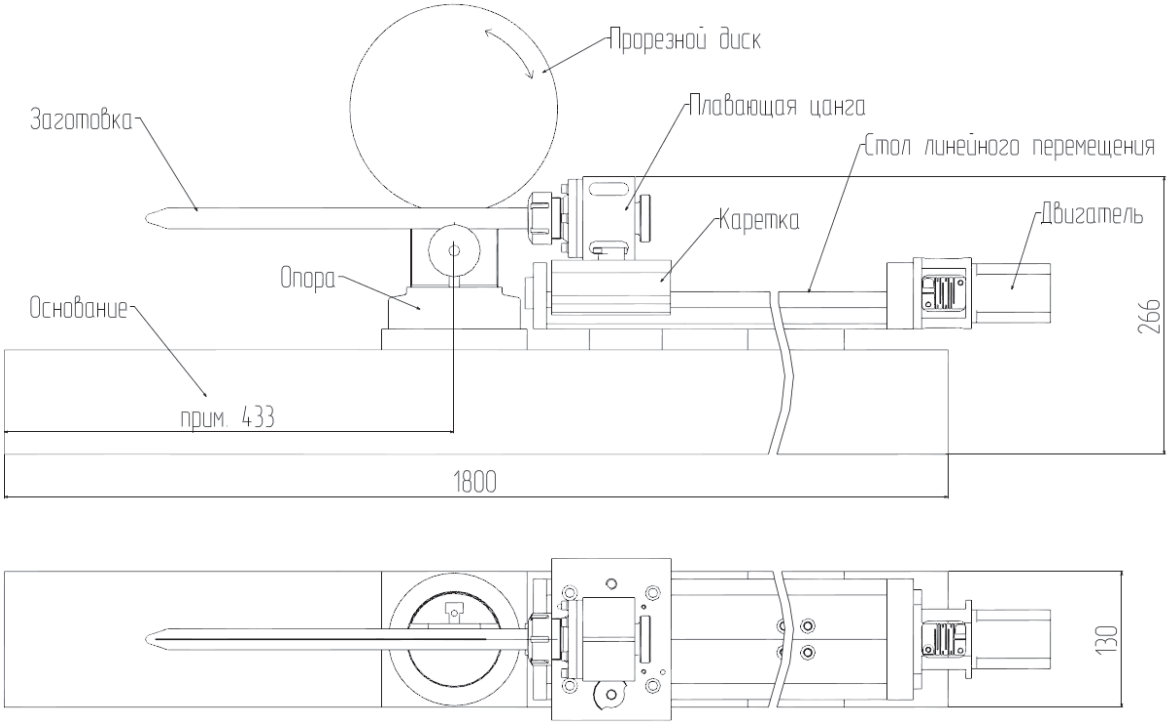
Разноразмерность глубины пазов, выполненных на одном стержне, не должна превышать поля допуска на соответствующий размер. Шероховатость поверхностей стенок и донца пазов – Ra 1.25. Стрела прогиба стержня может достигать 2 мм на 1000 мм длины стержня. Разноразмерность диаметра стержня на длине – в пределах поля допуска на размер.

В связи с тем что материал заготовки – кварцевое стекло является абразивным материалом для всех известных нам видов сталей, операцию по прорезке пазов следует выполнять на плоско- или профилешлифовальном станке, оснащенном кожухами, защищающими агрегаты и механизмы станка от абразивной пыли и имеющем систему подачи смазочно-охлаждающей жидкости в зону резания.

Исходя из требований к производимой детали и высокой хрупкости материала заготовки, возникает одна из важных проблем в технологии прорезки данных пазов – проблема закрепления заготовки в станке. Классическое закрепление заготовки в форме стержня в призму на столе станка и обработка заготовки путем перемещения стола станка приведут к разрушению заготовки вследствие ее кривизны.

Решением данной проблемы является организация призматического базового элемента непосредственно в зоне резания, тогда как остальная часть заготовки должна находиться в свободном состоянии. Перемещение заготовки должно осуществляться при неподвижном столе станка. С этой целью нами была разработана специальная оснастка, позволяющая выполнять данную операцию.

Схема с габаритными размерами оснастки приведена на следующем рисунке:



Оснастка представляет из себя стол линейного перемещения производства PBC linear, США, установленный на массивное основание. Особенностью данного стола является его стойкость к

агрессивным средам, таким как абразивная пыль, соленая вода, повышенные вибрации. В зоне резания под прорезной диск на основание установлена опора с жесткозакрепленным на ней роликом, имеющим V-образную канавку. На каретку стола устанавливается специальная плавающая цанга, имеющая 2 степени свободы. Заготовка надежно закрепляется в патрон цанги. Равномерный охват заготовки цанговым патроном исключает вероятность разрушения заготовки.

Перемещение каретки с закрепленной заготовкой осуществляется шаговым двигателем под управлением компьютера с установленным на нем программным обеспечением Newfangled Solutions MACH3.

В ходе производства первых образцов стержней мы столкнулись с проблемой вибраций, возникающих на свободном конце заготовки вследствие процесса резания. Данная проблема была частично решена путем установки демпфирующего элемента в виде полиуретанового ролика, лежащего под собственным весом на свободном конце заготовки.

В процессе обработки заготовки инструмент постепенно забивается кварцевой пылью, неизбежно образующейся в результате процесса резания. Это приводит к увеличению силы, необходимой для подачи заготовки на режущий инструмент, что, в свою очередь, негативно сказывается на процессе резания: возрастают вибрации заготовки, вызывающие образование сколов на кромках пазов. Чрезмерное увеличение вибраций заготовки может привести к ее разрушению.

С целью контроля износа инструмента нами были разработаны алгоритмы и модуль анализа и оповещения оператора об износе инструмента (далее – модуль оповещения).

Увеличение силы подачи заготовки на инструмент при неизменной скорости самой подачи приводит к увеличению момента на валу шагового двигателя. Увеличение момента двигателя должно привести к увеличению тока потребления двигателем. В связи с особенностью работы шагового двигателя нами было выдвинуто предположение о том, что регистрацию увеличения тока потребления двигателем необходимо вести не в цепи обмоток двигателя непосредственно, а в цепи питания драйвера двигателя (далее ток – цепи питания). Данное предположение было подтверждено экспериментально при выполнении операции по прорезке пазов на опытной партии заготовок. Измерения силы тока цепи питания проводились лабораторным мультиметром типа В7-58. В ходе эксперимента было получено значение максимального увеличения тока цепи питания при работе двигателя под нагрузкой в сравнении с током цепи питания при холостом ходе двигателя. Значение максимального увеличения тока цепи питания составляет 20 мА.

Исходя из полученных данных, в качестве чувствительного элемента модуля оповещения нами был выбран линейный аналоговый датчик тока (далее – датчик тока) на базе микросхемы ACS712 с чувствительностью 185 мВ/А. Для анализа и передачи данных, поступающих с датчика тока в программу управления шаговым двигателем MACH3, был выбран контроллер Arduino UNO R3 (далее – контроллер), имеющий порт аналогового входного сигнала 0…5 В. Контроллер аппаратно соединен с компьютером с установленным программным обеспечением MACH3 по интерфейсу RS-232.

Алгоритм работы контроллера заключается в вычислении разности текущей силы тока цепи питания, регистрируемой датчиком тока, и силы тока цепи питания при холостом ходе двигателя. Для исключения влияния пиковых значений тока цепи питания в алгоритме используется вычисление среднеквадратического значения тока. Значение тока цепи питания при холостом ходе двигателя вычисляется в начальный момент рабочего хода заготовки, до начала процесса резания.

Для определения начала рабочего хода заготовки и передачи вышеуказанных значений тока цепи питания в алгоритм работы контроллера включен блок обмена данными между контроллером и программным обеспечением MACH3. Обмен данными между контроллером и MACH3 осуществляется по протоколу RTU Modbus посредствам двух шестнадцатиразрядных регистров входящих данных и одного шестнадцатиразрядного регистра исходящих данных (по отношению к MACH3). В регистрах входящих данных организована передача данных из контроллера в программное обеспечение MACH3 о текущем значении тока цепи питания и о разнице между текущим значением тока и значением тока при холостом ходе. В регистре исходящих данных организована передача данных из MACH3 в контроллер о начале рабочего хода заготовки.

Программная реализация алгоритма работы контроллера была выполнена с применением программного обеспечения Arduino IDE. Для работы с датчиком тока и вычисления контроль-

ной суммы Modbus-сообщений были использованы библиотеки функций, найденные и сохраненные с сайта https://github.com/.

Для оповещения оператора о параметрах тока цепи питания был разработан блок оповещения, встроенный в пользовательский интерфейс программного обеспечения MACH3. Данный блок информирует пользователя о текущем значении тока цепи питания, об изменении текущего значения тока цепи питания в сравнении с током цепи питания при холостом ходе двигателя, выраженном в процентном отношении от максимально допустимого значения. Также была разработана технологическая М-функция, позволяющая оператору задавать в управляющей программе значение максимально допустимого изменения тока цепи питания в сравнении с током цепи питания при холостом ходе двигателя.

Заключение. Достоинствами разработанного модуля оповещения являются низкая стоимость и высокая надежность.

К недостаткам можно отнести невысокую скорость обработки сигнала, поступающего от датчика тока, и косвенность измерения момента на ходовом винте. Практические результаты стабильной работы модуля были получены при времени обновления сигнала 200 мсек.

Низкая скорость обновления сигнала может негативно сказаться при повышении скорости подачи. Для устранения данного недостатка необходимо использовать специализированный датчик определения момента, установленный между выходным валом двигателя и ходового винта стола линейного перемещения.

S.A. Noskov, E.E. Tatarinov (State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg)

DEVELOPMENT OF A TECHNOLOGY FOR FORMATION OF LONGITUDINAL SLOTS IN QUARTZ PREFORMS INTENDED FOR PRODUCING OPTICAL FIBER WITH POLARIZATION RETENTION

This scientific report is devoted to the improvement of the technology of manufacturing anisotropic optical fiber with polarization retention. To form an elliptical "stress" shell in a quartz preform of an optical fiber, it is necessary to make diametrically opposite cuts of the longitudinal grooves. This stage of optical fiber production is inevitably associated with a number of problems, such as vibrations, uneven preform feeding, non-ideal preform geometry along the length, etc., which can lead to destruction of the optical preform or deterioration of the quality of the optical fiber. To solve these problems, an automated system for the formation of longitudinal grooves in quartz preforms was developed with a module for analyzing and notifying the operator about tool wear.

Д. Р. ДЕВЕТЬЯРОВ, М. А. ЕРОНЬЯН
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

РАДИАЦИОННО СТОЙКИЙ ОДНОМОДОВЫЙ СВЕТОВОД С СЕРДЦЕВИНОЙ ИЗ КВАРЦЕВОГО СТЕКЛА, ОБЕДНЕННОГО КИСЛОРОМ

Изготовлен фторсиликатный одномодовый волоконный световод с сердцевиной из кварцевого стекла. Исследовано влияние дефицита кислорода в сердцевине изготовленного световода на уровень его радиационной стойкости. Показано увеличение уровня радиационно-наведенных потерь (РНП) в таком волокне с уменьшением как температуры испытания (от + 25°С до минус 60°С), так и длины волны (от 1,55 до 1,31 мкм), а также полное их восстановление при λ = 1,55 мкм при комнатной температуре. Выявлено, что увеличение РНП происходит из-за суперпозиции рэлеевского рассеяния и поглощения с уменьшением поглощения при увеличении длины волны.

Введение. Радиационно стойкие волоконные световоды (РСВС) для работы в условиях повышенного радиационного фона актуальны сегодня для атомной энергетики, космической техники и военных применений. Для таких применений типичная мощность дозы составляет 0,2-3 Гр/с, которая приводит к увеличению оптических потерь коммерческого одномодового световода SMF-28 до 25 дБ/км при комнатной температуре и дозе в 1 кГр [1]. Влияние радиации на оптоэлектронные системы объектов космического базирования усугубляется особо низкой температурой их состояния. Наиболее стойкие в таких условиях эксплуатации РСВС изготавливаются в основном универсальным методом модифицированного химического парафазного осаждения (MCVD) [2]. Они имеют сердцевину и наружную оболочку из кварцевого стекла, между которыми находится оболочка, легированная фтором [3].

Радиационно-наведенные потери (РНП) в ВС с сердечником из чистого кварцевого стекла увеличивается за счет хлора и ОН-групп [4]. Окислительные условия синтеза сердцевины стекла [5] инициируют образование радиационного дефекта в виде немостикового кислорода (NBOHC) [6]. Эти три основных дефекта создают РНП в виде поглощения в видимой и ультрафиолетовой областях оптического спектра и генерируют структурные неоднородности в сетке кварцевого стекла и, как следствие, оптические потери (ОП) в виде рэлеевского рассеяния (РР) [7, 8]. Восстановительные условия для синтеза стеклянного ядра исключают образование ОН-групп и NBOHC [9].

Целью настоящей работы являются изготовление MCVD методом фторсиликатного одномодового волоконного световода с сердцевиной из кварцевого стекла с дефицитом кислорода и исследование влияния гамма-облучения на их оптические потери в спектральной области особой прозрачности кварцевого стекла на длине волны 1,31 и 1,55 мкм и при температуре +25 и –60°С.

Изготовление ВС. Заготовка фторсиликатного одномодового ВС изготовлена на автоматизированном комплексе OFC-12-729 фирмы «Nextrom» с использованием трубы из кварцевого стекла марки F 300 с наружным диаметром 25 и толщиной стенки 3 мм. Фторсиликатную оболочку наносили двухстадийным методом [10], в котором спекание и фторирование пористого слоя происходили в газовой атмосфере, не содержащей хлора. Внутренний слой из чистого кварцевого стекла наносился традиционным одностадийным методом [2] за три прохода горелки. Высокотемпературное сжатие заготовки осуществляли за три прохода горелки при 2200°С и продувке ее внутреннего канала азотом высокой чистоты, содержащим $6*10^{-5}$ масс % кислорода, $8*10^{-5}$ масс % влаги и 1 масс % паров $SiCl_4$. Такие условия обработки стекла сердцевины эффективно устраняют ОН-группы и создают необходимый дефицит кислорода [11]. Окончательное сжатие заготовки в штабик производили при 2300°С.

Для вытяжки волокна диаметром 125 мкм заготовку нагревали в печи с графитовым нагревателем до 2150°С. При скорости вытягивания волокна 60 м/мин осуществляли нанесение защитного двухслойного эпоксиакрилатного УФ отверждаемого покрытия толщиной 65 мкм.

Исходные оптические потери световода на длине волны 1100-1600 мкм определяли методом сравнения пропускания излучения для короткого (1 м) и длинного (7 км) отрезков волокна с использованием анализатора оптического спектра марки «Yokogawa AQ6370C».

Исследование содержания хлора в РСВС производили с использованием сканирующего электронного микроскопа Quanta 200 в комплекте с рентгеновским микроанализатором EDAX.

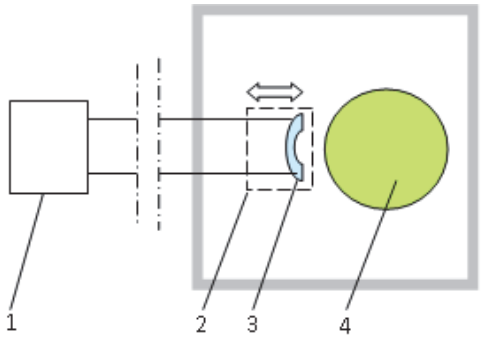


Рис. 1. Установка для радиационного контроля: 1 – оптический тестер, 2 – подвижный термостат, 3 – катушка с волокном, 4 – источник γ-излучения.

Измерение РНП. РНП измеряли по снижению мощности излучения, постоянно проходящего через образец ВС длиной 200 м, в процессе его облучения источником гамма-излучения ^{60}Co (рис. 1). Мощность облучения величиной 1 и 3 Гр/с задавали определенным расстоянием волокна от источника излучения. Образец на подвижной каретке передвигали в зону для облучения [12]. Заданный уровень мощности дозы радиационной нагрузки достигался через 4 с. Облучение проводили на двух образцах волокна: для температуры +25 и –60°С. Величина зондирующего излучения на длине волны 1,31 и 1,55 мкм была в пределах 3-5 мкВт, что является пороговой величиной, выше которой возможно фото-обесцвечивание радиационных дефектов [13].

При температуре +25°С облучение проводили в 4 этапа с интервалами 30 минут с мощностью дозы 1 Гр/с для первых трех этапов и 3 Гр/с для четвертого этапа. При температуре –60°С облучение проводили в два этапа при мощности облучения 1 Гр/с с интервалом в 1 час. На каждой стадии облучения поглощенная доза составляла 1 кГр.

Величина исходных РНП представленного ВС соответствует характеристикам аналогичных продуктов, выпускаемых Fujikura, лидером по производству РСВС [14, 15] (табл. 1). Для уменьшения РНП сердцевина ВС Fujikura легирована фтором, низкое содержание которого практически не приводило к увеличению оптических потерь.

Таблица 1

Свойства световодов

Световод	λ_c, мкм	α, дБ/км, λ=1.31 мкм	α, дБ/км, λ=1.55 мкм	C_{OH}, масс %
Изготовленный	1,16	0,3	0,18	$\leq 10^{-5}$
Fujikura	≤ 1,26	0,33	0,18	$\leq 10^{-5}$

Три стадии облучения при комнатной температуре (рис. 3) показывают, что:

- РНП на длине волны 1,31 мкм в два раза выше, чем на длине волны 1,55 мкм;
- РНП на длине волны 1,55 мкм стабилизируется после дозы более 500 Гр на уровне 0,4 дБ/км, в то время как для длины волны 1,31 мкм RIA монотонно увеличивается.

Стабилизация РНП, вероятно, показывает достижение динамического равновесия между образованием и релаксацией дефектов, которое имеет место при комнатной температуре.

После завершения каждой из трех стадий облучения РНП в волокне до его исходного состояния восстанавливались через 7 минут на длине волны 1,55 мкм и более 10 минут на длине волны 1,31 мкм.

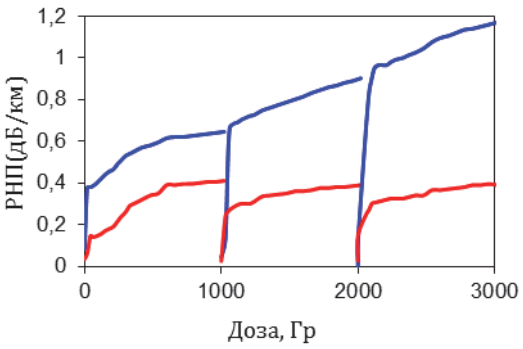


Рис. 3. Эволюция РНП при 25°С и мощности дозы 1 Гр/с с интервалом 30 минут: λ = 1,55 мкм (красная линия) и 1,31 мкм (синяя линия)

Во время четвертого этапа тестирования при мощности дозы 3 Гр/с увеличивается и РНП, и продолжительность полной релаксации по сравнению с предыдущим этапом (рис. 4).

Наилучшие РСВС на сегодняшний день [15, 17] на длине волны 1,31 мкм и при дозе поглощенного излучения 1 кГр имеют РНП в 2-5 раз выше, чем представленный ВС, ОП которого

полностью восстанавливается через 10 минут (рис. 4). ВС с сердцевиной, легированной фтором, производства Fujikura восстанавливают ОП только на 25% [15].

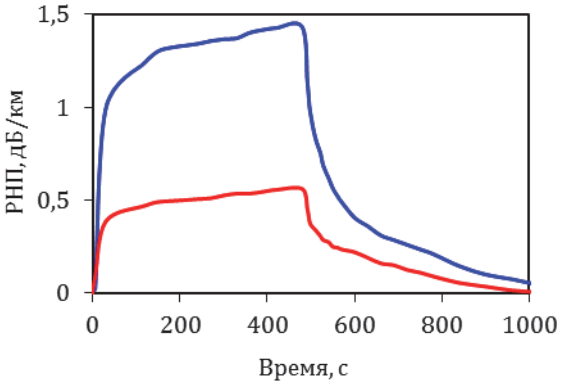


Рис. 4. Эволюция RIA во время и после облучения при мощности дозы 3 Гр/с при 25 ° С: λ = 1,55 мкм (красная линия) и 1,31 мкм (синяя линия).

С повышением температуры РНП при λ = 1,55 мкм увеличивается. Так, при температуре –60°С после воздействия дозой 1 кГр РНП достигает 7,5 дБ/км (рис. 7), а при комнатной температуре не превышает 0,4 дБ/км. (рис. 3).

Увеличение РНП с уменьшением температуры может указывать на уменьшение скорости релаксации дефектов.

Одномодовый фторсиликатный ВС, полученный традиционным методом MCVD [3] и подвергнутый аналогичной радиационной обработке при температуре –60°С, имел РНП на 5 дБ/км больше, чем представленный ВС на длине волны 1,55 мкм.

Через 7 минут после облучения при температуре –60°С представленный ВС на длине волны 1,55 мкм полностью восстанавливается (рис. 6), но ВС, полученные традиционным методом MCVD и подвергаемые такой же радиационной обработке, восстанавливает РНП только на 60% [3].

После второго этапа облучения РНП изготовленного ВС восстановились лишь на 75-80%. Этот факт может указывать на то, что в коротковолновой области спектра РНП, обусловленные поглощением, плохо релаксируют.

Повышенное содержание ОН-групп, хлора и кислорода в сердцевине ВС может стабилизировать дефекты структурной неоднородности при –60°С, исключая возможность полной релаксации РНП, вызванной РР. Образование локальных неоднородностей стекла при облучении, вероятно, связано с превращением структуры стекла из метастабильного в равновесное состояние.

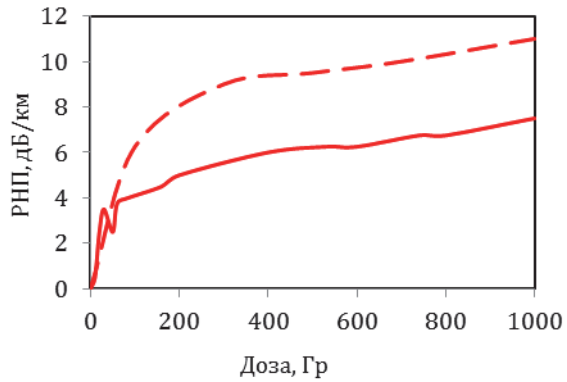


Рис. 5. Эволюция РНП при λ = 1,55 мкм при первом (сплошная линия) и повторном (пунктирная линия) облучении с мощностью дозы 1 Гр / с и при температуре –60°С

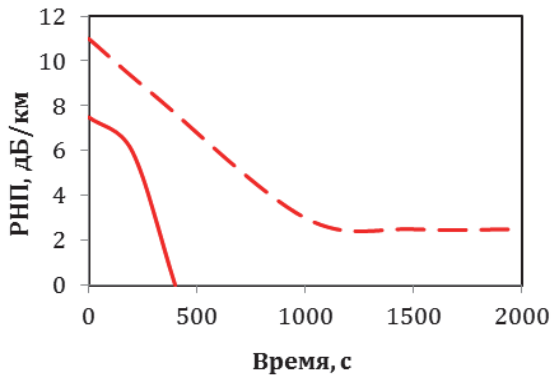


Рис. 6. Эволюция РНП при λ = 1,55 мкм после первого (сплошная линия) и повторного (пунктирная линия) облучения с мощностью дозы 1 Гр/с и при температуре –60°С

Принципиальное отличие ВС с дефицитом кислорода связано с устранением условий образования ОН-групп и NBOHC. При высокотемпературном сжатии трубки в слое сердцевины на границе с оболочкой концентрация кислорода, предшественника радиационных дефектов NBOHC, увеличивается [7] из-за различных скоростей диффузии фтора и кислорода. В то же время продувка внутреннего канала преформы при высокой температуре азотом создает дефицит кислорода в стекле сердцевины, тем самым устраняя образование предшественников NBOHC.

Заключение. Методом модифицированного химического парафазного осаждения изготовлен фторсиликатный волоконный световод с сердцевиной из кварцевого стекла с дефицитом

кислорода и низким содержанием хлора и ОН-групп, обладающий низким уровнем радиационно-наведенных потерь по сравнению с современными аналогами. Показано падение радиационной стойкости и восстанавливаемости изготовленного световода как со снижением температуры при гамма-облучении, так и с длинной волны.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Girard, S., Kuhnhenn, J., Gusarov, A., Brichard, B., Van Uffelen, M., Ouerdane, Y., Boukenter, A., and Marcandella, C.,** Radiation Effects on Silica-Based Optical Fibers: Recent Advances and Future Challenges, IEEE Trans. Nucl. Sci., 2013, 60, no 3, pp. 2015–2036.
2. **Nagel, S.R., MacChesney, J.B., Walker, K.L.,** An Overview of the Modified Chemical Vapor Deposition (MCVD) Process and Performance, IEEE J. Quantum Electron, 1982, vol. 18, no. 4, pp. 459–476.
3. **Kashaikin, P.F., Tomashuk, A.L., Dianov, E.M., Salganskii, M.Y., Gur'yanov, A.N., Azanova, I.S., Tsibinogina, M.K., Dimakova, T.V.,** Prediction of Radiation-Induced Light Absorption in Optical Fibers with an Undoped Silica Core for Space Applications Technical Physics, The Russian Journal of Applied Physics, 2019, vol. 64, no. 5, pp. 701–707.
4. **Guryanov, A.N., Salganskii, M.Yu., Khopin, V.F., Kosolapov, A.F., Semenov, S.L.,** High-aperture optical waveguides based on fluorine-doped silica glass, Inorg. Mater., 2009, vol. 45, no. 7, pp. 823–826.
5. **Nagasawa, K., Tanabe, M., and Yahagi, K.,** Gamma-ray-induced absorption bands in pure-silica-core fibers, Jpn. J. Appl. Phys., 1984, vol. 23, pp. 1608–1613.
6. **Morana, A., Cannas, M., Girard, S., Boukenter, A., Vaccaro, L., Perisse, J., Mace, J.-R., Ouerdane, Y., and Boscaino, R.**, Origin of the visible absorption in radiation-resistant optical fibers, Opt. Mater. Express, 2013, 3, 1769–1777.
7. **Bisyarin, M.A., Dukelskiy, K.V., Eronyan, M.A., Komarov, A.V., Lomasov, V.N., Meshkovskiy, I.K., Reutsky, A.A., Shcheglov, A.A., and Ustinov, S.V.,** Radiation-induced loss of silica optical fibers with fluorine-doped cladding, Mater. Res. Express, 2019, no. 6 026202.
8. **Wen, J., Peng, G.-D., Luo, W., Xiao, Z., Chen, Z., and Wang, T.,** Gamma irradiation effect on Rayleigh scattering in low water peak single-mode optical fibers, Optics Express, 2011, vol. 19, no. 23, 23278.
9. **Hanafusa, H., Hibino, Y., Ymamoto, F.,** Drawing condition dependence of radiation – induced loss in optical fibers, Ell. Let., 1986, vol. 22, no. 2, pp. 106–108.
10. T**omashuk, A.L., Dianov, E.M., Golant, K.M., Khrapko, R.R., and Spinov, D.E.,** Performance of special radiation-hardened optical fibers intended for use in the telecom spectral windows at a megagray level, IEEE Trans. Nucl. Sci., Jun. 1998, vol. 45, no. 3, pp. 1566–1569.
11. **Eronyan, M.A.,** Patent RU № 2639560 MCVD method of manufacturing single-mode optical fibers with a core of pure silica glass, 16.02.2017, published 21.12.2017.
12. **Devyatyarov, D.R., Eronyan, M.A., Lomasov, V.N., Opalihin, A.F., Skupov, Y.A., Sobol, B.A., Untilov, A.A.,** A Compact Cryothermostat with Solid Carbon Dioxide Refrigerant Technical Physics Letters, 2019, vol. 45, no.12, pp. 1220–1222.
13. **Sanada, K., Shamoto, T., and Inada, K.,** Radiation resistance characteristics of graded index fiber with a core of Ge-F-doped or B and F- codoped SiO2 glass, J. Non-Cryst. Solids, 1995, vol. 189, pp. 283–290.
14. **Wijnands, T., De Jonge, L.K., Kuhnhenn, J., Hoeffgen, S.K., Weinand, U.**, Optical absorption in commercial single mode optical fibers in a high energy physics radiation field, IEEE Trans. Nucl. Sci., 2008, vol. 55, no. 4, pp. 2216–2222.
15. **Wang Zhi, Ren Guobin, Lou Shuqin, and Jian Shuisheng,** Loss properties due to Rayleigh scattering in different types of fiber, Optics Express, 2003, vol. 11, no. 1, pp. 39–47.
16. **Dianov, E.M., Golant, K.M., Khrapko, R.R., and Tomashuk, A.L**., Nitrogen doped silica core fibers: a new type of radiation-resistant fiber, Electron. Lett., 1995, vol. 31, pp. 1490–1491.
17. **Wijnands, T., Aikawa, K., Kuhnhenn, J., Ricci, D., Weinand, U**., Radiation tolerant opticalfibers: From sample testing to large series production, J. Lightw. Technol., 2011, Nov., vol. 29, no. 22, pp. 3393–3400.

D.R. Devetyarov, M.A. Eronyan (JSC Concern Central research Institute Electropribor, St. Petersburg)

RADIATION-RESISTANT OPTICAL FIBER WITH AN OXYGEN-DEFICIENT SILICA GLASS CORE

Fluorosilicate single-mode optical fiber with silica glass core was manufactured. Influencing of oxygen-deficiency in a silica glass core of the manufactured optical fiber on radiation resistant was investigated. Increasing of radiation-induced attenuation (RIA) with temperature (from +25 to minus 60 °C) and wavelength (from 1.55 to 1.33 μm) decreasing. After irradiation stop, RIA at the room temperature completely disappears at a wavelength of 1.55 μm was presented. Discovered, that increasing RIA due to Rayleigh scattering and absorbtion superposition with absorption decreases with wavelength growth.

Д. П. ЕЛИСЕЕВ, К. С. МАЛАШЕНКОВ, Р. Д. КОНАКОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-ПЕЧАТИ МЕТАЛЛАМИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ВИБРОУДАРОЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

В работе представлены результаты исследований механических свойств деталей, изготовленных при помощи 3D-печати из порошковой стали 07Х18Н12М2. На основе экспериментальных данных разработана и верифицирована имитационная модель исследуемого материала в среде конечно-элементного анализа. Полученные результаты позволили спроектировать и провести моделирование малогабаритного виброударозащитного устройства, пригодного для амортизации микромеханических гироскопов.

Введение. Основная особенность проектирования виброударозащитных устройств (ВУЗУ) для гироскопических приборов (ГП) – это необходимость сохранения углового положения амортизируемой платформы в процессе и после соответствующих динамических воздействий. Для классических ГП (с чувствительными элементами (ЧЭ) в поплавковом или электростатическом подвесе) указанная задача решается разработкой ВУЗУ со сложной кинематической схемой, прецизионными подшипниковыми и пружинными узлами [1, 2]. В результате чего размеры таких устройств в несколько раз превосходят размеры амортизируемого ГП, что компенсируется значительным повышением эксплуатационных характеристик последнего.

Повышение эксплуатационных характеристик за счет увеличения размеров не всегда оправдано при проектировании малогабаритных ГП на базе перспективных ЧЭ, например микромеханических, ядерно-магнитных или на волнах материи [3]. Уровень современного развития аддитивных технологии (3D-печати) позволяет создавать различные конструкции с нетривиальной геометрической формой и из всевозможных материалов, в том числе металлов. Настоящая работа является продолжением исследования авторов [4–6], нацеленного на разработку малогабаритного ВУЗУ, изготовление которого возможно только при помощи 3D-печати, а его применение целесообразно для ГП на базе перспективных ЧЭ.

Постановка задачи. На сегодняшний день в приборостроении широко развит подход к проектированию различных узлов с использованием конечно-элементного анализа (КЭА). Преимуществом такого метода является возможность предсказывать поведение исследуемой конструкции при различных внешних воздействиях, не проводя дорогостоящих экспериментов, а недостатком – необходимость точного знания большого количества ее (конструкции) параметров. Среди последних следует выделить механические свойства используемых материалов, без определения которых проведение КЭА влияния механических воздействий невозможно: модуль Юнга, коэффициент Пуассона, коэффициент демпфирования, пределы прочности и текучести. Несмотря на то что количественные значения представленных характеристик сплавов, используемых в 3D-печати за рубежом, достаточно хорошо изучены [7–10], соответствующие свойства отечественных сплавов, как правило, приводятся только в рекламных брошюрах материалов.

Таким образом, для разработки малогабаритного ВУЗУ в первую очередь необходимо определить механические свойства используемого материала. После чего разработать и верифицировать его имитационную модель в среде КЭА, с использованием которой спроектировать и оптимизировать конструкцию устройства.

Определение механических свойств. Для изучения механических свойств выбрана марка стали 07Х18Н12М2 (международный аналог – сталь 316) производства АО «ПОЛЕМА» (www.polema.net), которая используется для получения гранулированного порошка, пригодного для 3D-печати. Из указанного материала изготовлены образцы цилиндрической формы для испытаний на растяжение, размеры которых соответствуют ГОСТ 1497-84 с диаметром рабочей части 5 мм (рис. 1). При производстве использована установка SLM 260 (фирмы SLM), причем для изучения анизотропии свойств полученных образцов часть из них напечатанf вертикально, а часть – горизонтально (рис. 2).

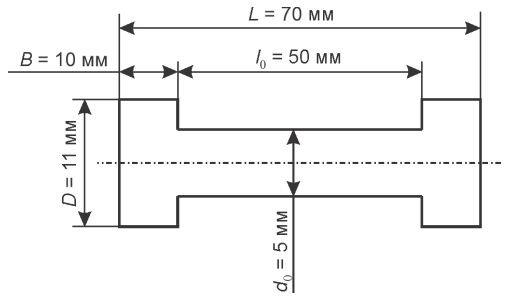


Рис. 1. Номинальные размеры изготовленных образцов

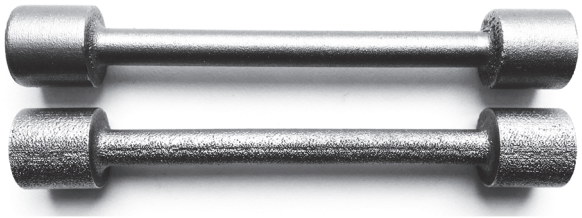
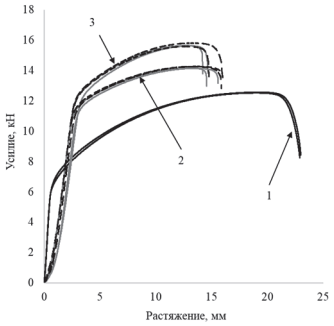


Рис. 2. Образцы, напечатанные вертикально (сверху) и горизонтально (снизу)



1 – 12Х18Н9Т,
2 и 3 – 07Х18Н12М2, вертикальная и горизонтальная печать соответственно
Рис. 3. Диаграммы растяжения исследуемых образцов

Исследование полученных образцов показало, что при горизонтальной печати размеры образцов получаются значительно точнее, чем при вертикальной. Это объясняется неоднородностью фракций порошка, из которого изготавливаются образцы, и геометрическими неточностями рекоатера, «раскатывающего» слои. Кроме того, в обоих рассмотренных случаях направления печати отклонения размеров остаются на том же уровне при увеличении их номинальных значений. В результате квалитет размера уменьшается, а сама деталь становится более точной. Стоит также отметить, что напечатанные образцы хорошо поддаются механической обработке, а качество полученных поверхностей и точность геометрической формы не уступают аналогичным параметрам образцов, изготовленных традиционным способом.

Испытания на растяжение образцов показали, что значения прочностных характеристик стали 07Х18Н12М2, использованной при 3D-печати, выше аналогичных значений широко используемой в приборостроении стали 12Х18Н9Т, но близки к значениям, полученным в работах [7, 11, 12]. Объясняется это тем, что факторами повышения прочности являются наночастицы конденсации пара над зоной плавления и ультрамелкозернистое строение, формируемое на этапе кристаллизации в последовательности: порошок → плавление и испарение → конденсация и кристаллизация → оседание и встраивание шарообразных частиц в материал [13]. Стоит отметить, что напечатанные образцы более хрупкие и менее пластичные по сравнению с образцами, изготовленными традиционным способом, что характеризуется видом диаграмм растяжения на рис. 3. Тем не менее при усилии, приводящем к разрыву последних, первые еще «находятся» в области пластических деформаций.

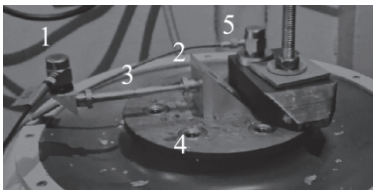


Рис. 4. Виброиспытания

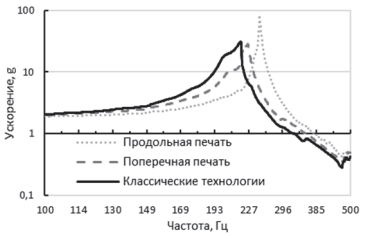


Рис. 5. Результаты виброиспытаний

Частотные характеристики образцов и коэффициент демпфирования определены в ходе виброиспытаний (рис. 4), при которых исследуемые образцы 3 при помощи оснастки 2 закреплялись на стенде 4, который воспроизводил вибрационное воздействие, контролируемое акселерометром 5. Записывались показания измерительного акселерометра 1 (рис. 5). Результаты испытаний показали наличие существенной анизотропии механических свойств исследуемых образцов.

Разработка и верификация имитационной модели в рамках настоящей работы включала в себя выбор таких параметров моделируемого материала, которые обеспечивают наилучшее совпадение результатов КЭА с экспериментальными данными. В ходе выполнения исследования получено, что основным параметром, влияющим на точность моделирования, является модуль Юнга. Учитывая, что указанный параметр характеризует упругость материала, при разработке и расчетах ВУЗУ необходимо знать не только его статическое значение (в случае отсут-

ствия динамических воздействий), но также вибрационное и ударное (при воздействии вибраций и ударов соответственно). Первый определен моделированием КЭА данных, полученных в ходе испытаний на растяжение (рис. 3), а вибрационный и ударный модули Юнга – данных эксперимента, показанного на рис. 4.

В табл. 1 сведены механические свойства стали 07Х18Н12М2, полученные экспериментально и КЭА. Совокупность приведенных значений представляет собой имитационную модель, пригодную для интеграции в любой пакет КЭА.

Таблица 1

Механические свойства стали 07Х18Н12М2

Направление печати	Модуль Юнга, ГПа		Коэффициент Пуассона	Коэффициент демпфирования, %	Пределы, МПа	
	Статический	Вибрационный			Текучести	Прочности
Вертикальная	181,3	289,9	0,34	0,8	519	728
Горизонтальная	176,1	215,9	0,32	2,78	546,9	770,6

Разработка ВУЗУ осуществлялась с учетом необходимости обеспечения плоскопараллельного перемещения амортизируемого прибора при внешних воздействиях. В этой связи в качестве основного упругого элемента использованы плоские торсионы, аналогичные используемым в микромеханических датчиках [14]. На рис. 6 представлена модель разработанного устройства, габаритные размеры которого составили 90×90×10 мм, а его изготовление осуществимо только с использованием 3D-печати. Плоские пружины 3 обеспечивают перемещение площадки 1 для установки ГП относительно крепежных отверстий 2 в направлении оси *Z*, торсионы 4 – в направлении оси *Y*, а торсионы 5 – в направлении оси *X*. Размеры площадки 1 соответствуют размерам микромеханического гироскопа ММГ-ЭП1 и составляют 40×40 мм.

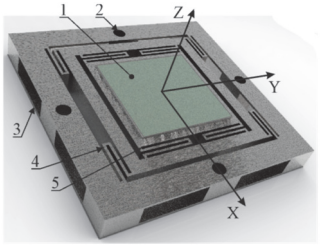


Рис. 6. Модель ВУЗУ

Собственные частоты поступательных колебаний разработанного ВУЗУ лежат в диапазоне от 265 до 384 Гц, при этом частота низшей крутильной формы колебаний более чем в 1,6 раза превосходит указанные значения и составляет 616 Гц. Результаты моделирования воздействия на устройство вибрационного ускорения с амплитудой 2 g в диапазоне частот от 10 до 10000 Гц (рис. 7) показали, что такое соотношение вызывает отклонение плоскости площадки от плоскости *OXY* (угол *a*) менее чем на 36 угл. с и вращение вокруг оси *Z* (угол *b*) менее чем на 0,6 угл. с. Эффективное снижение амплитуды вибрационного ускорения достигается на частотах более 350, 420 и 600 Гц при воздействии в направлении *X*, *Y* и *Z* соответственно.

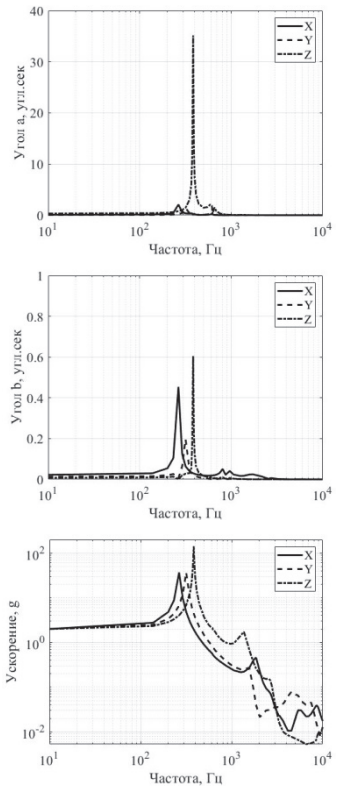


Рис. 7. Результаты моделирования воздействия вибрационного ускорения с амплитудой 2 g в диапазоне частот от 10 до 10000 Гц по направлениям *X*, *Y* и *Z*

Большинство микромеханических гироскопов нечувствительны к воздействию вибрации с частотой, меньшей значения собственной частоты упругого подвеса инерционного тела, деленной на 4 [15]. Учитывая результаты моделирования, разработанное ВУЗУ может быть использовано для указанного типа датчиков с собственной частотой более 2400 Гц с обеспечением сохранения его углового положения с точностью до 36 угл. с. Указанные значения удовлетворяют широкому спектру существующих приборов [3].

Моделирование воздействия на ВУЗУ ударного ускорения с амплитудой 1000 g показало его эффективность при длительности импульса до 1 мс.

Заключение. В ходе проведенных исследований изучены механические свойства деталей, напечатанных из порошковой стали 07Х18Н12М2. Полученные результаты демонстрируют, что их значения не уступают свойствам деталей, изготовленным при традиционной обработке. Разработанная имитационная модель исследованного материала позволяет проводить КЭА новых кон-

струкций различных приборов и узлов и предсказывать их поведение как при статических, так и при динамических нагрузках.

С использованием указанной модели разработана конструкция малогабаритного ВУЗУ для микромеханических гироскопов, изготовление которого возможно только при помощи 3D-печати. КЭА устройства показал, что его применение целесообразно для датчиков с собственной частотой упругого подвеса инерционного тела выше 2400 Гц и обеспечивает сохранение его углового положения с точностью до 36 угл. с.

Развитие настоящих исследований включает в себя изготовление разработанной конструкции ВУЗУ и ее экспериментальное исследование, а также обобщение методологии проектирования ВУЗУ на другие типы перспективных ЧЭ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Авторское свидетельство** 902238 СССР, МПК F16F 15/00 (2000.01). Устройство для амортизации / Ю. Л. Аванесов и др.; заявитель Предприятие П/Я В-8624. – № 2715824 ; заявл. 15.01.1979 ; опубл. 30.01.1982.
2. **Елисеев Д. П.** Обзор средств защиты инерциальных чувствительных элементов от инерционных воздействий // Материалы XIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движение». 2012. С.464–470.
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. **Eliseev, D.P., Malashenkov, K.S.** Implementation of metal 3D-printing in manufacturing navigation systems: the results of practical studies, Journal of Physics: Conference Series, 2020, vol. 1536, pp. 012009.
5. **Малашенков К.С., Елисеев Д.П.** Результаты испытаний на растяжение металлических изделий, полученных аддитивным способом // Материалы XXI конференции молодых ученых «Навигация и управление движение». 2019. С. 356–358.
6. **Малашенков К.С., Елисеев Д.П.** Анализ возможности применения аддитивных технологий при проектировании приборов навигации // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. XLVIII научная и учебно-методическая конференция Университета ИТМО. 2019. С. 118–121.
7. **Lewandowski, J.J., Seifi, M.,** Metal additive manufacturing: a review of mechanical properties, Annual review of materials research, 2016, vol. 46, pp. 151–186.
8. **Khorasani, A., Gibson, I., Awan, U.S., Ghaderi, A.,** The effect of SLM process parameters on density, hardness, tensile strength and surface quality of Ti-6Al-4V, Additive Manufacturing, 2019, vol. 25, pp. 176–186.
9. **Dörfert, R., Zhang, J., Clausen, B., Freiße, H., Schumacher, J., & Vollertsen, F.,** Comparison of the fatigue strength between additively and conventionally fabricated tool steel 1.2344, Additive Manufacturing (2019), https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.01.010.
10. **Holzweissig, M.J., Taube, A., Brenne, F., Schaper, M., Niendorf, T.,** Microstructural characterization and mechanical performance of hot work tool steel processed by selective laser melting, Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, vol. 46, no. 2, pp. 545–549.
11. **Shrestha, R., Simsiriwong, J., Shamsaei, N., Thompson, S. M., Bian, L.,** Effect of Build Orientation on the Fatigue Behavior of Stainless Steel 316L Manufactured Via A Laser-Powder Bed Fusion Process, 27th Annual Solid Frefform Fabrication Symposium Proceedings, 2016, pp. 605–616.
12. **Holzweissig, M.J., Taube, A., Brenne, F., Schaper, M., Niendorf, T.,** Microstructural characterization and mechanical performance of hot work tool steel processed by selective laser melting, Metallurgical and Materials Transactions B, 2015, vol. 46, no. 2, pp. 545–549.
13. **Барахтин Б.К., Жуков А.С., Бобырь В.В., Шакиров И.В., Кузнецов П.А.** Факторы повышения прочности металлов, полученных селективным лазерным сплавлением порошков // Вопросы материаловедения. 2019. №3 (95). С. 68–75.
14. **Евстифеев М.И.** Упругие подвесы приборов навигации // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2007. С. 51–56.
15. **Baranova, E.A., Evstifeev, M.I., Eliseev, D.P.,** Simulation of translational vibrations effect on torque-to-balance RR-type mems gyroscope, Gyroscopy and Navigation, 2018, vol. 9, no.1, pp. 50–56.

D.P. Eliseev, K.S. Malashenkov, R.D. Konakov (CSRI Elektropribor, ITMO University, Saint-Petersburg)

METAL 3D-PRINTING APPLICATION IN DESIGNING OF VIBRATION AND SHOCK PROTECTION EQUIPMENT OF GYROSCOPIC DEVICES

The mechanical properties investigation results of 3D-printed parts by steel 316 are given. The imitation model of the material is designed based on experimental data and verificated by finite element analyses. The small-sized vibration and shock protection equipment is designed and modeled related to the achieved results. The equipment propriate to protect micromechanical gyroscopes.

А. Н. ШЕВЧЕНКО
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ В ПОЛОСТИ ЯЧЕЙКИ КВАНТОВОГО ДАТЧИКА

Рассматриваются технологические вопросы обеспечения заданных параметров газовой смеси в полости рабочей ячейки таких квантовых датчиков, как ядерный магнитный гироскоп и квантовый магнитометр. Приводится сравнение методов герметизации ячеек и представлены экспериментальные результаты разрушающего и неразрушающего контроля параметров газовой среды в изготовленных ячейках.

Введение. В настоящее время ведутся активные работы по созданию квантовых датчиков с оптической накачкой и детектированием магнитного резонанса в газовой среде [1, 2]. Тип и назначение датчика определяют состав газовой среды в рабочей ячейке: например, для стандарта частоты [3, 4] и квантового магнитометра с оптической накачкой [5, 6] достаточно наличия в ячейке паров щелочного металла и буферного газа (азота), в то же время для ядерного магнитного гироскопа [7–9] или трехкомпонентного квантового магнитометра [10] требуется добавление изотопов благородного газа. Точность и чувствительность указанных выше приборов во многом зависит от параметров газовой среды и наличия примесей в полости рабочей ячейки.

К ячейкам ядерного магнитного гироскопа (ЯМГ), содержащим смесь изотопов ксенона ^{129}Xe и ^{131}Xe, кроме стандартных требований по долговечности, разбросу характеристик, качеству оптических поверхностей, предъявляется ряд специфических требований. В первую очередь эти требования обусловлены наличием у ядра ^{131}Xe квадрупольного электрического момента, который приводит к уменьшению времени жизни изотопа и расщеплению уровней энергетической структуры ^{131}Xe при наличии градиента электрического поля. Эти эффекты в значительной мере могут быть скомпенсированы при условии однородности материала стенок и обеспечения пространственной симметрии ячейки. Кроме того, повышенные требования предъявляются к чистоте газовой смеси, поскольку некоторые вещества являются активными релаксантами (разрушителями момента) для ^{131}Xe. Следует отметить, что требование симметрии плохо согласуется с требованием чистоты газовой смеси из-за особенностей процесса герметизации ячейки.

Существующие в настоящее время лабораторные технологии изготовления газонаполненных ячеек [11, 12] включают ряд достаточно сложных операций, на каждой из которых может произойти нарушение требуемого полного давления газовой смеси, парциальных давлений ее компонент или попадание примесей. Отклонение давлений компонент рабочей газовой смеси от заданных значений приводит к ухудшению отношения «сигнал–шум» квантового датчика, а примеси могут вступать в реакцию с парами щелочного металла, что приведет к нестабильности показаний прибора и уменьшению его чувствительности [13–15].

В предлагаемом докладе рассмотрены основные причины нарушения заданных параметров газовой среды, связанные с методом герметизации ячеек, и проведено сравнение различных методов контроля указанных параметров.

Методы герметизации газовых ячеек. Для исследований влияния состава газовой смеси на качество резонансов в условиях лабораторных установок АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» был изготовлен ряд сферических ячеек различного объема и с различным соотношением рабочих газов [16]. Фотографии ячеек приведены на рис. 1, *а*. Герметизация ячеек производилась стеклодувным методом – отпайкой длинного штенгеля. Основным преимуществом данной технологии можно считать простоту обеспечения заданного общего давления газовой смеси благодаря малому нагреву стенок ячейки в момент отпайки. Недостатком классических стеклодувных ячеек является сложность миниатюризации – невозможность контролировать сферическую симметрию внутреннего объема и нарушение симметрии штенгелем.

Для макета ЯМГ были созданы микроминиатюрные ячейки кубической формы (рис. 1, *б*) из стеклянной трубки с квадратным сечением и двух плоских окон. Сварка ячейки производилась промышленным CO_2 лазером. В отличие от сферических ячеек, которые наполнялись газовой

смесью при непосредственном подсоединении к вакуумному посту, кубические ячейки размещались в специальном отсеке вакуумного поста, который целиком наполнялся рабочей газовой смесью, после чего производилась окончательная герметизация ячейки путем лазерной заварки небольшого отверстия. Преимуществом данной технологии является возможность обеспечить достаточную симметрию внутреннего объема, однако был обнаружен и ряд недостатков. Прежде всего, при герметизации происходит сильный нагрев ячейки и вытекание газа из ячейки в более холодные области вакуумного поста (изобарный процесс). Также расплавление стекла в вакууме приводит к выделению из примесных газов. В ходе эксплуатации таких ячеек было обнаружено негативное влияние щелочного металла в твердой фазе непосредственно в объеме ячейки [17].

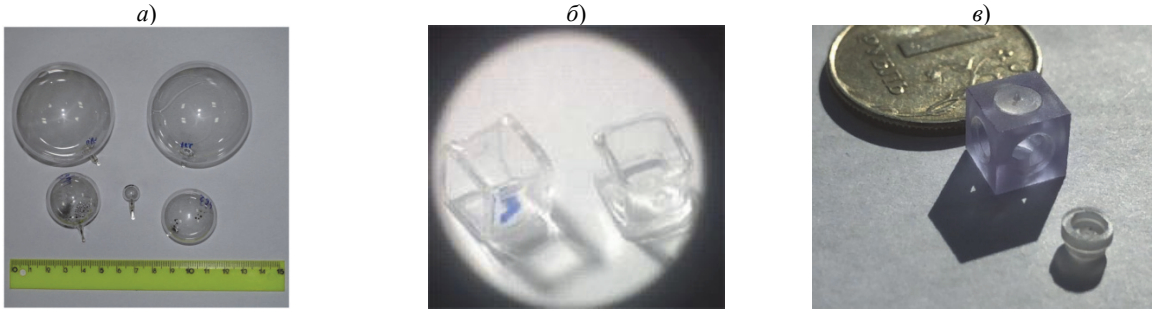


Рис. 1. Экспериментальные ячейки ЯМГ различных размеров для исследований на лабораторных стендах и в составе макета ЯМГ

В настоящее время в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» ведется разработка сапфировых ячеек со стеклянным штенгелем (рис. 1, *в*). Механическая обработка сапфира позволяет получить заданную форму и обеспечить пространственную симметрию ячейки. В одном из окон сапфировой ячейки делается отверстие, через которое во внутренний объем будут попадать пары щелочного металла, в то время как сам металл будет в большей части находиться в стеклянном штенгеле, приваренном со стороны отверстия. Герметизация ячейки классическим способом по средствам отпайки штенгеля позволит обеспечить заданное давление и чистоту газовой смеси.

Определение параметров газовой смеси. Контроль состава газовой смеси и наличия примесей производится косвенными и аналитическими методами. К косвенным методам относится определение газового состава путем измерения спектров поглощения резонансного излучения парами щелочного металла и исследование влияния на время жизни изотопов ксенона таких факторов, как температура и градиент магнитного поля [16, 18].

Хорошо известно, что столкновения атомов щелочных металлов с атомами буферных газов, таких как азот, ксенон, криптон, аргон, неон, гелий и другие, приводят к уширению и сдвигу спектральных линий. Физическая причина этого лежит в деформации электронной оболочки возбужденного состояния металла во время соударения. Величина уширения и сдвига пропорциональна числу соударений в единицу времени, или, другими словами, плотности буферных газов [19, 20]. Точно измеряя величину и сдвиг, можно определить полное давление газа. Имея двухкомпонентную смесь газов с различными константами уширения и сдвига, также можно определить их давления, измеряя уширение и сдвиг. Если константы различаются незначительно, точность определения состава газовой смеси оказывается невысокой, поскольку малые ошибки измерения (главным образом систематические) величин сдвига и уширения оказываются усиленными по механизму деления на малую величину при решении обратной задачи. Преимуществом метода анализа спектров поглощения являются возможность достаточно точно определить полное давление газовой смеси и относительная простота установки для проведения исследований. Недостатком является возможность определения давления не более двух компонент газовой смеси, например азота и суммарного давления всех изотопов ксенона.

Вторым косвенным методом является измерение времени жизни изотопов ксенона при различных внешних условиях, которое является определяющим фактором чувствительности ЯМГ.

Возможность раздельно наблюдать уровень сигналов ксенона ^{129}Xe и ^{131}Xe позволяет оценить с использованием математической модели газовой ячейки [21] парциальное давление каждого из изотопов. Данный метод не подходит для проверки ячеек стандартов частоты и магнитометров с оптической накачкой, зато позволяет оценить достижимую точность ЯМГ, в конструкцию которого войдет исследуемая ячейка. Общий недостаток указанных выше методов – невозможность определить наличие и состав примесей в газовой смеси.

Для анализа состава газовой смеси на наличие примесей используется метод масс-спектрометрического анализа. В АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» была разработана и изготовлена специальная герметичная камера, имеющая механический манипулятор для деструкции ячеек с последующим выделением содержимого в объем камеры. По изменению давления в камере после деструкции ячейки производится определение суммарного давления газовой смеси, после чего она подается на масс-спектрометр.

Разработанный масс-спектрометрический метод контроля качественного и количественного состава рабочей газовой смеси [22] показал себя как достаточно точный, быстрый и удобный метод. Кроме разрушения ячейки к недостаткам данного метода можно отнести низкую точность определения суммарного давления газовой смести.

В табл. 1 приведены результаты анализа различными методами параметров газовой смеси ячеек (все ячейки герметизированы стеклодувным способом).

Таблица 1

Сравнение различных методов анализа параметров газовой смеси ячеек

№	Давления	P_{N2}	P_{Xesum}	P^{129}_{Xe}	P^{131}_{Xe}	H_20	O_2	CO_2	P_{sum}
		торр	торр	торр	торр	торр	торр	Торр	торр
1	Заявленные	40,0	20,0	–	–	–	–	–	60,00
	По опт. поглощению	25,0	35,0	–	–	–	–	–	60,00
	По мат. модели	36,0	24,0	–	–	–	–	–	60,00
	Масс-спектр. анализ	21,1	10,5	–	–	0	0	0	31,60
2	Заявленные	9,0	26,0	5,0	21,0	–	–	–	35,00
	По опт. поглощению	32,9	12,8	–	–	–	–	–	45,68
	По мат. модели	28,0	7,0	6,9	0,1	–	–	–	35,00
	Масс-спектр. анализ	31,4	0,4	0,4	0,01	0	0	0	31,80
3	Заявленные	5	40	–	–	–	–	–	45,00
	По опт. поглощению	12	38	–	–	–	–	–	50,00
	По мат. модели	14,0	31	–	–	–	–	–	45,00
	Масс-спектр. анализ	0,8	7,0	–	–	0,24	0,08	0,0	7,80
4	Заявленные	5	80	–	–	–	–	–	85,00
	По опт. поглощению	17,0	72,0	–	–	–	–	–	89,00
	По мат. модели	31	54	–	–	–	–	–	85,00
	Масс-спектр. анализ	0,7	8,7	–	–	0,07	0,4	0,009	9,40

Заключение. На основе экспериментальных данных можно сделать вывод, что изготовление ячеек, содержащих газовую смесь с заданными параметрами, является сложной технологической задачей. В части герметизации наиболее перспективным представляется использование стеклодувной отпайки, обеспечивающей стабильность суммарного давления в изготавливаемых ячейках, совместно с сапфировым корпусом, обеспечивающим симметрию внутреннего объема. Выявленная сложность обеспечения парциальных давлений компонентов газовой смеси может быть исключена предварительной подготовкой рабочей смеси в большом объеме, что было нереализуемо на стадии поиска оптимальных параметров смеси. Предложенный метод масс-спектрометрического анализа также был необходим на стадии отработки лабораторной технологии изготовления ячеек. Впоследствии он может стать наиболее быстрым методом отбраковки неудачных партий ячеек, позволяющим сделать вывод о качестве произведенных газонаполненных ячеек до их установки в систему магнитных экранов и настройки оптической схемы ЯМГ или магнитометра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kitching, J., Knappe, S., Donley, E.A.,** Atomic sensors – a review, IEEE Sensors Journal, 2011, vol. 11, no. 9, pp. 1749–1758.
2. **Degen, C.L., Reinhard, F., Cappellaro, P.,** Quantum sensing, Reviews of modern physics, 2017, vol. 89, no 3, pp. 035002.
3. **Патент РФ** на изобретение N 2408978, 10.01.2011.
4. **Патент РФ** на полезную модель N 133354, 10.10.2013.
5. **Вершовский А.К., Пазгалёв А.С.** Квантовые М-х–магнитометры с оптической накачкой: цифровые способы измерения частоты Мх–резонанса в быстро меняющемся поле // Журнал технической физики. 2006. Т.76. Вып.7. С. 108–112.
6. **Groeger, S., Bison, G., Schenker, J.L., Wynands, R., and Weis, A.,** A high-sensitivity laser-pumped M-x magnetometer, Eur. Phys. J. D, 2006, vol. 38, pp. 239–247.
7. **Walker, T.G., Larsen, M.S.,** Spin-Exchange-Pumped NMR Gyros , Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics, 2016, vol. 65, pp. 373–401.
8. **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 7–9 октября 2014. С. 35–42.
9. **Bezmen, G.V. et al.,** A Two-Frequency Spin Oscillation System for a Quantum Angular Rate Sensor, Gyroscopy and Navigation, 2020, vol. 11, no. 2, pp. 115–123.
10. **Bulatowicz, M., Larsen, M.,** Compact atomic magnetometer for global navigation (NAV-CAM), Proc. IEEE PLANS, Apr. 2012, pp. 1088–1093.
11. **Патент США** N 7292031, 6.11.2007.
12. **Патент РФ** на изобретение N 25584358, 27.06.2015.
13. **Popov, E.N. et al.,** Behavior of Signal from Optical Circuit of Quantum Rotation Sensor Based on Nuclear Magnetic Resonance, Gyroscopy and Navigation, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 183–190.
14. **Popov, E.N. et al.,** The Frequency Shifts of the Nuclear Magnetic Momenta Larmor Precession in the Mixture of Two Noble Gases, Applied Magnetic Resonance, 2017, vol. 48, no. 8, pp. 761–770.
15. **Popov, E.N. et al.,** Frequency line of nuclear magnetic resonance in quantum rotation sensor: Negative effect of detection circuit, Gyroscopy and Navigation, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 91–96.
16. **Kislitsina, E.A., Shevchenko, A.N.,** Magnetic field gradient requirements determination to identify a nuclear magnetic resonance gyroscope metrological characteristics // Сборник трудов VII Конгресса молодых ученых, СПб., 2018.
17. **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.
18. **Mirijanian, J.J.,** Techniques to characterize vapor cell performance for a nuclear-magnetic-resonance gyroscope, 2012.
19. **Pitz, G.A., Wertepny, D.E., and Perram, G.P.,** Pressure broadening and shift of the cesium D1 transition by the noble gases and N_2, H_2, HD, D_2, CH_4, C_2H_6, CF_4, and 3He, Phys. Rev A, 2009, 80, 062718.
20. **Pitz, G.,** Collisional Dynamics of the Cesium D1 and D2 Transitions, dissertation, Ohio,2010
21. **Вершовский А.К., Петров В.И.** Моделирование размерных зависимостей изотопического сдвига ЯМР в ксеноне // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №. 2. С. 109.
22. **Шевченко А.Н., Кузьмин А.Г., Титов Ю.А.** Масс-спектрометрическое измерение состава газовых смесей в ячейках квантового датчика вращения // Научное приборостроение. 2018. Т. 28. №. 2. С. 62–68.

A.N. Shevchenko (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF THE FORMATION AND CONTROL OF A GAS MIXTURE IN THE VAPOR CELL OF A QUANTUM SENSOR

The technological issues of ensuring the specified parameters of the gas mixture in the vapor cell of quantum sensors are considered. A comparison of the methods of manufacturing and sealing cells is given and experimental results of destructive and non-destructive testing of the parameters of the gas mixture in the manufactured cells are presented.

Приглашенная секция

НАБЛЮДАТЕЛИ И ФИЛЬТРЫ

Совместное заседание XXXII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова и конференции «Математическая теория управления и ее приложения» (МТУиП-2020)

И. Б. ФУРТАТ
(ИПМаш РАН, Санкт-Петербург)

Б. Р. АНДРИЕВСКИЙ
(ИПМаш РАН, Санкт-Петербургский государственный университет,
Балтийский государственный технический университет, Санкт-Петербург)

НАБЛЮДАТЕЛИ ВОЗМУЩЕНИЙ И ИХ ПРИЛОЖЕНИЯ

Доклад посвящен истории развития и современному состоянию теоретических методов построения наблюдателей возмущений, появление которых в теории и практике управления восходит к середине 60-х годов прошлого века и связано с расширением алгебраических методов синтеза регуляторов, появлением компьютерно-ориентированных процедур синтеза, усложнением круга решаемых задач и стремлением оптимизировать процесс управления.

Введение. В данном докладе представлен краткий обзор, полная версия которого отражена в работах [1, 2]. Статья [1] посвящена изложению истории развития и современного состояния теоретических методов построения наблюдателей возмущений, появление которых в теории и практике управления восходит к середине 60-х годов прошлого века и связано с расширением алгебраических методов синтеза регуляторов, появлением компьютерно-ориентированных процедур синтеза, усложнением круга решаемых задач и стремлением оптимизировать процесс управления. Рассматриваются линейные и нелинейные динамические модели объектов в непрерывном и дискретном времени при наличии случайных и неслучайных возмущений и помех измерения. Под возмущениями понимаются сигналы, действующие на динамическую систему, а под помехами – сигналы, действующие на измерения. Под наблюдателем возмущения (помехи) понимается динамическая модель данного сигнала возмущения (помехи). В обзоре описываются наблюдатели гармонических возмущений, излагается метод внутренней модели, рассматриваются наблюдатели ограниченных возмущений, описываются методы оценки возмущений с использованием вспомогательных фильтров в форме передаточных функций и наблюдателей состояния.

Статья [2] сосредоточена на практическом применении наблюдателей возмущений. Рассмотрены такие приложения, как управление судами и подводными аппаратами, управление летательными аппаратами, роботами-манипуляторами, подавление узкополосных вибрационных колебаний, оценивание и подавление возмущений в электротехнических системах, управление автомобилями и их узлами, а также некоторые другие приложения.

Постановка задачи. История появления наблюдателей возмущений в теории и практике управления восходит к середине 60-х гг. XX в. и связана с расширением алгебраических методов синтеза регуляторов, появлением компьютерно-ориентированных процедур синтеза, усложнением круга решаемых задач и стремлением оптимизировать процесс управления. В теории оптимального управления стало уделяться все большее внимание решению таких слож-

ных задач, как управление нелинейными и многосвязными (MIMO) системами, а используемые в то время методы управления часто оказывались более чувствительными к возмущениям и помехам, чем классические [3].

В начале 1970-х гг. появились многие публикации о неудаче в применении имеющихся методов оптимального управления из-за отсутствия робастности синтезированных регуляторов [4–6]. Решением явилось понимание важности учета при синтезе регуляторов существенных возмущений, что в 1970-х гг. инициировало разработку методов робастного управления [3, 6–9]. Для снижения чувствительности к возмущениям обычных наблюдателей состояния (Калмана, Луенбергера) в то время были предложены робастные варианты наблюдателей, учитывающие внешние неизмеряемые возмущения. Сюда же можно отнести и наблюдателей неизвестных входных сигналов [3, 10].

В настоящее время робастность по отношению к возмущениям и помехам, как и выполнение требований устойчивости и качества работы системы, стали ключевой задачей синтеза регуляторов в обратной связи [3]. Как хорошо известно из классической теории управления, робастность по отношению к возмущениям может достигаться подавлением влияния возмущений обратной связью или их компенсацией в разомкнутом контуре [11, 12]. Возможно также комбинированное управление, сочетающее оба метода [13, гл. 9].

Поскольку в публикациях принято, что возмущения непосредственно не измеряются, то компенсация в разомкнутом контуре становится подавлением возмущений по измерениям выхода, т.е. также с помощью обратной связи. В обзорах [14, 15] аннотированы появившиеся за период 1980–1998 гг. публикации по оцениванию изменяющихся во времени входных сигналов (в том числе и возмущений) для различных классов динамических систем.

К публикациям по проблеме идентификации (восстановления) нестационарного входного сигнала, действующего на динамический объект, относятся публикации по аппроксимационным методам идентификации с использованием глобальной аппроксимации [15–17], локальной аппроксимации [18, 19], по методам на основе теории инвариантных наблюдателей [20, 21], теории обращения и смежных подходов [22, 23] и некоторые другие публикации [24–26].

Чтобы преодолеть проблему, возникающую при невозможности непосредственного измерения возмущений для их компенсации в разомкнутом контуре, разработаны наблюдатели, позволяющие оценивать возмущения на основе доступных измерению переменных состояния объекта и модели его динамики. Робастность регулятора достигается использованием оценок возмущений вместо их истинных значений. Тем самым неявно синтезируется регулятор в обратной связи. Поэтому для задач подавления неизмеряемых возмущений разница между указанными двумя подходами имеет методический характер, относящийся больше к способу синтеза регулятора, а не к свойствам полученной системы. Поскольку для синтеза наблюдателя возмущений используется их представление как процесс на выходе некоторой динамической системы, которая дополняет модель самого объекта управления, то в большом числе публикаций такая структура трактуется в качестве реализации «принципа внутренней модели» (англ. – Internal Model Principle), см., например, [3, 8, 27, 28].

Методы синтеза наблюдателей возмущений получили дальнейшее развитие в направлениях применения адаптивного подхода [29, 30], скользящих режимов [31], нелинейных наблюдателей [31, 32], наблюдателей для объектов с запаздыванием [33, 34] и других. Следует отметить, что задача оценивания и подавления возмущений может иметь более широкое применение, чем просто парирование влияния внешней среды: под возмущениями можно также понимать неопределенность параметров объекта, несоответствие принятой модели динамики объекта его поведению и действие других факторов. Подавление таких возмущений позволяет повысить робастность системы управления по отношению к данным условиям [35].

Наблюдатели возмущений находят все более широкое применение в теории и практике построения систем управления, и им посвящена обширная литература. Так, по состоянию на сентябрь 2019 г. в системе Scopus по ключевым словам “disturbance” и “observer” имеется более 16 тысяч цитирований. В частности, статья [36] в течение 10 лет после опубликования получила 2122 цитирования, статья [37] – 750 цитирований, обзор [35] за три года получил 525 цитирований. Это говорит о высокой востребованности данного направления для современной теории и практики построения автоматических систем.

Заключение. Отметим также большой интерес исследователей к публикациям, имеющим прикладную направленность. Так, статья [38] к моменту написания обзора получила 1454 цитирования в системе Scopus, статья [39] – 886 цитирований, статьи [40] – 606, [41] – 398, [42] – 342 цитирования, что выводит публикации по практическому применению наблюдателей возмущений в число наиболее востребованных среди работ по автоматическому управлению. Несомненно, интерес к данной тематике со стороны теоретиков и практических исследователей в области систем управления будет возрастать и в дальнейшем.

Работы выполнены при поддержке гранта РФФИ 18-38-20037

ЛИТЕРАТУРА

1. **Андриевский Б.Р., Фуртат И.Б.** Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Часть 1. Методы // Автоматика и телемеханика. 2020 (в печати).
2. **Андриевский Б.Р., Фуртат И.Б.** Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Часть 2. Приложения // Автоматика и телемеханика. 2020 (в печати).
3. **Sariyildiz, E., Oboe, R., Ohnishi, K.,** Disturbance Observer-Based Robust Control and Its Applications: 35th Anniversary Overview, IEEE Trans. Ind. Electron, 2020, vol. 67, no. 3, pp. 2042–2053.
4. **Athans, M.,** On the LQG Problem, IEEE Trans. Automat. Control, 1971, Dec., vol. 16, no. 6, pp. 528–528.
5. **Rosenbrock, H., McMorran, P.,** Good, Bad, or Optimal, IEEE Trans. Automat. Control., 1971, Dec., vol. 16, no. 6, pp. 552–554.
6. **Pearson, J., Staats, P.,** Robust Controllers for Linear Regulators, IEEE Trans. Automat. Control, 1974, Jun., vol. 19, No. 3. P. 231–234.
7. **Davison, E.J., Goldenberg, A.,** Robust Control of a General Servomechanism Problem: The Servo Compensator, Automatica, 1975, vol. 11, no. 5, pp. 461–471.
8. **Davison, E.,** The Robust Control of a Servomechanism Problem for Linear TimeInvariant Multivariable Systems, IEEE Trans. Automat. Control, 1976, Feb., vol. 21, no. 1, pp. 25–34.
9. **Schweppe, F.,** Recursive State Estimation: Unknown but Bounded Errors and System Inputs, IEEE Trans. Automat. Control, 1968, vol. 13, no. 1, pp. 22–28.
10. **Bhattacharyya, S.,** The Structure of Robust Observers, IEEE Trans. Automat. Control, 1976, August, vol. 21, no. 4, pp. 581–588.
11. **Doyle, J.C.,** Structured Uncertainty in Control System Design, Proc. Conf. Decision and Control (CDC'85), Fort Lauderdale, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1985, pp. 260–265.
12. **Francis, B.A., Wonham, W.M.,** The Internal Model Principle of Linear Control Theory, IFAC Proc. Volumes, 1975, vol. 8, no. 1, part 1, pp. 331–336. (6th IFAC World Congress (IFAC 1975) – Part 1: Theory, Boston/Cambridge, MA, USA, August 24-30, 1975).
13. **Бесекерский В.А.,** Попов **Е.П.** Теория систем автоматического регулирования. Изд. 4-е, перераб. и дополн. СПб: «Профессия», 2003.
14. **Клейман Е.Г., Мочалов И.А.** Идентификация нестационарных объектов // АиТ. 1994. № 2. С. 3–22.
15. **Клейман Е.Г.** Идентификация входных сигналов в динамических системах // АиТ. 1999. № 12. С. 3–15.
16. **Sunahara, Y.,** Identification of Distributed-Parameter Systems, Distrib. param. control syst. Theory and appl., 1982, pp. 57–86.
17. **Ohnaka, K., Uosaki, K.,** Identification of the External Input of Distributed-Parameter Systems by the Boundary-Element Approach, Int. J. Control, 1986, vol. 43, no. 4, pp. 1125–1133.
18. **Кряжимский А.В., Осипов Ю.С.** О моделировании управления в динамической системе // Изв. АН СССР. Технич. кибернетика. 1983. № 2. С. 29–41.
19. **Ким А.В., Короткий А.М.** Динамическое моделирование возмущения в параболических системах // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1989. № 6. С. 78–84.
20. **Kurek, J.,** Observation of the State Vector of Linear Multivariable Systems with Unknown Inputs, Int. J. Control, 1982, vol. 36, no. 3, pp. 511–515.
21. **Любчик Л.М., Толстопятова С.В.** Оптимальное оценивание входных сигналов дискретных стохастических систем // Вестн. Харьков, ун-та. 1988. № 252. С. 5–7.
22. **Херманис Э.Х.** Сведение задачи восстановления сигнала к задаче идентификации системы // Аналого-дискретное преобразование сигналов. 1981. № 5. С. 103–111.
23. **Борухов В.Г., Колесников П.М.** Идентификация входных воздействий систем с распределенными параметрами // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1983. № 3. С. 168–174.
24. **Корноушенко Е.К.** Восстановление скалярного сигнала на входе дискретной линейной нестационарной системы // АиТ. 1991. № 6. С. 84–94.
25. **Корноушенко Е.К.** Восстановление входных сигналов в дискретных линейных нестационарных системах по накопленным данным // АиТ. 1992. № 12. С. 40–51.
26. **Fhirin, M.,** ARMAX Lattice Algorithm for Identification and Prediction of Dynamic Systems, Int. J. Syst. Sci., 1990, vol. 21, no. 4, pp. 771–781.
27. **Davison, E.J.,** The Output Control of Linear Time-Invariant Multivariable Systems with Unmeasurable Arbitrary Disturbances, IEEE Trans. Automat. Control, 1972, Oct., vol. 17, no. 5, pp. 621–630.

28. **Francis, B.A., Wonham, W.M.,** The Internal Model Principle for Linear Multivariable Regulators, Appl. Math. Opt., 1975, vol. 2, no. 2, pp. 170–194.
29. **Xia, X.,** Global Frequency Estimation Using Adaptive Identifiers, IEEE Trans. Automat. Control, 2002, vol. 47, no. 7, pp. 1188–1193.
30. **Никифоров В.О.** Наблюдатели внешних детерминированных возмущений II. Объекты с неизвестными параметрами // АиТ. 2004. № 11. С. 40–48.
31. **Krasnova, S.A., Utkin, V.A.,** Prelimit Implementation of States and Disturbances Observer on Sliding Modes, Proc. 2015 Int. Workshop on Recent Advances in Sliding Modes, RASM 2015, Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015, 9–11 Apr.
32. **Brown, M., Shtessel, Y.B.,** Disturbance Rejection Techniques for Finite Reaching Time Continuous Sliding Mode Control, Proc. American Control Conference (ACC 2001), Arlington, Virginia, USA, vol. 6, Piscataway, NJ: IEEE Publications, 2001, June, 24, pp. 4998–5003.
33. **Фуртат И.Б.** Робастная синхронизация динамической сети с компенсацией возмущений // АиТ. 2011. № 12. С. 104–114.
34. **Фуртат И.Б.** Робастное управление определенным классом неминимальнофазовых динамических сетей // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2014. № 1. С. 35–48.
35. **Chen, W.-H., Yang, J., Guo, L., Li, S.,** Disturbance-Observer-Based Control and Related Methods – an Overview, IEEE Trans. Ind. Electron, 2016, Feb., vol. 63, no. 2, pp. 1083–1095.
36. **Han, J.,** From PID to Active Disturbance Rejection Control, IEEE Trans. Ind. Electron, 2009, vol. 56, no. 3. pp. 900–906.
37. **Davison, E.J.,** The Robust Control of a Servomechanism Problem for Linear TimeInvariant Multivariable Systems, IEEE Trans. Automat. Control, 1976, Feb., vol. 21, no. 1, pp. 25–34.
38. **Кряжимский А.В., Максимов В.И., Осипов Ю.С.** О позиционном моделировании в динамических системах // Прикл. математика и механика. 1983. Т. 47. № 6. С. 815–825.
39. **Massey, T., Shtessel, Y.,** Continuous Traditional and High-Order Sliding Modes for Satellite Formation Control, J. Guid., Contr. Dynam., 2005, July–Aug., vol. 28, no. 4, pp. 826–831.
40. **Lee, H.S., Tomizuka, M.,** Robust Motion Controller Design for High-Accuracy Positioning Systems, IEEE Trans. Ind. Electron, 1996, vol. 43, no. 1, pp. 48–55.
41. **Sun, J., Wang, C., Xin, R.,** Anti-Disturbance Study of Position Servo System Based on Disturbance Observer, IFAC-PapersOnLine, 2018, vol. 51, no. 4, pp. 202–207.
42. **Максимов В.И.** Реконструкция входного воздействия динамической системы при измерении части координат фазового вектора // Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 2019. Т. 59. № 5. С. 752–761.

I.B. Furtat (IPME RAS, St. Petersburg), B.R. Andrievsky (IPME RAS, St. Petersburg State University, Baltic State Technical University, St. Petersburg)

DISTURBANCE OBSERVERS AND ITS APPLICATIONS

The report is devoted to the history of development and the current state of theoretical methods for constructing disturbance observers, the appearance of which in control theory and practice dates back to the mid-60s of the last century and is associated with the expansion of algebraic methods for the synthesis of controllers, the emergence of computer-oriented synthesis procedures, the complication of the range of problems to be solved, and striving to optimize the controlled process.

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

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНИВАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ НАВИГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается проблема оценивания состояния динамической системы применительно к задачам обработки навигационной информации. Отмечается, что при синтезе алгоритмов и анализе их точности в этой области наибольшее применение в современных и разрабатываемых системах получил стохастический подход. В докладе кратко излагается история развития стохастического подхода, анализируются особенности моделей, используемых для описания сигналов и погрешностей их измерения. Рассматриваются основные методы синтеза алгоритмов оценивания, применяемые при решении задач, связанных с обработкой навигационной информации. Обсуждается связь получаемых алгоритмов с алгоритмами, синтезируемыми в рамках детерминированного подхода.

При синтезе систем управления обычно приходится решать задачи оценивания (восстановления) состояния динамических систем $x(t) \in R^n$ с использованием m-мерных зашумленных измерений, которые можно представить в виде $y(t) = \psi(x(t), \theta) + \varepsilon(t)$, где $\psi(x(t), \theta)$ – известная в общем случае нелинейная вектор-функция своих аргументов, θ – вектор неизвестных параметров, $\varepsilon(t) \in R^m$ – погрешности измерения [1–13]. С необходимостью решения аналогичных задач приходится сталкиваться и при проектировании систем, применяемых в радиотехнике, радиолокации, гидроакустике и т.п. [14–16]. Существует значительное разнообразие в подходах, методах и алгоритмах, применяемых для решения этих задач. Вместе с тем можно выделить два основных подхода. Один из них – детерминированный, для которого не предполагается случайного характера оцениваемых сигналов и погрешностей измерения, см., например, [11–13]. Другой подход – стохастический, для которого такие предположения вводятся [17–29]. В рамках детерминированного подхода для алгоритмов оценивания обычно используется термин наблюдатель (observer), а в стохастическом – фильтр (filter) или устройство оценивания (estimator). Тот подход, который применяется при решении конкретных задач, обусловлен в первую очередь спецификой самой задачи. Вместе с тем значительная роль принадлежит и разработчику, его опыту и способностям в использовании того или иного математического аппарата. Нередко применяемый при решении конкретной задачи математический аппарат определяется именно последним обстоятельством. Таким образом, зачастую одна и та же задача оценивания решается в рамках как стохастического, так и детерминированного подходов.

С задачами, связанными с оценкой состояния динамических систем и/или с восстановлением сигнала с использованием зашумленных измерений, приходится иметь дело и разработчикам навигационных систем. При этом при постановке и решении задач обработки навигационной информации, как правило, применяется стохастический подход и, в частности, байесовская теория фильтрации [30–43]. Более того, можно отметить, что эволюция методов решения задач обработки измерений в рамках байесовского теории фильтрации в значительной степени определялась и определяется потребностями, выдвигаемыми разработчиками различных систем навигации. В свою очередь развитие методов решения задач фильтрации создавало хорошую основу для совершенствования систем навигации. Необходимость в решении задач оценивания, связанных с обработкой навигационной информации, в последнее время лишь возрастает, что обусловлено бурным развитием различного рода робототехнических систем.

Несмотря на сложившееся положение в плане практического применения методов, основанных на стохастическом подходе, сам подход и вытекающие из него алгоритмы зачастую повергаются критике, для которой несомненно есть справедливые основания. Более того, следует заметить, что и автор широко применяемого на практике алгоритма Р. Калман подвергал критике стохастический подход, цитируя при этом фразу, якобы сказанную Л. Понтрягиным: «Математики не верят в вероятность» [23]. Тем не менее следует констатировать, что на сегодняшний день алгоритмы, синтезируемые в рамках стохастического подхода, занимают доминиру-

ющее место в современных навигационных системах [30–43]. Аналогичная ситуация имеет место и в радиотехнических, радиолокационных и гидроакустических системах [14–16]. При этом следует оговориться, что при обсуждении рассматриваемых вопросов в докладе не затрагиваются алгоритмы, связанные с обработкой и распознаванием изображений, где в настоящее время широко применяются нейронные сети, занимающие особое место [44–46].

Цель настоящего доклада – провести обзор моделей и методов, используемых при решении задач оценивания, связанных с обработкой навигационной информации.

Здесь кратко описывается история развития стохастического подхода и рассматриваются различные по сложности математические постановки задач оценивания, решаемые при обработке навигационной информации. На простом примере линейной задачи оценивания вектора постоянных параметров $x \in R^n$ по m-мерным измерениям $y = Hx + \varepsilon$ излагаются общие соображения о взаимосвязи и отличиях алгоритмов оценивания, основанных на использовании детерминированного и стохастического подходов. Анализируются критерии и методы оценки точности, применяемые в каждом из подходов. Обращается внимание на то, что, несмотря на разницу в этих подходах, получаемые в результате алгоритмы зачастую имеют много общего. Обсуждаются особенности нелинейных задач оценивания изменяющихся во времени параметров, а также задач, решаемых в условиях параметрической и структурной неопределенности в описании моделей оцениваемых процессов и погрешностей их измерения. Выделяются два основных направления синтеза алгоритмов при использовании стохастического подхода. Одно из них основано на применении различных вариантов гауссовской аппроксимации апостериорной плотности и порождающих так называемые алгоритмы калмановского типа. Обращается внимание на то, что структура этих алгоритмов схожа со структурой группы алгоритмов, синтезируемых в рамках детерминированного подхода. Другое направление касается задач с существенными нелинейностями. В этом случае используются алгоритмы, основанные на методах аппроксимации апостериорной плотности, в частности получившие широкое применение последовательные методы Монте-Карло.

Для каждой из обсуждаемых математических постановок задач оценивания рассматриваются конкретные прикладные задачи обработки навигационной информации, в том числе такие как: калибровка чувствительных элементов, выставка и коррекция показаний навигационных систем, определение навигационных и динамических параметров, включая задачи ориентации, диагностика и отбраковка измерений.

Несмотря на то что основное внимание уделяется методам и моделям, основанным на стохастическом подходе, в докладе применительно к некоторым задачам анализируется возможность применения алгоритмов, синтезированных в рамках детерминированного подхода. В этой связи обсуждается целесообразность сопоставления получаемых алгоритмов и та методика, по которой это может быть сделано

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ 18-19-00627.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Куржанский А.Б.** Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: Наука, 1977.
2. **Черноусько Ф.Л.** Оценивание фазового состояния динамических систем. М.: Наука, 1988.
3. **Граничин О.Н., Поляк Б.Т.** Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. М.: Наука. 2003. 291 с.
4. **Краснова С.А., Уткин В.А.** Каскадный синтез наблюдателей состояния динамических систем. Москва: Российская акад. наук, Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова, 2006.
5. **Yongchang Zhang, Zhengming Zhao, Ting Lu, Liqiang Yuan, Wei Xu, and Jianguo Zhu**, A comparative study of Luenberger observer, sliding mode observer and extended Kalman filter for sensorless vector control of induction motor drives, 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009, pp. 2466–2473.
6. **Матасов А.И.** Метод гарантирующего оценивания. М.: Изд-во МГУ, 2009. 100 с.
7. **Ширяев В.И., Ильин Е.Д.** О гарантированном оценивании возмущений в линейных динамических системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9. С. 12-16.
8. **Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С.** Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. М.: ЛЕНАНД, 2014.
9. **Aranovskiy, S., Bobtsov, A., Ortega, R., Pyrkin, A.**, Parameters estimation via dynamic regressor extension and mixing, 2016 American Control Conference (ACC), 2016, pp. 6971–6976.

10. **Ortega, R., Praly, L., Aranovskiy, S., Yi, B., Zhang, W.**, On dynamic regressor extension and mixing parameter estimators: Two Luenberger observers interpretations, Automatica, Sep., 2018, vol. 95, pp. 548–551.
11. **Андриевский Б.Р., Фуртат И.Б.** Наблюдатели возмущений: методы и приложения. Часть 1. Методы // Автоматика и телемеханика. 2020 (в печати).
12. **Ефимов Д.В., Раисси Т.** Построение интервальных наблюдателей для динамических систем с неопределенностями // Автоматика и телемеханика. 2016. № 2. С. 5–49.
13. **Хлебников М.В., Б.Т. Поляк** Фильтрация при произвольных ограниченных внешних возмущениях: техника линейных матичных неравенств // Труды 13-й мультиконференции по проблемам управления. Секция наблюдатели и фильтры. 2020 (в печати).
14. **Сейдж Э., Мелс Дж.** Теория оценивания и ее применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976.
15. **Ширман Я.Д., Багдасарян С.Т., Горшков С.А. и др.** Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник. Издание 2-е переработ. и доп. / Под ред. Ширмана Я.Д. М., 2007.
16. **Малышкин Г.С.** Оптимальные и адаптивные методы обработки гидроакустических сигналов. Санкт-Петербург: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2009.
17. **Kalman, R.E.,** A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering, 1960, no 82, pp. 35–45.
18. **Стратонович Р.Л.** Условные процессы Маркова // Теория вероятн. и ее примен. 1960. Т. 5. № 2. С. 172–195.
19. **Фомин В.Н.** Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. М.: Наука, 1984.
20. **Gustafsson, F.,** Adaptive Filtering and Change Detection, John Wiley & Sons Ltd, 2000.
21. **Ristic, B., Arulampalam, S., and Gordon, N**., Beyond the Kalman Filter: Particle Filter for Tracking Applications, Artech House Radar Library, 2004.
22. **Шахтарин, Б.И.** Фильтры Винера и Калмана. М.: Гелиос. АРВ, 2008. 408 с.
23. **Степанов О.А.** Фильтр Калмана. История и современность (к 80-летию Рудольфа Эмиля Калмана) // Гироскопия и навигация. 2010, №2 (69). С. 107–121.
24. **Sarkka, S.**, Bayesian Filtering and Smoothing, Cambridge University Press, 2013.
25. **Степанов О.А., Лопарев А.В., Челпанов И.Б**. Частотно-временной подход к решению задач обработки навигационной информации // Автоматика и телемеханика. 2014. Вып. 6. С. 132–153.
26. **Box, G.E.P., Jenkins, G.M., Reinsel, G.C., and Ljung, G.M.**, Time Series Analysis: Forecasting and Control, 5th ed. New Jersey, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2015.
27. **Руденко Е.А.** Оптимальные дискретные нелинейные фильтры порядка объекта и их гауссовские приближения // Автоматика и телемеханика. 2010. № 2. С. 159–178.
28. **Рыбаков К.А.** Статистические методы анализа и фильтрации в непрерывных стохастических системах. Москва, 2017.
29. **Basin, M.,** New Trends in Optimal Filtering and Control for Polynomial and Time-Delay Systems, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
30. **Челпанов, И.Б.** Оптимальная обработка сигналов в навигационных системах. М.: Наука, 1967.
31. **Дмитриев С.П.** Высокоточная морская навигация. Судостроение. Санкт-Петербург, 1991.
32. **Grewal, M.S. and Andrews, A.P.,** Kalman Filtering: Theory and Practice, Prentice Hall, New Jersey, 1993.
33. **Bar-Shalom, Ya., Li, X.-R., Kirubarajan, T.,** Estimation with Applications to Tracking and Navigation, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
34. **Дмитриев С.П., Колесов Н.В., Осипов А.В.** Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем. Изд. 2-е, перераб. СПб., 2004.
35. **Веремеенко К.К., Желтов С.Ю., Ким Н.В., Себряков Г.Г., Красильщиков М.Н.** Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов. Москва, 2009.
36. **Голован А.А., Парусников Н.А.** Математические основы навигационных систем в 3 ч. / 3-е изд., испр. и доп. Москва: Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова., 2011.
37. **Brown, R.G., Hwang, P.Y.C.,** Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering, Wiley, 2012, 4st edn.
38. **Grewal, M.S., Andrews, A.P., Bartone, Ch.G.,** Global navigation satellite systems, inertial navigation, and integration, Third edition, 2013, John Wiley & Sons, Inc.
39. **Groves, P.D.,** Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems, 2nd edition, Artech Hous, Boston, London, 2013, 763 p.
40. **Markley, F.L., Crassidis, J.L.,** Fundamentals of Spacecraft Attitude Determination and Control, 2014, Springer, New York.
41. **Шахтарин Б.И., Шэнь К., Неусыпин К.А.** Модификация нелинейного фильтра Калмана в схеме коррекции навигационных систем летательных аппаратов // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61. № 11. С. 1065–1072.
42. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 2. Введение в теорию фильтрации. Санкт-Петербург: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017.
43. **Чернодаров А.В.** Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов. М.: Научтехлитиздат, 2017.
44. **Хайкин С.** Нейронные сети. М.: Издат. дом «Вильямс», 2006.
45. **Karpathy, A., Toderici, G., Shetty, S., Leung, T., Sukthankar, R., and Fei-Fei, L.,** Large-Scale Video Classification with Convolutional Neural Networks, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2014, pp. 1725–1732.
46. **Khan, S., Rahmani, H., Shah, S.A.A., and Bennamoun, M.,** A Guide to Convolutional Neural Networks for Computer Vision, Synthesis Lectures on Computer Vision, Feb., 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1–207.

O.A. Stepanov, A.V. Motorin (Concern CSRI Elektropribor, JSC, ITMO University, St. Petersburg)

MODELS AND METHODS USED IN SOLVING THE ESTIMATION PROBLEMS AS APPLIED TO NAVIGATION DATA PROCESSING

The problem of estimating the state of a dynamic system is considered as applied to the problems of navigation data processing. It is noted that in the synthesis of algorithms and the analysis of their accuracy, the stochastic approach is most widely used in modern and systems and those under development. The paper briefly outlines the history of the stochastic approach development, analyzes the features of the models used to describe signals and their measurement errors. The basic methods of the estimation algorithm synthesis are considered, which are used in solving problems related to the navigation data processing. The relationship between the obtained algorithms and the algorithms synthesized within the framework of the deterministic approach is discussed.

DENIS EFIMOV
(Inria, Univ. Lille, France;
ITMO University, 197101 Saint Petersburg, Russia)

STATE ESTIMATION WITH ACCELERATED CONVERGENCE ГATES

The problem of state estimation for a linear system presented in a canonical form (chain of integrators) is discussed in order to present different algorithms proposed recently, which guarantee the problem solution with non-asymptotic (accelerated) convergence rates, such as: finite-time, fixed-time and prescribed-time convergences.

Background. Estimation of states, parameters or inputs is one of the key problems that engineers of control systems face in various applications. Many methods have been proposed to address these problems, that can be classified based on the type of the model under consideration, on the performance (e.g., robustness, convergence rates, optimality) they provide, and on the kind of application scenario they solve. Focusing on the performance, the most important characteristics are the rate of convergence of estimation error to the true value (or to its vicinity in the presence of uncertainty), and the robustness to an unstructured incertitude in the system (perturbations, measurement noises, and unmodelled dynamics). The most of classical approaches for filtering or state/parameter estimation (Kalman filters, Luenberger observers, Least squares approach) are oriented on asymptotic recovering the estimated values (i.e., when the time approaches infinity), while in many cases we need reliable guesses for the evaluated quantities after a finite interval of time. The examples of respective scenarios include:

- the systems behave in a given mode for a limited amount of time: e.g., space ships rendezvousing (the system in its current form may do not exist after the gathering), electric circuit reconfiguration after a short circuit, robotic arm pick and place operations, chemical reactions with a risk of explosion, etc.;
- the used approximate model is valid on a fixed window of time: in the cases of switched or hybrid systems, if the estimation can be realized before commutation or state jump, then the analysis can be simplified greatly (e.g., for a walking robot, its position has to be estimated before the impacts related with actuator contacts to a surface);
- the observability/identifiability conditions are valid on a short interval of time (e.g., the input excitation conditions cannot be maintained for an arbitrary long time);
- the initial conditions for the error may be uncertain, then to ensure proper supervision, decision making, or operation of other loops, a uniform con- vergence of the estimation error is desired with respect to initial deviations.

Finite-time convergence is rather natural for systems described by ordinary differential equations (e.g., Torricelli's law in fluid dynamics, drag and dry friction in mechanical systems) or discrete-time systems (e.g., deadbeat controllers and observers), but it becomes a tricky phenomenon for time-delay or distributed-parameter systems.

Therefore, to guarantee an accelerated convergence rate, different concepts can be used. In particular, if $e(t,\ t_0,\ e_0)$ is the value of an estimation error e at $t \geq t_0$ with the initial guess $e_0 \in \mathcal{E}$ from some set $\mathcal{E}$ of admissible values for the error (for example, $\mathcal{E} \subseteq \mathbb{R}^n$) at the initial time instant $t_0 \geq 0$ (i.e., $e(t_0,\ t_0,\ e_0) = e_0$), then this error is

1. asymptotically converging (AC) to zero if
$$\lim_{t \to +\infty} e(t, t_0, e_0) = 0 \quad \forall t_0 \geq 0, \forall e_0 \in \mathcal{E};$$
2. finite-time converging (FTC) to zero if
$$e(t,\ t_0,\ e_0) = 0,\ \forall t \geq t_0 + T\,(t_0,\ e_0) \qquad \forall t_0 \geq 0,\ \forall e_0 \in \mathcal{E},$$
$$T\,(t_0,\ e_0) = \inf\,\{T \geq 0 : e(t,\ t_0,\ e_0) = 0,\ \forall t \geq t_0 + T\,\},$$
where $T\,(t_0,\ e_0)$ is called the settling-time function;
3. fixed-time converging (FxTC) to zero if it is FTC with
$$T\,(t_0,\ e_0) \leq T_{\max} < +\infty \qquad \forall t_0 \geq 0,\ \forall e_0 \in \mathcal{E};$$
4. prescribed-time converging (PTC) to zero if it is FxTC with

$$T(t_0, e_0) = T_{\max} < +\infty \quad \forall t_0 \geq 0, \forall e_0 \in \mathcal{E} \setminus \{0\}.$$

From these definitions we can conclude that all these properties are hierarchically included one in another:

$$\text{PTC} \subset \text{FxTC} \subset \text{FTC} \subset \text{AC}.$$

In this sense, PTC ensures the most strict performance to the system: the error e approaches the origin in the same given (prescribed) time $T_{\max}$ independently of initial conditions $t_0 \geq 0$ and $e_0 \in \mathcal{E}$. FxTC is a little bit more relaxed: the convergence rate is uniform in the initial deviations e_0 and t_0, but it is not the same and the settling-time function $T(t_0, e_0)$ is just upper bounded by $T_{\max}$ (then closer to the origin the convergence can be faster than in $T_{\max}$ units of time, and this upper bound is touched on the borders of $\mathcal{E}$ only). For FTC, the settling-time function $T(t_0, e_0)$ is not necessarily bounded, and it may grow to infinity somewhere in $\mathcal{E}$ or on its borders (there is no uniformity in initial conditions e_0 and times t_0).

It can be also shown that the systems demonstrating different convergence rates also possess distinct robustness properties with respect to disturbances, measurement noises and delays. For example, finite-time converging differentiators (state observers for a chain of integrators), which are designed using the concept of homogeneity with negative degree, ensure boundedness of the estimation error for any bounded delay in the measurement channel (such a property is frequently difficult to obtain for a linear observer).

Content. This note presents a brief overview of different solutions available for the state estimation in a chain of integrators, which provide the above mentioned non-asymptotic convergence rates: FTC [4, 5], FxTC [1, 3] and PTC [2, 6].

REFERENCES

1. **Andrieu, V., Praly, L., and Astolfi, A.,** Homogeneous approximation, recursive observer design, and output feedback, SIAM J. Control Optim., 2008, 47(4):1814–1850.
2. **Holloway, J. and Krstic, M.,** Prescribed-time observers for linear systems in observer canonical form, IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(9):3905–3912.
3. **Lopez-Ramirez, F., Polyakov, A., Efimov, D., and Perruquetti, W.,** Finite-time and fixed-time observer design: Implicit Lyapunov function approach, Automatica, 2018, 87(1):52–60.
4. **Perruquetti, W., Floquet, T., and Moulay, E.,** Finite-time observers: application to secure communication, IEEE Transaction on Automatic Control, 2008, 53(1):356–360.
5. **Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., and Levant, A.,** Sliding Mode Control and Observation. Birkhauser, 2014.
6. **Steeves, D., Krstic, M., and Vazquez, R.,** Prescribed-time estimation and output regulation of the linearized schrödinger equation by backstepping, European Journal of Control, 2020.

М. В. ХЛЕБНИКОВ, Б. Т. ПОЛЯК
(ФГБУН Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

ФИЛЬТРАЦИЯ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ОГРАНИЧЕННЫХ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЯХ: ТЕХНИКА ЛИНЕЙНЫХ МАТРИЧНЫХ НЕРАВЕНСТВ

Рассматривается простой и универсальный подход к решению задачи линейной стационарной фильтрации произвольных ограниченных внешних возмущений с использованием наблюдателя. Подход основан на методе инвариантных эллипсоидов и технике линейных матричных неравенств; применение этой концепции позволяет свести исходную проблему к легко решаемым задачам полуопределенного программирования и одномерной минимизации.

Введение. Задача линейной фильтрации (т.е. оценки состояния динамической системы по измерениям, модели для которых описываются с помощью линейных уравнений) при случайных возмущениях допускает практически исчерпывающее решение с помощью фильтра Калмана [1] (см. также [2] и ссылки в ней). Однако во многих ситуациях предположение о случайности шумов является неоправданным: часто известно лишь, что все возмущения являются ограниченными, а в остальном произвольными. В этом случае можно строить гарантированные (а не вероятностные) оценки состояний. Такой подход был предложен в конце 60-х – начале 70-х годов прошлого века в работах американских ученых Виценхаузена, Бертсекаса и Родеса, Швеппе [3]. Примерно в это же время подобные проблемы разрабатывались на семинаре Н.Н. Красовского такими исследователями, как А.Б. Куржанский, А.И. Субботин, Ю.С. Осипов и другие, см. [4]. Существенный вклад в этот круг исследований внес Ф.И. Черноусько [5]. В частности, в работах [3, 4, 5] была развита эллипсоидальная техника фильтрации. Обзор результатов в этой области можно найти в [6, 7, 8, 9, 10]. Среди последних публикаций по этой проблематике отметим работы [11, 12, 13], а также обзор [14].

Наш доклад также посвящен проблеме линейной фильтрации с ограниченными неслучайными возмущениями. В нем рассматриваются лишь стационарные задачи, когда все параметры модели не зависят от времени. При этом ищется оценка состояния такая, что ее ошибка гарантированно заключена в единый эллипсоид (инвариантный эллипсоид) для всех моментов времени, т.е. оценка является равномерной. Сам фильтр также ищется в классе линейных стационарных фильтров. В этом суженном классе задач и оценок проблема оказывается полностью разрешимой, т.е. удается построить оптимальный фильтр и оценку состояния. Этим данная постановка задачи отличается от упомянутых выше: там рассматривались более общие модели, однако получаемое решение было лишь субоптимальным, а равномерность оценок не имела места.

С технической точки зрения мы применяем аппарат линейных матричных неравенств [15, 16], который хорошо зарекомендовал себя при анализе и синтезе систем управления, но практически не применяется в задачах фильтрации. Исключением может служить работа [17], однако по сравнению с ней получены более простые и точные оценки качества фильтрации, а также исследовано поведение этих оценок при больших начальных уклонениях. Важным новым техническим инструментом является S-теорема для двух ограничений [18], тогда как раньше применялась эта же теорема для одного ограничения.

Постановка задачи. Рассмотрим линейную стационарную непрерывную динамическую систему

$$\begin{cases} \dot{x} &= Ax + D_1 w, \\ y &= Cx + D_2 w, \end{cases} \tag{1}$$

где $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $D_1 \in \mathbb{R}^{n\times m}$, $D_2 \in \mathbb{R}^{l\times m}$, $C \in \mathbb{R}^{l\times n}$, с состоянием $x \in \mathbb{R}^n$, наблюдаемым выходом $y \in \mathbb{R}^l$ и внешним возмущением (шумом) $w \in \mathbb{R}^m$, ограниченным в каждый момент времени:

$$\|w(t)\|_2 \le 1 \text{ для всех } t \ge 0.$$

Таким образом, рассматриваем L_∞-ограниченные внешние возмущения. Отметим, что никаких других ограничений на возмущение $w(t)$ не накладывается: так, оно не предполагается ни случайным, ни гармоническим. Будем полагать, что пара (A, D_1) управляема, а $D_1 D_2^T = 0$.

Пусть состояние x системы недоступно измерению и информация о системе предоставляется ее выходом y. Построим наблюдатель (фильтр), описываемый линейным дифференциальным уравнением относительно оценки состояния $\hat{x}$, включающим в себя рассогласование выхода y и его прогноза $C\hat{x}$:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + F(y - C\hat{x}), \quad F \in \mathbb{R}^{n\times l}. \tag{2}$$

Подчеркнем, что структура фильтра задается заранее – он является линейным стационарным, подлежит выбору лишь постоянная матрица F. Эта структура такая же, как в известном наблюдателе Люенбергера. Введем в рассмотрение невязку

$$e(t) = x(t) - \hat{x}(t),$$

характеризующую точность фильтрации; согласно (1), (2), она будет удовлетворять дифференциальному уравнению

$$\dot{e} = (A - FC)e + (D_1 - FD_2)w. \tag{3}$$

Нашей задачей является нахождение минимального (в том или ином смысле) единого эллипсоида, содержащего невязку e. Идеология инвариантных эллипсоидов для задач анализа и синтеза систем управления применялась в [15, 17, 19], а ее систематическое изложение можно найти в монографии [20]; здесь она используется для задач фильтрации.

Мы несколько изменяем стандартное определение, чтобы включить случай больших начальных уклонений. Эллипсоид с центром в начале координат

$$\mathcal{E} = \{e \in \mathbb{R}^n: \ e^T P^{-1} e \le 1\}, \quad P > 0,$$

называется *инвариантным* для динамической системы (3), если:

1) из условия $e(0) \in \mathcal{E}$ (малые уклонения) следует $e(t) \in \mathcal{E}$ для всех моментов времени $t \ge 0$;
2) при $e(0) \notin \mathcal{E}$ (большие уклонения) будет $e(t) \to \mathcal{E}, t \to \infty$ (при этом, возможно, $e(t) \in \mathcal{E}$ при $t \ge T$ для некоторого $T > 0$). Таким образом, оцениваем асимптотическую (а при малых уклонениях и равномерную по t) точность фильтрации.

Прежде всего отметим, что из условия управляемости следует существование хотя бы одного инвариантного эллипсоида. Инвариантных эллипсоидов много, наша цель (при фиксированном стабилизирующем F) найти минимальный из них, а затем добиться минимума этого эллипсоида по F. Минимальность можно понимать в разных смыслах, нам удобно считать тот эллипсоид минимальным, у которого сумма квадратов полуосей наименьшая, т.е. такой, для которого след матрицы P минимален. Другие критерии будут упомянуты ниже.

Основной результат. Основной результат представлен следующей теоремой.

Теорема 1. *Решение $\hat{Q}$ и $\hat{Y}$ задачи минимизации*

$$\operatorname{tr} H \to \min$$

при ограничениях

$$\begin{pmatrix} A^TQ + QA - YC - C^TY^T + \alpha Q & QD_1 - YD_2 \\ (QD_1 - YD_2)^T & -\alpha I \end{pmatrix} < 0, \qquad \begin{pmatrix} H & I \\ I & Q \end{pmatrix} > 0,$$

где минимизация проводится по матричным переменным $Q = Q^T \in \mathbb{R}^{n\times n}$, $Y \in \mathbb{R}^{n\times l}$ и $H = H^T \in \mathbb{R}^{n\times n}$ и числовому параметру $\alpha > 0$, определяет матрицу

$$\hat{P} = \hat{Q}^{-1}$$

минимального инвариантного эллипсоида, а также соответствующую этому эллипсоиду матрицу фильтра

$$\hat{F} = \hat{Q}^{-1}\hat{Y}.$$

Отметим, что при фиксированном α данная задача сводится к минимизации линейной функции при ограничениях, представляющих собой линейные матричные неравенства, т.е. к задаче полуопределенного программирования, которая принадлежит к классу задач выпуклой оптимизации. Для ее численного решения существует множество пакетов, в частности SeDuMi, YALMIP, а также LMI Toolbox системы Matlab [21]. Одномерная минимизация по α всегда оказывалась выпуклой, однако строгое обоснование этого факта пока остается открытой задачей.

Возможные обобщения. В некоторых случаях обладаем априорной информацией о начальном состоянии системы $x(0) \in \mathcal{E}_0$, где $\mathcal{E}_0 = \{x: \ x^T P_0^{-1} x \le 1\}$. Тогда, выбирая $\hat{x}(0) = 0$, можно гарантировать, что $e(0) \in \mathcal{E}_0$. Если потребовать, чтобы $\mathcal{E}_0 \subset \mathcal{E}$, то можно гарантировать, что $e(t) \in \mathcal{E}$ для всех t. Итак, если к системе линейных матричных неравенств в теореме 1 добавить еще одно:

$$Q \le P_0^{-1},$$

то получим не только асимптотическую, но и справедливую для всех моментов времени оценку точности фильтрации.

Нередко нужно оценивать качество фильтрации не всех координат состояния x, а лишь некоторых. Пусть имеется выход

$$y_1 = C_1 x$$

(например, одна из координат состояния) и желательно сделать ошибку его оценки

$$e_1 = y_1 - \hat{y}_1 = C_1(x - \hat{x})$$

возможно малой. Тогда задача сводится к минимизации $\mathrm{tr} C_1 P \hat{C}_1$ вместо $\mathrm{tr} P$, что легко может быть записано в форме, аналогичной теореме 1.

Отметим также, что можно воспользоваться и иными критериями оптимальности вместо суммы квадратов полуосей эллипсоида. Например, можно минимизировать L_∞-норму невязки (как это сделано в [16]), т.е. радиус шара, содержащего эллипсоид $\mathcal{E}$. Для этого потребуем $r \to \max$ при дополнительном ограничении $Q \ge rI$.

Предложенный подход полностью переносится и на дискретную постановку задачи. Наконец, можно рассмотреть робастные варианты задачи, когда описание системы содержит неопределенности (т.е. матрицы A, D включают ограниченные неопределенности). Проблема заключается в построении фильтра и гарантированных оценок его точности, справедливых при любых допустимых неопределенностях. Эта задача разрешима с использованием той же техники, что и выше.

Заключение. В докладе обсуждается простой и универсальный подход к решению задачи фильтрации произвольных ограниченных внешних возмущений с использованием наблюдателя. Этот подход основан на методе инвариантных эллипсоидов; применение этой концепции позволяет переформулировать исходную проблему в терминах линейных матричных неравенств и свести ее к задачам полуопределенного программирования и одномерной минимизации, легко решающимся численно.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 18-08-00140.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kalman, R.E.,** A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, *Journal of Basic Engineering*, 1960, vol. 82, no. 1, pp. 35–45.
2. **Степанов О.А.** Фильтр Калмана. История и современность (к 80-летию Рудольфа Эмиля Калмана) // Гироскопия и навигация. 2010. № 2 (69). С. 107–121.
3. **Schweppe, F.C.,** Uncertain Dynamic Systems, NJ: Prentice Hall, 1973.
4. **Куржанский А.Б.** Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: Наука, 1977.
5. **Черноусько Ф.Л.** Оценивание фазового состояния динамических систем. М.: Наука, 1988.
6. **Kurzhanski, A.B., Valyi, I.**, Ellipsoidal Calculus for Estimation and Control, Boston: Birkhauser, 1997.
7. **Кунцевич В.М.** Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. Киев: Наукова думка, 2006.
8. **Фурасов В.Д.** Задачи гарантированной идентификации. М.: Бином, 2005.
9. **Овсеевич А.И., Тарабанько Ю.В.** Явные формулы для эллипсоидов, аппроксимирующих области достижимости // Известия РАН. Теория и системы управления. 2007. Вып. 2. С. 33–44.
10. **Chernousko, F., Polyak, B.** (eds.), Special Issue on the Set-Membership Modelling of Uncertainty in Dynamical Systems, *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*, 2005, vol. 11, no. 2.
11. **Степанов О.А., Моторин А.В.** Модели и методы в задачах оценивания при обработке навигационной информации // Труды 13-й мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2020). Секция «Наблюдатели и фильтры». Санкт-Петербург, 6-8 октября 2020 г. (в печати).
12. **Фуртат И.Б., Гущин П.А.** Наблюдатели возмущений и помех измерения для динамических систем с секторной нелинейностью // Труды 13-й мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2020). Секция «Наблюдатели и фильтры». Санкт-Петербург, 6-8 октября 2020 г. (в печати).
13. **Ширяев В.И., Подивилова Е.О., Хаданович Д.В.** Алгоритмы гарантированного оценивания в условиях неполноты информации // Труды 13-й мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2020). Секция «Наблюдатели и фильтры». Санкт-Петербург, 6-8 октября 2020 г. (в печати).
14. **Андриевский Б.Р., Фуртат И.Б.** Наблюдатели возмущений: Методы и приложения. Часть I. Методы // Автоматика и телемеханика. 2020. (в печати).
15. **Boyd, S., El Ghaoui, L., Ferron, E., Balakrishnan, V.,** Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory, Philadelphia: SIAM, 1994.

16. **Баландин Д.В., Коган М.М.** Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств. М.: Физматлит, 2007.
17. **Abedor, J., Nagpal, K., Poolla, K.**, A Linear Matrix Inequality Approach to Peak-to-Peak Gain Minimization, *International Journal on Robust and Nonlinear Control*, 1996, vol. 6, pp. 899–927.
18. **Polyak, B.T.,** Convexity of Quadratic Transformations and Its Use in Control and Optimization, *Journal of Optimization Theory and Applications,* 1998, vol. 99, pp. 553–583.
19. **Blanchini, F.**, Set-Invariance in Control, *Automatica*, 1999, vol. 35, pp. 1747–1767.
20. **Поляк Б.Т., Хлебников М.В., Щербаков П.С.** Управление линейными системами при внешних возмущениях: Техника линейных матричных неравенств. М.: ЛЕНАНД, 2014.
21. **Чурилов А.Н., Гессен А.В.** Исследование линейных матричных неравенств. Путеводитель по программным пакетам. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004.

M.V. Khlebnikov, B.T. Polyak (Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow)

FILTRATION UNDER UNKNOWN-BUT-BOUNDED EXOGENOUS DISTURBANCES: AN LMI APPROACH

We consider a simple but universal approach to the linear stationary filtering problem under unknown-but-bounded exogenous disturbances using the observer. The proposed approach is based on the invariant ellipsoids concept and the linear matrix inequalities technique. Such approach makes possible to reduce the original problem to the semi-definite programming and one-dimensional minimization, which can be easily solved numerically.

Е. А. РУДЕНКО
(Московский авиационный институт, Москва)

СОПОСТАВЛЕНИЕ АЛГОРИТМОВ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Обсуждается принципиальное отличие калмановского и винеровского подходов к решению задачи непрерывной линейной фильтрации. Проводится сравнение дискретного нелинейного абсолютно оптимального фильтра, который является бесконечномерным, с тремя более простыми конечномерными: условно оптимальным, условно минимаксным и оптимальной структуры – и трех последних между собой. Сопоставляются и субоптимальные алгоритмы дискретного нелинейного оценивания: фильтр нормальной аппроксимации, а также кубатурный и ансцентный фильтры Калмана.

Введение. Классическая теория оптимальной фильтрации, успешно применяемая как в радиотехнике [1, 2], так и в навигации [3, 4], за 80 лет (1939–2019) прошла большой путь развития от линейных фильтров Колмогорова, Винера и Калмана [5–11] до нелинейного фильтра Стратоновича [12]. При этом для практической реализации последнего, являющегося бесконечномерным, потребовались различные его конечномерные приближения, начиная с обобщенного (extended) фильтра Калмана и заканчивая фильтром частиц [13–22]. Поэтому с 1980 г. стали появляться и более просто реализуемые конечномерные нелинейные фильтры [23–32], см. также обзор [33].

Данный доклад посвящен сравнительному анализу ряда алгоритмов оптимальной фильтрации, как непрерывной линейной, так и дискретной нелинейной, а среди последних – и субоптимальных ковариационных, учитывающих только два первых момента случайных величин.

Непрерывные линейные фильтры Винера и Калмана–Бьюси. Как известно, *фильтр Винера* (ФВ) [7, 8] и *фильтр Калмана–Бьюси* (ФКБ) [10, 11] имеют один и тот же среднеквадратический критерий оптимальности. Отличаются же они тем, что ФВ задается неудобной интегральной связью вход–выход, а его весовая (импульсная переходная) функция находится из сложного интегрального уравнения Винера–Хопфа, тогда как ФКБ определяется простым линейным дифференциальным уравнением, а получение его коэффициента усиления сводится к решению нелинейного дифференциального уравнения Риккати.

При этом изначально в 40-х годах 20-го века ФВ был создан для обработки только стационарных случайных процессов, что было вызвано потребностями того времени, тогда как ФКБ в 60-х годах – уже и нестационарных. Однако ограничение стационарности ФВ легко снимается. Так, нестационарная версия уравнения Винера–Хопфа доказывается авторами ФКБ [10] и из него получены соотношения самого ФКБ. Поэтому сравнивать данные фильтры только по этому показателю некорректно.

Более принципиальное отличие этих фильтров состоит в разном объеме исходной информации об оцениваемом полезном сигнале и о помехе его приема. ФВ использует лишь их ковариационные функции, а потому оптимален для широкого класса процессов с конечными вторыми моментами. В отличие от этого ФКБ использует уравнение состояния возмущаемого белым шумом формирующего фильтра сигнала и, возможно, помехи, если она не белая. Тем самым он оказывается оптимальным для более узкого класса марковских случайных процессов. Таким образом, ФКБ является частным «марковским» случаем нестационарной версии ФВ.

Источник ошибочности противоположного утверждения хорошо виден из примеров совпадения стационарных версий ФВ и ФКБ, в которых используют лишь дробно-рациональные спектральные плотности полезного сигнала и помехи. Последние являются марковскими, так как им соответствуют обыкновенные дифференциальные уравнения их формирующих фильтров, легко преобразуемые в уравнения состояния. Однако в известной формуле Винера для частотной характеристики его фильтра [4, 7, 8] такое допущение совсем необязательно. Действительно, применяемые в ней операции факторизации и сепарации могут быть выполнены и в более общем случае. Например, для содержащей комплексную экспоненту взаимной спектральной плотности сигнала и помехи измерения [8, с. 161], которая соответствует дифференциальному уравнению с отклоняющимся аргументом.

Алгоритмы дискретной нелинейной фильтрации марковских последовательностей. Пусть $k = 0,1,\ldots$ – дискретное время, X_k – n-мерный оцениваемый вектор, Y_k – m-мерный вектор измерений, $Y_0^k = (Y_0, Y_1, \ldots, Y_k)$ – последовательность накопленных наблюдений.

1. Абсолютно оптимальный фильтр (АОФ). Этот наиболее точный нелинейный фильтр, что и подчеркивает слово «абсолютно», предложен Стратоновичем в [12] сначала как дискретный, который там же преобразован в более интересный тогда, в 1960-е годы, непрерывный. Однако его ахиллесовой пятой является требование получения оценки Z_k вектора X_k как функции растущего со временем k числа всех имеющихся измерений:

$$Z_k = \varphi_k(Y_0^k).$$

Именно оно приводит к необходимости находить апостериорную плотность вероятности $p_k(x_k \mid y_0^k)$ по рекуррентной формуле Байеса–Стратоновича, которая содержит n-мерные параметрические интегралы. Из-за этого потраекторное получение на ее основе оценки фильтром частиц, использующим последовательный метод Монте-Карло с генерированием довольно большого числа случайных величин, в реальном времени проблематично при сколь-нибудь значительном n [18, 21, 22]. Замена же плотности вероятности ее числовыми характеристиками вроде моментов или семиинвариантов (метод достаточных координат) приводит к бесконечной системе обыкновенных разностных уравнений для них, которая нереализуема на практике. Зато ее урезание до конечного их числа позволило создать серию субоптимальных (приближенных) фильтров, обычно лишь ковариационных, от линеаризованного обобщенного фильтра Калмана до статистически линеаризованного фильтра нормальной аппроксимации [26, 33]. При этом, естественно, ухудшается точность оценки, в частности теряется ее несмещенность.

2. Условно оптимальный фильтр (УОФ). Является заведомо менее точной, но зато весьма просто реализуемой конечномерной альтернативой АОФу [23, 26], так как определяется разностным уравнением для n-мерного вектора оценки

$$Z_k = \Delta_k \zeta_k(Y_k, Z_{k-1}) + \gamma_k.$$

Здесь $\zeta_k(\cdot)$ – заданная структурная вектор-функция произвольного порядка, а два параметра Δ_k, γ_k находятся из условия среднеквадратической оптимальности. В результате они выражаются через два первых момента известных случайных величин, а потому их легко найти практически точно методом Монте-Карло заранее, до начала процесса оценивания. Преимущество УОФ состоит в простоте его точной реализации и несмещенности получаемой оценки, недостатки – в неопределенности структурной функции $\zeta_k(\cdot)$, а также в линейной зависимости оценки от параметров и в неизменности его порядка n.

3. Условно минимаксный фильтр (УМНФ). Является двухшаговым развитием УОФ по схеме *прогноз*–коррекция, а потому имеет четыре параметра [27, 28]. Две его структурные функции уже удачно связаны с известными нелинейностями системы наблюдения, а специальная дополнительная максимизации обычного среднеквадратического критерия позволила обосновать и его линейную параметричность. Несмотря на название, этот фильтр не является адаптивным, а его порядок остался равным n.

4. Фильтры оптимальной структуры (ФОС). Они тоже конечномерные, но, во-первых, не являются параметрическими, поэтому по точности заведомо занимают промежуточное положение между АОФ и УОФ. Во-вторых, порядки ФОС в отличие от УОФ и ковариационных приближений к АОФ можно менять, добиваясь увеличения либо точности оценивания, либо скорости обработки измерений. В этом отношении различают:

- ФОС малого порядка [29, 30] с уравнением $Z_k = f_k(Y_k, Z_{k-1})$;
- ФОС произвольного порядка $p \geq 1$ [31] с уравнениями состояния и выхода

$$U_k = f_k(Y_k, U_{k-1}), \quad U_k \in \mathbb{R}^p, \quad Z_k = g_k(Y_k, U_{k-1});$$

- ФОС с конечной памятью [32], чей порядок l-кратен размерности m вектора измерений:

$$Z_k = g_k(Y_{\max(0,k-l)}^k);$$

- ФОС большого порядка, l-кратного теперь размерности n вектора оценки [33]:

$$Z_k = g_k(Y_k, Z_{\max(0,k-l)}^{k-1}).$$

В-третьих, хоть структурные функции $f_k(\cdot)$, $g_k(\cdot)$ и получают заранее, подобно параметрам УОФ, но сделать это гораздо сложнее. Теперь требуется строить методом Монте-Карло их многомерные гистограммы, которые затем нужно еще и обработать для нахождения подходящих аналитических выражений этих функций. Поэтому и для ФОС оказалось целесообразным применение известных аналитических приближений – линеаризованного или гауссовского. Они приводят к таким же функциям прогноза и коррекции, как в АОФ, а также к появлению входящих в них нелинейно детерминированных параметров. Последние заменяют случайную матрицу апостериорных ковариаций, поэтому решать громоздкое уравнение типа Риккати теперь не нужно. Вместо него выполняется столь же простое численное нахождение этих параметров, как в УОФ. При этом приближения к ФОС, особенно линеаризованные, иногда оказываются даже более точными, чем подобные приближения к АОФ, при существенно большем порядке последних [31, 32]. Наконец, потерю приближенными ФОС потенциальной точности, особенно несмещенности, можно компенсировать, если ввести в их уравнения по аналогии с УОФ дополнительные параметры, которые затем оптимизировать [30].

Ковариационные приближения к дискретным нелинейным фильтрам. В последнее время популярным стал *Unscented Kalman Filter* (UKF) [19]. Странный, особенно для русскоязычных специалистов, англоязычный термин unscented с помощью электронных словарей переводится как «не имеющий запаха». Однако бумажный словарь [34] дает более адекватный в данной ситуации перевод «бесчувственный». Поэтому именуемую в российской литературе «ансцентной» или «сигма-точечной» эту очередную версию многоликого фильтра Калмана по-русски правильнее называть «нечувствительной».

Действительно, в отличие от обобщенного фильтра Калмана, весьма чувствительного к точкам тейлоровской линеаризации нелинейностей системы наблюдения, UKF фактически использует хорошо известный метод Гаусса численного интегрирования произведения нелинейной функции на функцию гауссовской (нормальной) плотности вероятности [35], явно примененный в кубатурном фильтре Калмана [20]. Тем самым два последних фильтра являются удобными с практической точки зрения приближениями к фильтру нормальной аппроксимации, так как позволяют находить коэффициенты статистической линеаризации нелинейностей численно. Это освобождает проектировщика от выполнения весьма сложных аналитических вычислений, продемонстрированных, например, в [36]. В отличие от них UKF обладает еще и дополнительной возможностью эвристически настраивать три дополнительно введенных в него параметра на реальную негауссовость апостериорной плотности вероятности. Однако иногда UKF по точности проигрывает УМНФ [37], хотя порядок последнего существенно меньше.

Заключение. Обосновано утверждение, что фильтр Калмана–Бьюси является частным случаем фильтра Винера, а не наоборот. Подчеркнута сложность фильтра Стратоновича, описаны преимущества и особенности других оптимальных нелинейных фильтров, отличающихся простотой своей реализации благодаря конечному числу их уравнений. Рассмотрены два параметрических и четыре непараметрических конечномерных фильтра. Для последних отмечена целесообразность применения субоптимальных приближений. Указаны и связи между приближенными ковариационными фильтрами, чьи функции прогноза и коррекции находятся как аналитически, так и методом численного интегрирования Гаусса. Показано, что кубатурный и ансцентный фильтры Калмана являются численными приближениям к фильтру нормальной аппроксимации. Отмечено, что ансцентный фильтр отличается от кубатурного возможностью эмпирической параметрической настройки на негауссовость апостериорного распределения вероятности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тихонов В.И., Кульман Н.К.** Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов. М.: Советское радио, 1975.
2. **Ярлыков М.С.** Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике. М.: Советское радио, 1980.

3. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2003.
4. **Степанов О.А.** Основные подходы и методы решения прикладных задач обработки измерительной информации // Матер. XVI конф. молодых ученых «Навигация и управление движением». СПб.: ЦНИИ Электроприбор, 2014.
5. **Kolmogoroff, A.,** Sur l'interpolation et extrapolation des suites stationnaires, Copmtes Rundus de l'Acad. Sci., Paris, 1939, 208, 2043–2045.
6. **Колмогоров А.Н.** Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей // Изв. АН СССР. Математика. 1941. № 5. С. 3–14.
7. **Wiener, N.,** The Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series, N.Y.: John Wiley & Sons, 1949.
8. **Ньютон Д.К., Гулд Л.А., Кайзер Д.Ф.** Теория линейных следящих систем: Аналитические методы расчета. М.: Изд. физ.-мат. лит. 1961.
9. **Kalman, R.E.,** A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Trans. ASME – Journal of Basic Engineering, 1960, vol. 82, pp. 35–45.
10. **Kalman, R.E., Bucy, R.S.,** New Results in Linear Filtering and Prediction Theory, Trans. ASME – Journal of Basic Engineering, 1961, vol. 83, pp. 95–107.
11. **Степанов О.А.** Фильтр Калмана: история и современность // Гироскопия и навигация. 2010. № 2. С. 107–121.
12. **Стратонович Р.Л.** Условные процессы Маркова // Теория вероятн. и ее примен. 1960. Т. 5. № 2. С. 172–195.
13. **Стратонович Р.Л.** Применение теории процессов Маркова для оптимальной фильтрации сигналов // Радиотехника и электроника. 1960. Т. 5. N 11. С. 1751–1763.
14. **Стратонович Р.Л.** К теории автоматического управления. Достаточные координаты // Автоматика и телемеханика. 1962. № 7. С. 910–917.
15. **Jazwinski, A.H.,** Stochastic Processes and Filtering Theory. San Diego, CA: Academic, 1970.
16. **Сейдж Э., Мелс Дж.** Теория оценивания и её применение в связи и управлении. М.: Связь, 1976.
17. **Ярлыков М.С., Миронов М.А.** Марковская теория оценивания случайных процессов. М.: Радио и связь, 1993.
18. **Chen, Z.,** Bayesian Filtering: From Kalman Filters to Particle Filters, and Beyond, Technical Report: Adaptive Syst. Lab. McMaster University, Hamilton, ON, Canada, 2003.
19. **Julier, S., Uhlmann, J.,** Unscented Filtering and Nonlinear Estimation, Proc. IEEE, 2004, vol. 92, no 3, pp. 401–422.
20. **Arasaratnam, I., Haykin, S.,** Cubature Kalman Filters, IEEE Trans. Automat. Control, 2009, vol. 54, no 6, pp. 1254–1269.
21. **Рыбаков К.А**. Статистические методы анализа и фильтрации в непрерывных стохастических системах. М.: МАИ, 2017.
22. **Рыбаков К.А**. О вычислении весовых коэффициентов в непрерывном фильтре частиц // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. № 2. С. 32–39.
23. **Пугачев В.С.** Оценивание переменных и параметров в дискретных нелинейных системах // Автоматика и телемеханика. 1979. № 4. С. 39–50.
24. **Пугачев В.С.** Оценивание состояния и параметров непрерывных нелинейных систем // Автоматика и телемеханика. 1979. № 6. С. 63–79.
25. **Пугачев В.С.** Условно оптимальная фильтрация и экстраполяция непрерывных процессов // Автоматика и телемеханика. 1984. № 2. С. 82–89.
26. **Синицын И.Н.** Фильтры Калмана и Пугачева. М.: Логос, 2007.
27. **Панков А.Р.** Рекуррентная условно-минимаксная фильтрация процессов в разностных нелинейных стохастических системах // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1992. № 3. С. 69–75.
28. **Борисов А.В., Босов А.В., Кибзун А.И., Миллер Г.Б., Семенихин К.В.** Метод условно-минимаксной нелинейной фильтрации и современные подходы к оцениванию состояний нелинейных стохастических систем // Автоматика и телемеханика. 2018. № 1. С. 3–17.
29. **Руденко Е.А.** Оптимальная структура дискретных нелинейных фильтров малого порядка // Автоматика и телемеханика. 1999. № 9. С. 58–71.
30. **Руденко Е.А.** Оптимальные дискретные нелинейные фильтры порядка объекта и их гауссовские приближения // Автоматика и телемеханика. 2010. № 2. С. 159–178.
31. **Руденко Е.А.** Оптимальный дискретный нелинейный фильтр произвольного порядка // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2010. № 4. С. 39–51.
32. **Руденко Е.А.** Оптимальный нелинейный рекуррентный фильтр с конечной памятью // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2018. № 1. С. 45–63.
33. **Руденко Е.А.** Методы и алгоритмы оптимальной конечномерной нелинейной фильтрации случайных марковских последовательностей // Матер. XXXI конф. памяти Острякова. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С. 133–145.
34. **Мюллер В.К., Дашевская В.Л. и др.** Новый англо-русский словарь. М.: Русский язык, 1996.
35. **Самарский А.А., Гулин А.В.** Численные методы. М.: Наука, 1989.
36. **Руденко Е.А.** Автономное оценивание траектории спускаемого аппарата рекуррентными гауссовскими фильтрами // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2018. № 5. С. 9–29.
37. **Босов А.В., Миллер Г.Б.** Условно-минимаксный нелинейный фильтр и сигма-точечные фильтры: практический анализ и сравнение // Автоматика и телемеханика. 2019. № 7. С. 61–88.

E.A. Rudenko (Moscow Aviation Institute, Moscow)

COMPARISON OF STOCHASTIC FILTERING ALGORITHMS

The fundamental difference between the Kalman and Wiener approaches to solving the problem of continuous linear filtration is discussed. A comparison is made of a discrete nonlinear absolutely optimal filter, which is infinite-dimensional, with three simpler finite-dimensional ones: conditionally optimal, conditionally minimax and optimal structure, and the last three - and among themselves. Suboptimal algorithms for discrete nonlinear estimation are also compared: the filter of normal approximation, as well as cubature and anscent Kalman filters.

К. Д. ВО, А. А. БОБЦОВ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

НАБЛЮДАТЕЛЬ ПЕРЕМЕННЫХ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ЛИНЕЙНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМ С НЕТОЧНО ЗАДАННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Рассматривается задача синтеза адаптивного наблюдателя переменных состояния для линейных нестационарных систем. Допускается, что часть параметров нестационарного объекта может быть неизвестными числами, умноженными на известные функции времени. Предлагаемый подход базируется на идентификационных методах адаптации. Представлены результаты компьютерного моделирования, иллюстрирующие достижение заданной цели синтеза наблюдателя переменных состояния.

Введение. Постановка задачи. Рассматривается новый метод синтеза наблюдателей переменных состояния для линейных нестационарных систем с частично неизвестными параметрами матриц состояния, входа и выхода. Хотя данная проблематика не является новой, но на текущий момент универсальных подходов не существует. В данной работе предлагается еще один подход, позволяющий синтезировать наблюдатели для систем, в которых некоторые параметры являются частично неизвестными.

Рассмотрим полностью управляемый и наблюдаемый нестационарный одноканальный объект управления, представленного в форме вход–состояние–выход:

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + b(t)u(t), \tag{1}$$

$$y(t) = c^{\mathrm{T}}(t)x(t), \tag{2}$$

где $x(t) \in \mathrm{R}^n$ – неизмеряемый вектор переменных состояния; $A(t), b(t)$ и $c(t)$ –нестационарные матрицы с частично известными коэффициентами; $y(t)$ и $u(t)$ – измеряемые выход и сигнал управления соответственно.

Ставится задача синтеза наблюдателя переменных состояния

$$\hat{x}(t) = f(y, u), \tag{3}$$

обеспечивающего для системы (1), (2) достижение целевого условия

$$\lim_{t\to\infty} \tilde{x}(t) = 0, \tag{4}$$

где $\tilde{x}(t) = \hat{x}(t) - x(t)$.

Решение задачи синтеза наблюдателя (3) для объекта (1), (2), обеспечивающего выполнение (4), будет обеспечиваться при выполнении следующих предположений.

Предположение 1. Матрица $A(t)$ имеет структуру

$$A(t) = A_0(t) + g(t)c^T(t),$$

где $A_0(t)$ – нестационарная матрица с известными параметрами; $g(t)$ – вектор неизвестных параметров, элементы которого заданы в виде

$$g_i(t) = a_i s_i(t),$$

где a_i – неизвестное число, но $s_i(t)$ – известная функция.

Предположение 2. Векторы $b(t)$ и $c(t)$ имеют вид:

$$b(t) = \beta b_0(t),$$

$$c(t) = \sigma c_0(t),$$

где $b_0(t)$ и $c_0(t)$ – известные векторы; $\beta > 0$ и $\sigma > 0$ – неизвестные числа.

Синтез адаптивного наблюдателя. Для синтеза наблюдателя будем использовать идеи, недавно опубликованные в [1, 2]. Рассмотрим уравнение (1) при структурных предположениях

$$A(t) = A_0(t) + g(t)c^{\mathrm{T}}(t),$$

$$b(t) = \beta b_0(t).$$

Тогда (1) примет вид

$$\dot{x} = \left(A_0 + gc^{\mathrm{T}}\right)x + \beta b_0 u = A_0 x + gy + \beta b_0(t)u. \tag{5}$$

Для системы (5) введем в рассмотрение новый вектор $\xi = col\{x, a, \beta\}$, где $a = col\{a_1, \ldots, a_n\}$ – вектор неизвестных постоянных параметров. Тогда (5) можно записать следующим образом:

$$\dot{\xi} = F(t)\xi = \begin{bmatrix} A_0 & y\Omega & b_0 u \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ a \\ \beta \end{bmatrix},$$
$$y = r^{\mathrm{T}}\xi,$$

где матрица $\Omega = diag\{s_1(t), \ldots, s_n(t)\}$ и $r^{\mathrm{T}} = [c^{\mathrm{T}} \quad 0 \quad 0]$.

Для оценивания вектора ξ проведем ряд элементарных преобразований. В результате этих преобразований получаем

$$\xi(t) = z(t) - \Phi(t)\theta,$$

где $\theta = z(0) - \xi(0)$ и $z(t)$ – решение уравнения

$$\dot{z} = F(t)z.$$

Таким образом, задача оценивания вектора $\xi(t)$ может быть сведена к идентификации вектора неизвестных параметров θ. Для идентификации вектора θ рассмотрим регрессионную модель вида

$$y = \psi^{\mathrm{T}}\eta,$$

где $\psi = col\{\psi_1, -\psi_2\}$ – вектор известных функций и $\eta = col\{\sigma, \sigma\,\theta\}$ – вектор неизвестных постоянных параметров.

Для идентификации вектора неизвестных параметров θ можно использовать любые подходы, в частности метод DREM (см., например, [3]).

Для иллюстрации и понимания процедуры синтеза наблюдателя рассмотрим пример. Пусть система (1), (2) имеет вид

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & 1 \\ 0 & \sin 2t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, \tag{6}$$

$$y = 5x_1, \tag{7}$$

где a_1 – неизвестный постоянный параметр.

Рассмотрим новый вектор переменных состояния $\xi = [x_1 \quad x_2 \quad a_1]^{\mathrm{T}}$. Тогда легко видеть, что модель (6), (7) можно записать в виде

$$\dot{\xi} = F\xi + Gu, \quad y = r^{\mathrm{T}}\xi, \tag{8}$$

где $F(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0,2y \\ 0 & \sin 2t & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $G = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $r^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 0 \end{bmatrix}$.

Далее рассмотрим динамическую систему, полностью эквивалентную (8):

$$\dot{z}(t) = F(t)z(t) + G(t)u(t).$$

Сформируем матрицу $\Phi(t)$ с единичными начальными условиями

$$\dot{\Phi}(t) = F(t)\Phi(t)$$

и регрессионное уравнение для поиска вектора неизвестных параметров

$$y(t) = r^{\mathrm{T}}(t)z(t) - r^{\mathrm{T}}(t)\Phi(t)\theta. \tag{9}$$

Из уравнения (9) получаем

$$q = \omega^{\mathrm{T}}\theta, \tag{10}$$

где $q = r^{\mathrm{T}}(t)z(t) - y(t)$ и вектор $\omega^{\mathrm{T}} = r^{\mathrm{T}}(t)\Phi(t)$.

Для обеспечения быстродействия оценивания параметров и монотонности их переходных процессов воспользуемся методом DREM. Следуя [3], пропустим известные элементы регрессионной модели (10) через блоки запаздывания $[H(\cdot)](t) = (\cdot)(t - \tau)$, где $\tau \in R_+$. Тогда для (10) имеем

$$q_{f_i} = \omega_{f_i}^{\mathrm{T}}\theta. \tag{11}$$

Сформулируем на основе исходной регрессионной модели (10) и новой отфильтрованной регрессионной модели (11) расширенную модель

$$q_e = A_e\theta, \tag{12}$$

где $q_e = \begin{bmatrix} q & q_{f_1} & \cdots & q_{f_{n-1}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$, $A_e = \begin{bmatrix} \omega^{\mathrm{T}} & \omega_{f_1}^{\mathrm{T}} & \cdots & \omega_{f_{n-1}}^{\mathrm{T}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$, $\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \cdots & \theta_n \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$.

Умножая (12) на алгебраическое дополнение A_e, получаем

$$Y = adjA_e q_e = \Delta\theta,$$

откуда имеем скалярную модель вида

$$Y_i = \Delta\theta_i,$$

где $\Delta = \det\{A_e\}$ – определитель матрицы A_e.

Оценку θ_i будем вычислять по формуле

$$d\hat{\theta}_i / dt = -k_i\Delta(\Delta\hat{\theta}_i - Y_i), \quad (13)$$

где k_i – положительное число, увеличивая которое, можно добиваться ускорения процессов сходимости неизвестных параметров к истинным значениям.

Для формирования оценок вектора ξ подставим полученные значения оцениваемых параметров в уравнение

$$\hat{\xi}(t) = z(t) - \Phi(t)\hat{\theta}. \quad (14)$$

При моделировании адаптивного наблюдателя (13), (14) были выбраны: $\tau = 0{,}1$, $z(0) = 0$, $u = 1$. На рис. 1 и 2 соответственно представлены графики переходных процессов для $\hat{\theta}_i$ и $\tilde{\xi} = \hat{\xi} - \xi$ при $k_i = 10$ и $k_i = 1000$.

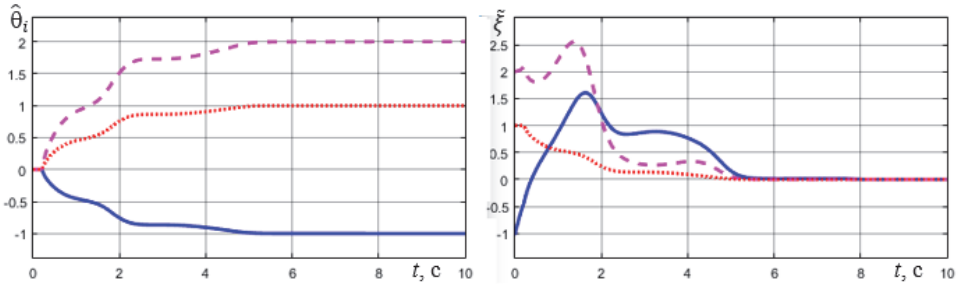


Рис. 1. Графики переходных процессов при $k_i = 10$ ($\hat{\theta}_1$, $\tilde{x}_1$ – сплошная; $\hat{\theta}_2$, $\tilde{x}_2$ – штриховая; $\hat{\theta}_3$, $\tilde{a}_1$ – точечная)

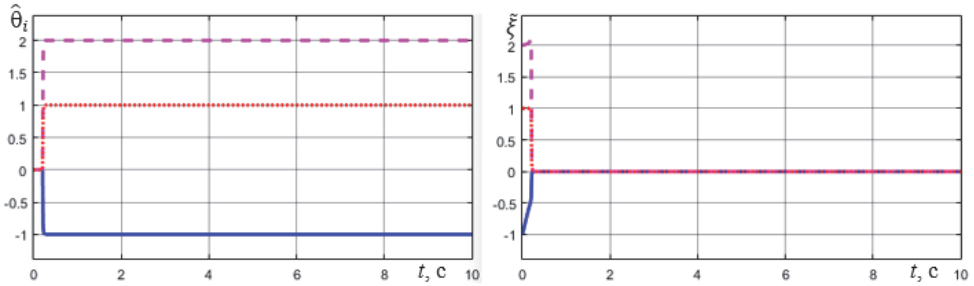


Рис. 2. Графики переходных процессов при $k_i = 1000$ ($\hat{\theta}_1$, $\tilde{x}_1$ – сплошная; $\hat{\theta}_2$, $\tilde{x}_2$ – штриховая; $\hat{\theta}_3$, $\tilde{a}_1$ – точечная)

Заключение. В работе предложен метод синтеза наблюдателя переменных состояния для линейной нестационарной системы с частично неизвестными параметрами. Для синтеза наблюдателя был использован подход, предусматривающий преобразование исходной модели объекта управления к линейной регрессионной модели. Представленные результаты компьютерного моделирования иллюстрируют работоспособность предложенного подхода, а также демонстрируют хорошее качество переходных процессов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ortega, R., Bobtsov, A., Pyrkin, A., Aranovskiy, S.,** A Parameter Estimation Approach to State Observation of Nonlinear Systems, Syst. Control Lett., 2015, vol. 85, no. 11, pp. 8–94.
2. **Ortega, R., Bobtsov, A., Dochain, D., Nikolaev, N.,** State Observers for Reaction Systems with Improved Convergence Rates, J. Process Control, 2019, vol. 83, no. 11, pp. 53–62.
3. **Aranovskiy, S., Bobtsov, A., Ortega, R., Pyrkin, A.,** Performance Enhancement of Parameter Estimators via Dynamic Regressor Extension and Mixing, IEEE Trans. Automat. Control, 2016, vol. 62, no. 7, pp. 3546–3550.

Q.D. Vo, A.A. Bobtsov (ITMO university, Saint-Petersburg)

STATE OBSERVER FOR LINEAR TIME-VARYING SYSTEMS WITH PARTIALLY UNKNOWN PARAMETERS

The problem of synthesis of an adaptive observer of state variables for linear non-stationary systems is considered. It is assumed that some of the parameters of a non-stationary object can be unknown numbers multiplied by known time functions. The proposed approach is based on identification adaptation methods. The presented results of computer simulation illustrate the achievement of a given goal of synthesis of an observer of state variables.

В. И. ШИРЯЕВ, Е. О. ПОДИВИЛОВА, Д. В. ХАДАНОВИЧ
(ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)», Челябинск)

АЛГОРИТМЫ ГАРАНТИРОВАННОГО ОЦЕНИВАНИЯ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОТЫ ИНФОРМАЦИИ

Рассматривается задача гарантированного оценивания вектора состояния, возмущений и ошибок измерений, когда информация о начальном состоянии, возмущениях и помехах известна лишь в виде выпуклых многогранников, из которых они могут принимать любые значения. Оценка для неизвестных величин получается в виде информационного множества, заданного неявно системой линейных уравнений и неравенств. Предложены алгоритмы аппроксимации информационного множества многогранником с меньшим числом граней. Поскольку гарантированный подход рассчитан на наихудший случай, что приводит к слишком пессимистическим оценкам, то рассматривается возможность адаптации к реализующимся возмущениям и ошибкам измерений в целях повышения точности оценивания – уменьшения ошибок гарантированного оценивания.

Введение. Традиционный подход к построению систем управления динамическими объектами заключается в последовательном решении двух задач – задачи оценивания и задачи синтеза управления, при этом точность решения задачи оценивания существенно зависит от адекватности математической модели динамики объекта и реальных измерительных процессов. В зависимости от предположений о характере возмущений, действующих на объект, и ошибок измерений в информационно-измерительном канале задача оценивания решается либо в стохастической постановке [1–12], либо в гарантированной [13–24, 26–30, 33–35].

В настоящее время широко распространен стохастический подход, при котором известными считаются статистические характеристики случайных факторов – помехи в измерениях, внешние возмущения, начальное состояние в уравнении движения объекта. В предположении о случайности неконтролируемых факторов задача оценивания допускает решение с помощью фильтра Калмана. Однако во многих ситуациях предположение о случайности является неоправданным [18, 25], а известно, что возмущения и ошибки измерений являются ограниченными. В этом случае задача оценивания может быть решена в рамках гарантированного (теоретико-множественного подхода) [13–24, 26–30].

Постановка задачи. Рассмотрим линейную динамическую систему, описываемую линейными разностными уравнениями вида

$$\left.\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + \Gamma w_k, \\ y_{k+1} &= Gx_{k+1} + Hv_{k+1}, \quad k = 0, 1, ..., N-1, \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

где $x_k \in R^n, w_k \in R^l, y_k \in R^m, v_k \in R^p$ – векторы состояния системы, возмущения, измерения и ошибок измерений соответственно. Матрицы A, Γ, G и H считаются известными, а система наблюдаема.

При гарантированном или минимаксном подходе к решению задачи оценивания в условиях неопределенности априорная информация о начальном состоянии системы x_0, возмущениях w_k и ошибках измерений v_k задается в виде выпуклых многогранников [19–21, 26–28], из которых они могут принимать любые значения:

$$x_0 \in X_0 = \{x_0 \mid A_x x_0 \le b_x\}, \quad w_k \in W = \{w_k \mid A_w w_k \le b_w\}, \quad v_k \in V = \{v_k \mid A_v v_k \le b_v\}. \tag{2}$$

При таком подходе требуется получить оценку вектора состояния в виде информационного множества $x_k \in \overline{X}_k, k = \overline{1, N}$ [13, 16–18, 26–28].

Однако построение информационных множеств – вычислительно сложная задача [18, 23, 26–28, 31, 32]. При увеличении размерности вектора состояния возникают проблемы в реализации операции суммы множеств в реальном времени, и вместо точного построения информационного множества применяют его различные аппроксимации геометрическими фигурами за-

данной формы, например эллипсоидами [29, 30, 33, 34], полиэдрами [35] и др., хотя при этом и происходит потеря точности.

Решение задачи. Возможна реализация алгоритма построения аппроксимации информационных множеств, когда множества возможных значений возмущений, помех и начального состояния являются многогранниками, заданными системами линейных неравенств (2).

Пусть по результатам измерения y_k решена задача оценивания и построено информационное множество $\bar{X}_k$, заданное системой линейных неравенств, полученных из ограничений на возмущения и ошибки измерений (2) [27]. Тогда задача оценивания для следующего *k+1* момента времени может быть сведена к решению следующей системы:

$$\left.\begin{aligned} &Gx_{k+1} + Hv_{k+1} = y_{k+1};\\ &x_{k+1} - Ax_k - \Gamma w_k = 0;\\ &x_k \in \bar{X}_k, w_k \in W, v_{k+1} \in V. \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

На основе системы (3) строится явное представление аппроксимирующего информационное множество $\bar{X}_{k+1}$ многогранника X_{k+1} в виде системы линейных неравенств относительно неизвестного вектора состояния x_{k+1}, т.е. $\bar{X}_k \subseteq X_k = \left\{x \mid A_{x_k} x \le b_{x_k}\right\}$. Для этого необходимо задать набор векторов нормалей a_i к граням аппроксимирующего многогранника X_{k+1}, где a_i – i-я строка матрицы A_{x_k}, по направлению которых оценки значения координат вектора состояния являются наиболее значимыми. Для вычисления значений свободного члена b_{x_k} требуется решить ряд задач линейного программирования. Построение аппроксимации информационных множеств может осуществляться как на основе текущего измерения, так и с учетом накопленных за предыдущие шаги данных [27, 31, 32].

Несмотря на возрастающий с середины прошлого столетия интерес к задачам оценивания и управления в теоретико-множественной постановке, к настоящему времени данный подход не получил широкого распространения. Наверное, потому, что, в частности, как отмечалось Богуславским И.А. [36], гарантированный подход может приводить к слишком пессимистичным оценкам, с одной стороны, а с другой стороны, реализация алгоритмов гарантированного оценивания в реальном времени требует больших вычислительных ресурсов в связи с выполнением операций над множествами. Следовательно, актуальной становится задача построения алгоритмов гарантированного оценивая вектора состояния динамических систем, обладающих свойством адаптивности для распознавания ситуаций, когда возмущения, действующие на объект, и ошибки измерений в канале наблюдения реализуются не наихудшим образом, т.е. среда, в которой функционирует объект, ведет себя не так агрессивно, как это заложено в априорных данных о допустимых множествах значений неконтролируемых факторов.

Вопрос о синтезе адаптивных фильтров, способных обеспечить достаточно точную оценку вектора состояния в отсутствии точной априорной информации о возмущениях и ошибках измерений, является одним из центральных в современной теории оценивания. Повысить точность решения задачи фильтрации можно путем восстановления математической модели и оценки неизвестных параметров, определяющих свойства возмущений и помех в канале наблюдения [37]. Описанный выше алгоритм аппроксимации информационных множеств позволяет получать гарантированную оценку возмущений и ошибок измерений [27, 38], что может быть в дальнейшем использовано для разработки адаптивных алгоритмов оценивания.

Обсуждения. Эффективность предлагаемых алгоритмов оценивания продемонстрирована в задаче обработки измерительной информации с датчиков. Для повышения точности определения измеряемой величины строится математическая модель «быстрых» колебаний в измерениях в виде разложения по системе базисных функций [27]. Построение модели проводится по некоторому набору измерений. Идентификация параметров модели осуществляется с помощью алгоритма гарантированного оценивания. Также рассматривается задача адаптивного гарантированного оценивания величины постоянного сигнала, наблюдаемого на фоне помех, заданных с точностью до множества их возможных значений, которое является постоянным для некото-

рого интервала времени. Априорно заданное множество ошибок измерений разбивается на два пересекающихся подмножества. За счет рассмотрения результатов работы алгоритма для выбранных подмножеств осуществляется выбор подмножества возможных значений ошибок измерений. Критерием выбора является точность апостериорных оценок ошибок измерений. В качестве такого критерия рассматривается среднеквадратическое отклонение апостериорных оценок ошибок измерений.

Заключение. В докладе рассматриваются алгоритмы гарантированного оценивания вектора состояния, возмущений и ошибок измерений путем аппроксимации информационного множества сверху многогранником заданной формы. Алгоритм использует неявное задание информационного множества системами линейных неравенств и уравнений, полученных из модели динамической системы. Алгоритм сводится к решению ряда задач линейного программирования. Также для повышения точности решения задачи гарантированного оценивания предложен подход к построению адаптивного фильтра. Предполагается использование параллельных вычислений, когда задача оценивания решается при различных априорных предположениях о реализации ошибок измерений. При таком подходе осуществляется информационное доопределение множества возможных значений ошибок измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kalman, R.E.,** A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering, 1960, no 82, pp. 35–45.
2. **Kalman, R.E.,** Mathematical Description of Linear Dynamical Systems, J.S.I.A.M. Control, 1963, Ser. A, vol. 1., no. 2, pp. 152–192.
3. **Grewal, M., Andrews, A.P.,** Kalman Filtering: Theory and Practice. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1993.
4. **Sorenson, H.W.,** Least-squares estimation: from Gauss to Kalman, IEEE spectrum, 1970, vol. 7, pp. 63–68.
5. **Колмогоров А.Н.** Интерполирование и экстраполирование случайных последовательностей // Изв. АН СССР. Сер. Матем. 1941. Т. 5. № 1. С. 3–14.
6. **Wiener, N.,** Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time series. With Engineering Applications, Wiley, New York, 1949.
7. **Jazwinski, A.H.,** Stochastic process and filtering theory, Academic Press, Inc., New York, 1970.
8. **Фомин В.Н.** Рекуррентное оценивание и адаптивная фильтрация. М.: Наука, 1984.
9. **Ривкин С.С.** Метод оптимальной фильтрации Калмана и его применение в инерциальных навигационных системах. Ч. 1, 2. Л.: Судостроение, 1973, 1974.
10. **Кузовков Н.Т., Салычев О.С.** Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. М.: Машиностроение, 1982.
11. **Малышев В.В., Кибзун А.И.** Анализ и синтез высокоточного управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1987.
12. **Степанов О.А.** Рекуррентное оценивание и фильтрация: предыстория и современное состояние // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. №12. С. 10–16.
13. **Schweppe, F.C.,** Recursive state estimation: Unknown but bounded errors and system inputs, IEEE Transactions on Automatic Control, 1968, vol. 13, no. 1, pp. 22–28.
14. **Schweppe, F.C.,** Uncertain Dynamic Systems, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1973.
15. **Bertsecas, D.P., Rhodes, I.B.,** Recursive state estimation for a set-membership description of uncertainty, IEEE Transactions on Automatic Control, 1971, vol. 16, no. 2, pp. 117–128.
16. **Куржанский А.Б.** Управление и наблюдение в условиях неопределенности. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1977.
17. **Кац И.Я., Куржанский А.Б.** Минимаксная многошаговая фильтрация в статистически неопределенных ситуациях // Автоматика и телемеханика. 1978. № 11. С. 79–87.
18. **Кейн В.М.** Оптимизация систем управления по минимаксному критерию. М: Наука, 1985.
19. **Кунцевич В.М.** Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации. Киев: Наукова думка, 2006.
20. **Акимов П.А., Матасов А.И., Деревянкин А.В.** Гарантирующий подход и l_1-аппроксимация в задачах оценивания параметров БИНС при стендовых испытаниях. М.: Изд-во Московского университета, 2012.
21. **Акимов П.А., Матасов А.И.** Итерационный алгоритм для l_1-аппроксимации в динамических задачах оценивания // Автоматика и телемеханика. 2015. № 5. С. 7–26.
22. **Назин С.А., Поляк Б.Т.** Параметрическое оценивание методом эллипсоидов в линейных многомерных системах с неопределенным описанием модели // Автоматика и телемеханика. 2007. № 6. С. 67–80.
23. **Поляк Б.Т., Топунов М.В.** Фильтрация при неслучайных возмущениях: метод инвариантных эллипсоидов // Доклады АН. 2008. Т. 418. № 6. С. 749–753.
24. **Эльясберг П.Е.** Измерительная информация: сколько ее нужно? Как ее обрабатывать? М.: Наука, 1983.
25. **Калман Р.Е.** Идентификация систем с шумами. Успехи математических наук. 1985. Т. 40. № 4(244). С. 27–41.
26. **Ширяев В.И.** Синтез управления линейными системами при неполной информации // Изв. РАН. Техническая кибернетика. 1994. № 3. С. 229–237.

27. **Ширяев В.И.** Алгоритмы управления динамическими системами в условиях неопределённости // Мехатроника. 2001. № 8. С. 2–5.
28. **Шалыгин А.С., Лысенко Л.Н., Толпегин О.А.** Методы моделирования ситуационного управления движением беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 2012.
29. **Бакан Г.М.** Фильтрация в условиях не статистически заданной неопределенности // Автоматика. 1980. № 2. С. 13–21.
30. **Бакан Г.М.** Оптимизация алгоритмов гарантированного оценивания состояний динамических систем // Автоматика и телемеханика. 2000. № 10. С. 27–36.
31. **Ширяев В.И., Подивилова Е.О.** Аппроксимация информационных множеств в задаче гарантированного оценивания состояния динамических систем в условиях неопределенности // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 7. С. 10–16.
32. **Ширяев В.И., Подивилова Е.О.** Об аппроксимации информационных множеств в задаче гарантированного оценивания состояния линейных динамических систем // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Москва, 16-19 июня 2014 г.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 2132–2141.
33. **Черноусько Ф.Л.** Оценивание фазового состояния динамических систем. М.: Наука, 1988. 319 с.
34. **Сальников Н.Н.** Эллипсоидальное оценивание состояний и параметров динамической системы при отсутствии априорной информации // Проблемы управления и информатики. 2014. № 2. С. 144–156.
35. **Le, V.T.H., Stoica, C., Alamo, T., Camacho, E.F., Dumur, D.,** Zonotopes from Guaranteed State-estimation to Control, ISTE Ltd., 2013, 150 p.
36. **Богуславский И.А.** Аппроксимация задачи нелинейной фильтрации последовательностью линейных задач; мера робастности фильтрации // Изв. РАН. Техническая кибернетика. 1994. № 1. С. 85–99.
37. **Ширяев В.И., Хаданович Д.В.** Об адаптации алгоритма гарантированного оценивания // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. Москва, 17-20 июня 2019 г.: Труды. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. С. 776–780.
38. **Ширяев В.И., Ильин Е.Д.** О гарантированном оценивании возмущений в линейных динамических системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 9. С. 12–16.

V.I. Shiryaev, E.O. Podivilova, D.V. Khadanovich (Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “South Ural State University (national research university)”, Chelyabinsk)

GUARANTEED ESTIMATION ALGORITHMS UNDER CONDITIONS OF INCOMPLETE INFORMATION

The guaranteed estimation problem of the state vector, disturbances and measurement errors, when information about the initial state, disturbances and noises is known only in the form of convex polyhedra, from which they can take any values is consider. An estimate for unknown quantities is obtained in the form of the feasible set (information set) implicitly given by a system of linear equations and inequalities. Algorithms for approximating the information set by a polyhedron with fewer faces are proposed. Since the guaranteed approach is designed for the worst case, which leads to too pessimistic estimates, the possibility of adapting to the realized disturbances and measurement errors is considered in order to increase the estimation accuracy - to reduce the guaranteed estimation errors.

О. Н. ГРАНИЧИН
(СПБГУ, Санкт-Петербург)

НАБЛЮДАТЕЛИ И ФИЛЬТРЫ: РАНДОМИЗАЦИЯ КАК АЛЬТЕРНАТИВА ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКИХ И ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ ПОДХОДОВ

Обычно в теории и на практике противопоставляются два подхода к постановкам и решению задач наблюдения и оценивания: детерминированный и стохастический. Но оба требуют задания достаточно жестких условий на модель и характеристики неопределенностей. Значимой альтернативой представляется использование рандомизации в комбинации со стохастическим или детерминированным подходами. Использование рандомизации при построении плана наблюдений позволяет «обогатить» последовательность наблюдений и сформулировать теоретические обоснованные результаты о вероятностно успешных алгоритмах при отсутствии жестких предварительных условий о неопределенностях в задаче.

Введение. Решение разнообразных задач по достижению задаваемых целей в априори неизвестных средах требует разработки методов и стратегий, опирающихся на обучение (самообучение) и/или способных подстраиваться, или, иными словами, адаптироваться, к поставленной цели в условиях неопределенностей. При этом неопределенности могут возникать на различных этапах функционирования системы при осуществлении сбора, обработки и/или передаче информации. Математически неопределенности обычно учитываются при формализации задач фильтрации, оптимизации, обучения или оценивания через введение функционалов типа среднего риска или при рассмотрении минимаксных функционалов качества.

В основу большинства алгоритмов построения наблюдателей, фильтрации, систем оценивания (идентификации) неизвестных параметров, стратегий управления сетевыми системами, машинного обучения заложены те или иные методы оптимизации соответствующих функционалов, развитие которых на текущий момент направлено на решение следующих проблем: сложный тип оптимизируемой функции (выпуклая негладкая, невыпуклая), частично целочисленная и комбинаторная оптимизация, большие данные (искомый вектор параметров большой размерности), оптимизация в реальном времени, наличие неопределенностей. Неопределенности, наиболее часто встречающиеся на практике, – внешние воздействия на систему и/или помехи в измерениях и при передаче данных. Большинство классических алгоритмов оптимизации либо вообще применимы только в детерминированных случаях, либо опираются на предположения об известности статистических свойств помех и внешних возмущений [1–3]. Задачи обучения и адаптивного управления значительно усложняются при рассмотрении произвольных внешних по отношению к системе неопределенностей (например, при ограниченных, но в остальном неизвестных), с которыми часто сталкиваются на практике.

Наибольший интерес представляют исследования в области стохастической оптимизации, направленные на уменьшение необходимых для работоспособности алгоритмов оптимизации априорных знаний относительно неопределенностей в задаче [4–6]. В монографии [7] рассматриваются подходы к решению оптимизационных задач при почти произвольных внешних помехах, как правило, ограниченных. Для борьбы с неопределенностями активно используются рандомизированные алгоритмы, в которых действия при принятии какого-либо решения основываются на внесении рандомизации (случайности) [7–9].

Рандомизация данных. В центре доклада – использование рандомизации. Традиционный подход к процессу создания самых разнообразных систем представляет собой выполнение детерминированных алгоритмов, состоящих из последовательности детерминированных шагов. Однако во многих практических приложениях механический перенос на сложные системы естественных подходов, работоспособных для простых задач, приводит к неразрешимым противоречиям. В частности, возникает огромное число так называемых неразрешимых задач (за допустимое по сути задачи время). Включение рандомизации позволяет обобщить традиционные подходы. В рандомизированных алгоритмах один или несколько шагов основываются на случайном правиле, при котором среди многих детерминированных правил одно выбирается в

соответствии с некоторой случайной схемой. Рандомизация позволяет ввести новый термин – «вероятностно успешный алгоритм». Во многих случаях, когда детерминистической успешности достичь невозможно, вероятностная успешность предлагается как значимая альтернатива.

Одна из существенных проблем, с которой сталкиваются при синтезе управления, – недостаточная вариативность последовательности наблюдений. Например, если цель адаптивного управления состоит в минимизации отклонения вектора состояния системы от заданной траектории, то это часто приводит к вырожденной последовательности наблюдений, когда получаемых данных не хватает для определения важных характеристик системы (ее идентификации). В то время как для успешного проведения идентификации неизвестных параметров системы должно быть обеспечено разнообразие наблюдений. Учитывая возможности прямого влияния на управляемые процессы через входные переменные системы, в 1986 г. О.Н. Граничиным совместно с В.Н. Фоминым [10] и независимо Х.-Ф. Ченом с Л. Гао [11] при синтезе адаптивного асимптотически оптимального управления (минимаксного и среднеквадратического соответственно) было предложено включать в канал управления пробное рандомизированное возмущение дополнительно к основному управлению. Этот подход следует принципу дуального управления Фельдбаума [12]: управляющие воздействия должны быть не только направляющими, но также изучающими. Восстановление неизвестных параметров обеспечивается за счет свойств рандомизированных тестовых сигналов. Одна из замечательных характеристик этого подхода – состоятельность оценок при произвольных внешних возмущениях. Важным ограничением применимости является предположение о независимости рандомизированного тестового возмущения и внешних помех. Это ограничение выполняется, когда помехи – неизвестная, но ограниченная детерминированная функция или помехи представляют собой внешнее случайное возмущение, генерируемое независимо от рандомизированного пробного возмущения. В задаче планирования эксперимента идея использования рандомизации плана наблюдений для устранения эффекта смещения была выдвинута еще Р. Фишером [13] в виде рандомизированного принципа планирования эксперимента. Помимо задачи планирования эксперимента, в которой регрессоры могут быть рандомизированы экспериментатором, случайные входы возникают во многих задачах управления, идентификации, фильтрации, распознавания и т.д. (см., например, [8, 9, 14–18].

Для оптимизации функционалов среднего риска активно используются алгоритмы оценки максимального правдоподобия и стохастической аппроксимации (SA) с уменьшением до нуля коэффициентов размера шага [7]. В классических алгоритмах стохастической аппроксимации без градиента используются два измерения для аппроксимации каждой компоненты вектора-градиента (подразумевается выполнение 2D-измерений для d-мерного искомого параметра). Рандомизированные версии алгоритма стохастической аппроксимации были предложены в [7, 9, 19–23]. Эти алгоритмы можно использовать для решения задач оптимизации в случае, когда трудно или невозможно вычислить градиент функции потерь по отношению к оптимизируемым параметрам. В многомерных случаях ($d \gg 1$) эти алгоритмы требуют только одно или два измерения функции потерь на каждой итерации. В алгоритме текущая оценка обновляется определенным образом в случайно выбранном направлении Δ с ± 1 с (например, с компонентами, выбранными по распределению Бернулли), как в алгоритмах случайного поиска. В [23] обновление рассчитывается как взвешенная разница двух измерений функции потерь, полученных в точке текущей оценки и в точке, взятой на линии вдоль выбранного направления Δ.

Приложения стохастической оптимизации, встречающиеся в реальных системах, включают такие области, как распознавание образов, настройка параметров нейронных сетей, обработка сигналов, распределение ресурсов в сетевых системах, идентификация систем и адаптивное управление. Обычно решение задач стохастической оптимизации в условиях неопределенности сводится к нахождению параметров системы, которые обеспечивают минимальное (или максимальное) значение для определенного функционала среднего риска. В практических задачах эти параметры также могут меняться во времени. В этом случае рассматривается проблема отслеживания изменений параметров системы [3], называемая также отслеживанием минимума нестационарного функционала среднего риска. Традиционно в алгоритмах стохастической аппроксимации используется уменьшение размера шага до нуля. Достаточно маленький постоянный размер шага часто используется в случае минимизации нестационарной функции потерь [23, 24]. В последнее время большое внимание уделяется использованию рандомизированных

алгоритмов стохастической оптимизации в задачах отслеживания параметров [25–28]. В случае дифференцируемых изменяющихся во времени функций потерь и почти произвольного внешнего шума в [25] была получена верхняя граница среднеквадратичной ошибки оценки. Хорошим свойством этого алгоритма является то, что при низкой скорости изменения параметров среднеквадратичная ошибка оценки может быть достаточно малой по сравнению со значительным уровнем шума в наблюдениях.

Малая «вариативность» последовательности наблюдений препятствует применению традиционной асимптотической теории, обеспечивающей состоятельность оценок только в случае достаточно большого количества данных при выполнении достаточно строгих статистических предположений. М. Кампи и его соавторы предложили новый подход, называемый «методом исключения областей знакодоминирующих корреляций» (LSCR, leave-out sign-dominant correlation regions) [26, 27]. Метод LSCR обеспечивает гарантированные неасимптотические оценки возможных областей неизвестного параметра линейного динамического объекта управления при выборке данных малого размера. Недавние новые результаты М. Кампи в машинном обучении дают возможность построения классификаторов с гарантированными свойствами обобщения набора обучающих данных (т.е. данных, собранных в области и связанных с предыдущими случаями того же явления). В частности, классификатор «Машина с гарантированной ошибкой» (Guaranteed Error Machine, GEM), который имеет прочную теоретическую основу и уже применяется в практических задачах [28], дает обнадеживающие результаты по гарантии степени ошибочной классификации по сравнению с другими современными методами. GEM выдает ответ с возможностью отказа, то есть в сомнительном случае классификатор может воздержаться от ответа. Классификатор с отказом может быть интегрирован в процесс принятия решений полуавтоматической системой для повышения доверия пользователей в «благоразумие» и безопасность устройства. Новый значительный прорыв был сделан в работе [29], в которой был предложен новый метод «знаковозмущенных сумм» (Sign-Perturbed Sums, SPS) для построения точных доверительных интервалов для параметров модели линейной регрессии. В [30] используется регуляризация с ядром для получения доверительных интервалов и импульсного отклика при оценивании. Метод LSCR был существенно развит автором настоящего доклада и его коллегами для произвольных внешних возмущений и неустойчивых по управлению объектов [31, 32]. В статьях [33, 34] было предложено модифицировать метод знаковозмущенных сумм для использования его при произвольных внешних помехах за счет симметрии выбираемых входных сигналов вместо предположения о симметрии внешних неизвестных шумов. На нелинейный случай метод SPS был распространен в [35].

Заключение. Использование рандомизации при построении плана наблюдений позволяет «обогатить» последовательность наблюдений и сформулировать теоретические обоснованные результаты о вероятностно успешных алгоритмах при отсутствии жестких предварительных условий о неопределенностях в задаче.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Kalman, R.E.,** A new approach to linear filtering and prediction problems, Transactions of the ASME – Journal of Basic Engineering, 1960, 82 (Series D): 35–45.
2. **Степанов О.А.** Фильтр Калмана. история и современность // Гироскопия и навигация. 2010. № 2 (69). С. 107–121.
3. **Поляк Б. Т.** Введение в оптимизацию. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983.
4. **Spall, J.C.,** Introduction to stochastic search and optimization: estimation, simulation, and control, John Wiley & Sons, 2003.
5. **Nemirovski, A., Juditsky A., Lan, G., and Shapiro, A.,** Robust stochastic approximation approach to stochastic programming, SIAM Journal on optimization, 2009, vol. 19, no. 4, pp. 1574–1609.
6. **Dvurechensky, P., Gasnikov, A.,** Stochastic intermediate gradient method for convex problems with stochastic inexact oracle, Journal of Optimization Theory and Applications, 2016, vol. 171, no. 1, pp. 121–145.
7. **Граничин О.Н., Поляк Б.Т.** Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. М.: Наука, 2003. 291 с.
8. **Tempo, R., Calafiore, G., Dabbene, F.,** Randomized algorithms for analysis and control of uncertain systems: with applications, Springer Science & Business Media, 2012.
9. **Granichin, O., Volkovich, Z., Toledano-Kitai, D.,** Randomized algorithms in automatic control and data mining, 2015.

10. **Granichin, O.N., Fomin, V.N.,** Adaptive control using test signals in the feedback channel, Automation and Remote Control, 1986, 47 (2): 238–248.
11. **Chen, H.-F., Guo, L.,** Convergence rate of least_squares stochastic systems, Int. Journal of Control, 1986, 44(5):1459–1477.
12. **Feldbaum, A.,** Dual control theory, Automation and Remote Control, 1960, vol. 21, no. 9, pp. 874–1039.
13. **Fisher, R.A.,** The Design of Experiments, Edinburgh: Oliver and Boyd, 1935.
14. **Льюнг Л., Седерстрем Т.** Идентификация систем: теория для пользователя. М.: Наука, 1991.
15. **Цыпкин Я.З.** Информационная теория идентификации. М.: Наука, 1995.
16. **Gyorfi, L.,** Stochastic approximation from ergodic sample for linear regression, Z. Wahrscti. Verw. Geb., 1980, vol. 54.
17. **Krieger, A., Masry, E.,** Convergence analysis of adaptive linear estimation for dependent stationary processes, IEEE Trans. Inform. Theory, 1988, vol. 34.
18. **Young, P.C.,** Recursive Estimation and Time-Series Analysis. An Introduction, Berlin-Heidelberg: Springer, 1984.
19. **Spall James, C.,** Multivariate stochastic approximation using a simultaneous perturbation gradient approximation, IEEE Transactions on Automatic Control, 1992, vol. 37, no. 3, pp. 332–341.
20. **Chen Han-Fu, Duncan Tyrone E., Pasik-Duncan Bozenna**, A Kiefer-Wolfowitz algorithm with randomized differences, IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, vol. 44, no. 3, pp. 442–453.
21. **Kushner Harold J., Yin George,** Stochastic Approximation Algorithms and Applicatons (Applications of Mathematics), Springer-Verlag Telos, 1997.
22. **Borkar Vivek S.,** Stochastic Approximation: A Dynamical Systems View Point, 2008.
23. **Granichin, O., Amelina, N.,** Simultaneous perturbation stochastic approximation for tracking under unknown but bounded disturbances, IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, vol. 60, no. 6, pp. 1653–1658.
24. **Zhu Jingyi, Spall, J.C.,** Tracking capability of stochastic gradient algorithm with constant gain, Decision and Control (CDC), IEEE 55th Conference on, 2016, pp. 4522–4527.
25. **Zhu Jingyi, Spall, J.C.,** Probabilistic Bounds in Tracking a Discrete-Time Varying Process, IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2018, pp. 4849–4854.
26. **Campi, M.C., Sangho, K., and Weyer, E.,** Non-asymptotic confidence regions for model parameters in the presence of unmodelled dynamics, Automatica, vol. 45.
27. **Campi, M.C. and Weyer, E.**, Non-asymptotic confidence sets for the parameters of linear transfer functions, IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, vol. 55, no. 12, pp. 2708–2720.
28. **Campi, M.C.**, Classification with Guaranteed Probability of Error, Machine Learning, 2010, 80:63–84.
29. **Csaji, B.C., Campi, M.C., and Weyer, E.**, Sign-Perturbed Sums: A New System Identificaiton Approach for Contructing Exact Non-Asymptotic Confidence Regions in Linear Regression Models, IEEE Trans. on Signal Processing, 2015, 63, no.1, pp. 169–181.
30. **Pillonetto, Gianluigi, Carè, A., and Campi, M.C.**, Kernel-based SPS, IFAC-PapersOnLine 51, 2018, no. 15: 31–36; **Amelin, K., Granichin, O.,** Randomized control strategies under arbitrary external noise, IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, vol. PP, issue 99.
31. **Amelin, K. and Granichin, O.,** Randomized controls for linear plants and confidence regions for parameters under external arbitrary noise, Proc. of the American Control Conference (ACC), 2012, pp. 743–1619.
32. **Граничин О.Н.** Неасимптотическое доверительное множество для параметров линейного объекта управления при почти произвольных помехах // Автоматика и телемеханика. 2012. № 1. С. 24–35.
33. **Senov, A., Amelin, K., Amelina, N., Granichin, O.,** Exact confidence regions for linear regression parameter under external arbitrary noise, Proc. of the 2014 American Control Conference (ACC), Portland, USA, 4–6 June, 2014, pp. 5097–5102.
34. **Сенов А.А., Граничин О.Н.** Идентификация параметров линейной регрессии при произвольных внешних помехах в наблюдениях // XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014). Москва: ИПУ РАН, 2014. С. 2708–2719.
35. **Волкова М.В., Граничин О.Н., Волков Г.А., Петров Ю.В.** О возможности применения метода знаковозмущенных сумм для обработки результатов динамических испытаний // Вестник СПбГУ. 2018. Сер. 1. Том 63. Вып. 1. С. 30–40.

O.N. Granichin (Saint-Petersburg state university, Saint Petersburg)

OBSERVERS AND FILTERS: RANDOMIZATION AS AN ALTERNATIVE FOR BOTH STOCHASTIC AND DETERMINISTIC APPROACHES

Usually, in theory and in practice, two approaches are opposed to the formulation and solution of observation and estimation problems: deterministic and stochastic. But both require setting rather stringent conditions on the model and characteristics of uncertainties. A significant alternative seems to be the use of randomization in combination with both or stochastic or deterministic approaches. The use of randomization when constructing an observation plan allows us to “enrich” the sequence of observations and formulate theoretical substantiated results on probabilistically successful algorithms in the absence of “hard” preconditions about uncertainties in the problem.

Ю. Г. КОКУНЬКО, А. С. АНТИПОВ, С. А. КРАСНОВА
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва)

НАБЛЮДАТЕЛИ СОСТОЯНИЯ КАК СРЕДСТВО ОЦЕНИВАНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Для оценивания производных детерминированного сигнала, поступающего в реальном времени, вводится наблюдатель состояния, построенный как реплика виртуальной канонической модели с неизвестным ограниченным входом. Приводятся результаты сравнительного анализа наблюдателей с линейными и кусочно-линейными корректирующими воздействиями, которые подтверждаются результатами численного моделирования.

Введение. При синтезе высокоточных систем автоматического управления возникает проблема получения производных внешних сигналов, например задающих воздействий, что требует или их полного аналитического описания [1], или реального дифференцирования [2]. Первый подход может оказаться достаточно трудоемким с вычислительной точки зрения, если сигналы имеют сложную, составную форму, а второй – приводить к появлению паразитных сигналов и запаздывания, которые увеличиваются с ростом порядка дифференцирования. В данной работе в рамках методов синтеза наблюдателей состояния динамических объектов, функционирующих при действии внешних возмущений, предложен альтернативный подход к оцениванию производных детерминированных сигналов, свободный от указанных недостатков.

Постановка задачи. Пусть в реальном времени из внешнего, неконтролируемого источника в систему управления поступает незашумленный сигнал $g(t)$, который полагается непрерывной, кусочно-дифференцируемой функцией времени, аналитический вид которой неизвестен; ее производные до (n+1)-го порядка включительно кусочно-непрерывны и ограничены известными константами $\left|g^{(i)}(t)\right| \le G_{i+1}, i=\overline{1,n+1}, t \ge 0$. Ставится задача оценивания с заданной точностью производных данного сигнала до n-го порядка включительно с помощью динамического наблюдателя состояния, который выполняет функции дифференциатора. С этой целью введем виртуальную динамическую модель $(n+1)$-го порядка канонического вида

$$\dot{g}_i = g_{i+1},\ i=\overline{1,n+1}, \tag{1}$$

ее выходом полагается измеряемый сигнал $g_1(t)=g(t)$; переменными состояния – сам сигнал и его неизмеряемые производные $g^{(i)}(t)=g_{i+1}$, $i=\overline{1,n}$; входной сигнал $g^{(n+1)}(t)=g_{n+2}(t)$ трактуется как внешнее ограниченное возмущение. Модель (1) порождает достаточно широкий класс функций, моменты изменения формы сигнала (т.е. возможные точки конечного разрыва его производных) можно трактовать как скачкообразные изменения начальных условий.

Два подхода к синтезу наблюдателя производных. Для решения поставленной задачи вводится динамический наблюдатель, повторяющий структуру виртуальной модели (1):

$$\dot{z}_i = z_{i+1} + v_i,\ i=\overline{1,n};\ \dot{z}_{n+1} = v_{n+1}, \tag{2}$$

где $z=(z_1,...,z_{n+1})^T \in R^{n+1}$ – вектор состояний, v_i ($i=\overline{1,n+1}$) – корректирующие воздействия наблюдателя, которые формируются по измерениям $g_1(t)$ и $z_1(t)$ так, чтобы обеспечить стабилизацию системы относительно ошибок наблюдения $\varepsilon_i = g_i - z_i$, $i=\overline{1,n+1}$:

$$\dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_{i+1} - v_i, i=\overline{1,n},\ \dot{\varepsilon}_{n+1} = g_{n+2} - v_{n+1}. \tag{3}$$

Особенность системы (3) заключается в наличии «возмущения» $g_{n+2}(t)$. В частном случае, когда внешнее возмущение отсутствует $g^{(n+1)}(t) \equiv 0$, для стабилизации канонической системы (3) можно использовать стандартную линейную коррекцию

$$v_1 = a_1\varepsilon_1, v_2 = a_2\varepsilon_1, ...,\ v_{n+1} = a_{n+1}\varepsilon_1,\ \ \lambda^{n+1} + a_1\lambda^n + a_2\lambda^{n-1} ... + a_n\lambda^1 + a_{n+1}, \tag{4}$$

ее параметры – коэффициенты гурвицева полинома, что обеспечит в замкнутой системе (3)–(4) асимптотическую устойчивость и, как следствие, асимптотическое оценивание производных:

$$\lim_{t\to+\infty}\varepsilon_i(t)=0\Rightarrow\lim_{t\to+\infty}z_i(t)=g_i(t),t=\overline{1,n+1}. \quad (5)$$

В общем случае для подавления возмущения требуется применять «силовые» методы. При этом стандартная линейная коррекция (4) дополняется большим коэффициентом $l>1$ [3, 4]:

$$v_1=a_1l\varepsilon_1,v_2=a_2l^2\varepsilon_1,...,v_{n+1}=a_{n+1}l^{n+1}\varepsilon_1, \quad (6)$$

что обеспечит в замкнутой системе (3), (6) стабилизацию с заданной точностью

$$\left|\varepsilon_i(t)\right|=\left|g_i(t)-z(t)\right|\le\delta,i=\overline{1,n+1},t\ge T. \quad (7)$$

Другим методом, который составляет основной результат данной работы, является каскадный синтез наблюдателей с кусочно-линейными корректирующими воздействиями:

$$v_1=m_1\mathrm{sat}(l_1\varepsilon_1)=\begin{cases}m_1\mathrm{sign}\varepsilon_1,\left|\varepsilon_1\right|>1/l_1,\\ m_1l_1\varepsilon_1,\left|\varepsilon_1\right|\le1/l_1;\end{cases}\quad v_i=m_i\mathrm{sat}(l_iv_{i-1})=\begin{cases}m_i\mathrm{sign}(v_{i-1}),\left|v_{i-1}\right|>1/l_i,\\ m_il_iv_{i-1},\left|v_{i-1}\right|\le1/l_i,\ i=\overline{2,n+1}.\end{cases} \quad (8)$$

Они имеют два настраиваемых параметра: $m_i>0$ – амплитуду и $l_i>0$ – большой коэффициент. Ограниченные и непрерывные функции (8) являются гибридом глубоких обратных связей [3, 4] и разрывных управлений [5, 6] и привносят в замкнутую систему положительные свойства обоих методов, но свободны от их недостатков. Выбором амплитуд последовательно, по каскадному принципу обеспечивается попадание ошибок наблюдения в линейные зоны, а точность оценивания (7) зависит от больших коэффициентов. Настройка параметров основана на неравенствах [7, 8] и в отличие от (4), (6) не требует составления эталонных полиномов.

Выделим основное преимущество наблюдателя (2), (8) в решаемой задаче: управления (8) всюду ограничены, следовательно, будут существенно ограничены и всплески оценочных сигналов производных в начале всех переходных процессов, которые обусловлены сменой формы $g(t)$. Всплески же оценочных сигналов наблюдателя с глубокими обратными связями (2), (6) увеличиваются на порядок с ростом порядка производной, поэтому их использование в практических приложениях требует применения дополнительных ограничительных мер.

Пример. Для иллюстрации сделанного вывода рассмотрим результаты моделирования численного примера в MATLAB-Simulink. Для сигнала, поступающего в реальном времени

$$g_1(t)=4-t^2,t\in[0;2);g_1(t)=0{,}5(t-2)^3,t\in[2;4);g_1(t)=4,t\in[4;6);g_1(t)=4e^{-(t-6)},t\in[6;+\infty),t[c],$$

требовалось получить оценки первых трех производных. С этой целью были построены наблюдатели (2) 4-го порядка с кусочно-линейными (8) и линейными (6) корректирующими воздействиями, параметры которых выбирались так, чтобы обеспечить примерно одинаковое время переходных процессов $T=0{,}1[c]$ и точность оценивания $\delta=0{,}02$ (7):

$$m_1=150,m_2=116,m_3=m_4=150;l_1=l_2=30,l_3=l_4=10, \quad (9)$$

$$a_1=8,a_2=24,a_3=32,a_4=16,l=168. \quad (10)$$

На рис. 1–4 представлены графики сигнала $g_1(t)$, его трех производных $g_1^{(i)}(t)=g_{i+1}$, $i=1,2,3$ и их оценок $z_i(t)$ (снизу), а также $\varepsilon_i(t)=g_i(t)-z_i(t),\ i=\overline{1,4}$ (сверху). Графики слева – для наблюдателя с кусочно-линейной коррекцией (8), (9), а справа – с линейной коррекцией (6), (10). В табл. 1 для ошибок наблюдения $\varepsilon_i,i=\overline{1,4}$ на интервале $t\in[2;4)$ представлены время регулирования t_i: $\left|\varepsilon_i(t)\right|\le0{,}02,t\in[t_i;4)$; точность в установившемся режиме δ_i и величина перерегулирования $\varepsilon_{\max,i}\ge\left|\varepsilon_i(t)\right|,t\in[2;t_i)$, что подтверждает вывод о преимуществах наблюдателя с кусочно-линейной коррекцией при оценивании кусочно-непрерывных сигналов.

Таблица 1

Значения показателей качества оценивания

Сигнал	Наблюдатель (2), (8), (9)			Наблюдатель (2), (6), (10)		
	t_i, с	δ_i	$\varepsilon_{\max,i}$	t_i, с	δ_i	$\varepsilon_{\max,i}$
$\varepsilon_1=g_1-z_1$	2,0308	$1{,}55\cdot10^{-15}$	$8{,}70\cdot10^{-4}$	2,0247	$1{,}11\cdot10^{-15}$	0,0021

$\varepsilon_2 = g_2 - z_2$	2,0342	$2{,}25 \cdot 10^{-4}$	4,0003	2,0333	$2{,}25 \cdot 10^{-4}$	4,0003
$\varepsilon_3 = g_3 - z_3$	2,0570	$3{,}00 \cdot 10^{-4}$	3,1754	2,0557	$3{,}00 \cdot 10^{-4}$	867,8230
$\varepsilon_4 = g_4 - z_4$	2,0743	$1{,}24 \cdot 10^{-5}$	3,0000	2,0722	$7{,}93 \cdot 10^{-9}$	61091,4089

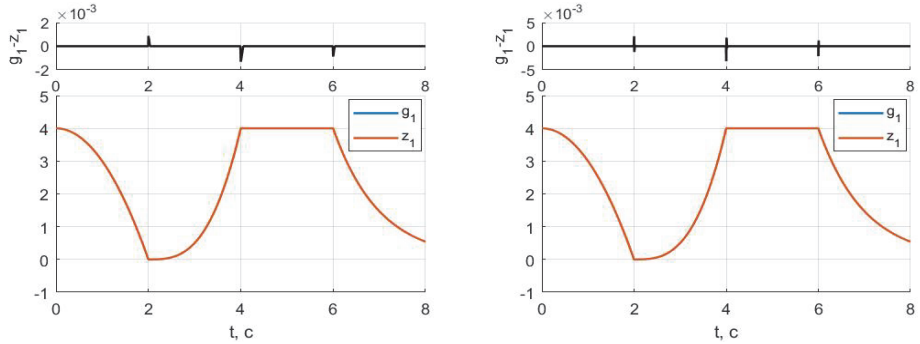


Рис. 1. Графики $\varepsilon_1(t) = g_1(t) - z_1(t)$

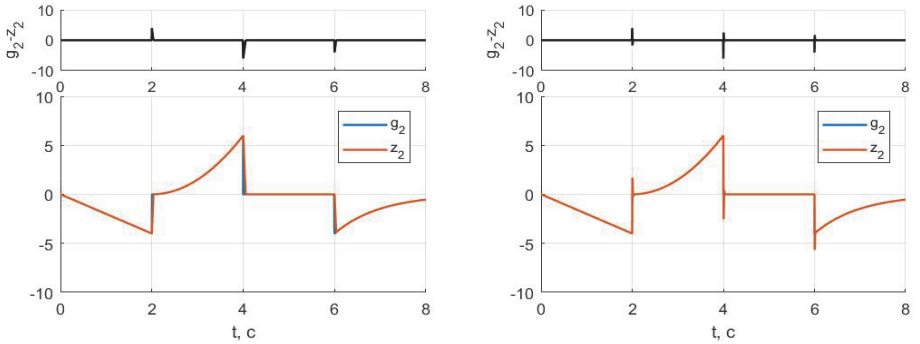


Рис. 2. Графики $\varepsilon_2(t) = g_2(t) - z_2(t)$

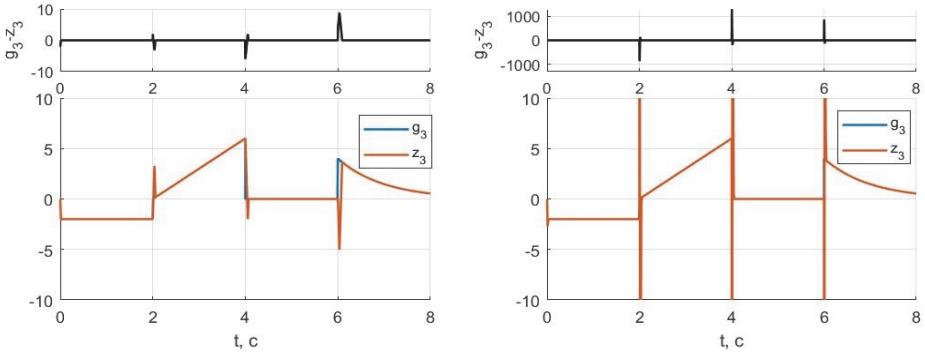


Рис. 3. Графики $\varepsilon_3(t) = g_3(t) - z_3(t)$

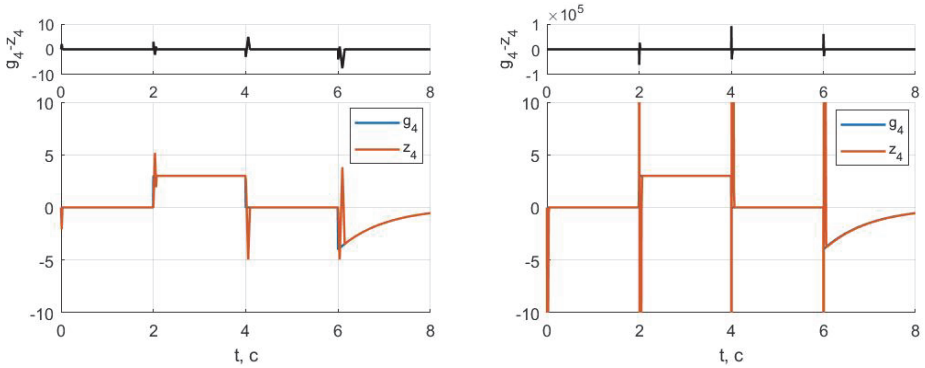


Рис. 4. Графики $\varepsilon_4(t) = g_4(t) - z_4(t)$

Заключение. В работе рассматривались стандартные наблюдатели, которые повторяют структуру объектов оценивания. В рамках систем с кусочно-линейными обратными связями перспективным представляется построение нестандартного наблюдателя без собственной динамики, что приведет к появлению в явном виде оцениваемых сигналов в системе относительно ошибок наблюдения и существенно упростит процедуру настройки параметров.

Работа проводилась при частичной поддержке гранта РФФИ 20-01-00363а

ЛИТЕРАТУРА

1. **LaValle, S.M.,** Planning Algorithms, Cambridge University Press, 2006, 842 p.
2. **Емельянов С.В., Афанасьев А.П.** Дифференцирование сигнала в системах автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика. 2015. № 12. С. 27–42.
3. **Дылевский А.В., Лозгачев Г.И.** Применение метода пространства состояний для синтеза дифференциаторов // Автоматика и телемеханика. 1999. № 9. С. 13–20.
4. **Khalil, H.K., Praly, L.**, High-gain observers in nonlinear feedback control, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2014, vol. 24, no. 6, pp. 993–1015.
5. **Levant, A.,** Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control, International Journal of Control, 2003, vol. 76, no. 9, pp. 924–941.
6. **Краснова С.А., Уткин А.В.** Анализ и синтез минимально-фазовых нелинейных SISO-систем при действии внешних несогласованных возмущений // Проблемы управления. 2014. №6. С. 22–30.
7. **Краснов Д.В., Уткин А.В.** Синтез многофункциональной системы слежения в условиях неопределенности // Управление большими системами. 2017. Вып. 69. С. 29–49.
8. **Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В.** Блочный подход к анализу и синтезу инвариантных нелинейных систем слежения // Автоматика и телемеханика. 2017. № 12. С.26–53.

Yu.G. Kokunko, A.S. Antipov, S.A. Krasnova (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow)

STATE OBSERVERS AS A MEANS FOR ESTIMATING DERIVATIVES OF DETERMINISTIC SIGNALS

To estimate the derivatives of a deterministic signal arriving in real time, a state observer is introduced, built as a replica of the virtual canonical model with an unknown bounded input. The results of a comparative analysis of observers with linear and piecewise linear corrective actions are presented, which are confirmed by the results of numerical modeling.

М. В. БАСИН
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург,
Autonomous University of Nuevo Leon San Nicolas de los Garza, Mexico)

О. А. СТЕПАНОВ, Ю. А. ЛИТВИНЕНКО
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

В. А. ВАСИЛЬЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург)

В. А. ТУПЫСЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», Санкт-Петербург)

АЛГОРИТМ ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ПРИ НАЛИЧИИ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ В УРАВНЕНИЯХ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ВЕКТОРА СОСТОЯНИЙ

Для решения задач оценивания при наличии нелинейностей полиномиального типа в уравнениях измерений и уравнениях динамики предлагается рекуррентный алгоритм калмановского типа. При этом оценка прогноза и коэффициент усиления в этом алгоритме на каждом шаге вычисляются исходя из предположения о гауссовском характере апостериорной плотности на предыдущем шаге путем минимизации матрицы ковариаций ошибок оценивания при обработке текущего измерения. Рассматривается методический пример, иллюстрирующий специфику алгоритма и его преимущества по сравнению с обобщенным фильтром Калмана.

Введение. При решении задач обработки измерительной информации с целью оценивания неизвестных параметров широко используется стохастический подход, основанный на байесовской теории фильтрации. При этом наибольшее применение получили методы линейной фильтрации [1–3]. Вместе с тем нередко возникает потребность решения нелинейных задач [4, 5]. Несмотря на значительный прогресс в развитии методов нелинейной фильтрации за последнее время, сохраняет актуальность проблема построения экономичных в вычислительном отношении алгоритмов, обеспечивающих точность, близкую к потенциальной и достигаемую с помощью оптимального алгоритма. Наибольшее применение получают алгоритмы калмановского типа, основанные на различных методах гауссовской аппроксимации апостериорной плотности, в частности такие алгоритмы, как обобщенный фильтр Калмана (ОФК), UKF, кубатурные фильтры и т.п. [6–11]. При разработке эффективных алгоритмов важен факт учета специфики решаемой задачи. В частности, в последнее время активно развиваются методы полиномиальной фильтрации [12–15]. В [15] получены такие алгоритмы в условиях, когда нелинейности полиномиального типа проявляются в уравнениях для измерений. В настоящем докладе исследуется специфика применения методов, рассмотренных в этих работах, в случае, когда нелинейность такого типа присутствует как в уравнениях для измерениях, так и в уравнениях динамики.

Постановка задачи фильтрации и ее общее решение. Рассмотрим задачу нелинейной дискретной фильтрации n-мерного случайного вектора $x_k = [x_{1k},...,x_{nk}]^T$, описываемого с помощью формирующего фильтра

$$x_k = f_k(x_{k-1}) + \Gamma_k w_k + u_k = \Phi_k^x x_{k-1} + \left(x_{k-1}^T \otimes I_n\right)\Phi_k^{xx} x_{k-1} + \Gamma_k w_k + u_k \quad (1)$$

по m-мерным измерениям следующего вида:

$$y_k = h_k(x_k) + v_k = H_k^0 + H_k^x x_k + \left(x_k^T \otimes I_m\right) H_k^{xx} x_k + v_k, \quad (2)$$

где $\Phi_k^{xx} = \left(\left\{\Phi_k^{xx}\right\}_1^T,...\left\{\Phi_k^{xx}\right\}_n^T\right)^T$, $H_k^{xx} = \left(\left\{H_k^{xx}\right\}_1^T,...\left\{H_k^{xx}\right\}_m^T\right)^T$ – блочные матрицы размерности $n^2 \times n$ и $mn \times n$; $u_k = [u_{1k},...,u_{nk}]^T$ – n-мерный вектор известных входных сигналов; x_0 – n-мерный слу-

чайный гауссовский вектор с ф.п.р.в. $p\left(x_0\right)=N\left(x_0;\overline{x}_0,P_0^x\right)$, здесь и далее обозначение $N\left(a;\overline{a},A\right)$ используется для плотности гауссовского случайного вектора a с математическим ожиданием $\overline{a}$ и матрицей ковариаций A; w_k – n_w-мерный центрированный дискретный гауссовский белый шум, не зависящий от x_0, с известными матрицами ковариаций Q_k размерности $n_w\times n_w$; Γ_k – известная матрица размерности $n\times n_{\tilde{w}}$; v_k – центрированный дискретный гауссовский белый шум, не зависящий от x_0 и w_k, с ковариационной матрицей R_k; $\otimes$ – символ произведения Кронекера для двух матриц, из определения которого следует, что

$$\left(x^T\otimes I_n\right)\Phi^{xx}x=\begin{bmatrix} x^T\left\{\Phi^{xx}\right\}_1 x \\ \cdot \\ \cdot \\ x^T\left\{\Phi^{xx}\right\}_n x \end{bmatrix}.$$

Специфика рассматриваемой нелинейной задачи заключается в том, что n - и m -мерные вектор-функции, описывающие уравнения динамики для вектора состояний и уравнения измерений, представляют собой полиномы второй степени относительно компонент вектора состояния в виде суммы линейных и квадратичных форм векторов x_{k-1} и x_k соответственно

Цель решения задачи фильтрации заключается в получении оптимальной в среднеквадратическом смысле оценки вектора состояний, т.е. оценки с минимальной дисперсией, определяемой в виде [5]

$$\hat{x}_k^{opt}\left(Y_k\right)=\int x_k\,p\left(x_k/Y_k\right)dx_k\,, \tag{3}$$

где $p\left(x_k/Y_k\right)$ – апостериорная (условная к измерениям $Y_k=\left(y_1^T,\ldots y_k^T\right)^T$) функция плотности распределения вероятности. Для этой плотности справедливы следующее рекуррентные соотношения:

$$p\left(x_k/Y_k\right)=\frac{p\left(y_k/x_k\right)p\left(x_k/Y_{k-1}\right)}{\int p\left(y_k/x_k\right)p\left(x_k/Y_{k-1}\right)dx_k},\quad p\left(x_k/Y_{k-1}\right)=\int p\left(x_k/x_{k-1}\right)p\left(x_{k-1}/Y_{k-1}\right)dx_{k-1}\,, \tag{4}$$

где $p\left(y_k/x_k\right)$ – функция правдоподобия; $p\left(x_k/Y_{k-1}\right)$ – плотность прогноза; $p\left(x_k/x_{k-1}\right)$ – переходная плотность. Принимая во внимание (1), (2) и сделанные предположения, можем записать:

$$p\left(y_k/x_k\right)=N\left(y_k;h_k(x_k),R_k\right),\quad p\left(x_k/x_{k-1}\right)=N\left(x_k;f_k\left(x_{k-1}\right)+u_k,\Gamma_k Q_k\left(\Gamma_k\right)^T\right).$$

Как отмечалось во введении, при нелинейном характере динамики случайной последовательности x_k и нелинейных изменениях возникает проблема построения экономичных в вычислительном отношении субоптимальных алгоритмов, которые обеспечивают получение как самой оценки $\hat{x}_k^{sub}\left(Y_k\right)$, незначительно отличающейся по точности от нелинейной оптимальной оценки, так и адекватной расчетной характеристик точности в виде матрицы ковариаций ошибок. Один из таких алгоритмов и рассматривается далее.

Описание алгоритма. В настоящей работе для решения сформулированной задачи предлагается рекуррентный алгоритм калмановского типа, основанный на предположении о гауссовском характере апостериорной плотности на предыдущем шаге, т.е. представлении ее в виде $p\left(x_{k-1}/Y_{k-1}\right)\approx N\left(x_{k-1};\hat{x}_{k-1}^{PF},P_{k-1}^{PF}\right)$ и идеологии построения линейного оптимального алгоритма при обработке текущего измерения [16–18]. Согласно этой идеологии рассматривается составной вектор, включающий векторы x_k и y_k, удовлетворяющие (1) и (2), и с их использованием и использованием $p\left(x_{k-1}/Y_{k-1}\right)\approx N\left(x_{k-1};\hat{x}_{k-1}^{PF},P_{k-1}^{PF}\right)$ отыскиваются математическое ожидание и матрица ковариаций вектора x_k при условии, что зафиксирован вектор Y_k. В этом случае мо-

гут быть получены параметры гауссовской аппроксимации плотности прогноза $p\left(x_{k/k-1}/Y_{k-1}\right) \approx N\left(x_{k/k-1}; \hat{x}^{PF}_{k/k-1}, P^{PF}_{k/k-1}\right)$ и выражения для оценки и расчетной матрицы ковариаций ее ошибки на текущем шаге. С использованием результатов упомянутых работ можно показать, что эти отношения принимают следующий вид:

$$\hat{x}^{PF}_{k/k\text{-}1} = \Phi^{x}_{k}\hat{x}^{PF}_{k\text{-}1} + \left(\left(\hat{x}^{PF}_{k\text{-}1}\right)^{T} \otimes I_{n}\right)\Phi^{xx}_{k}\hat{x}^{PF}_{k\text{-}1} + Tr_{n\times 1}\left(\Phi^{xx}_{k}P^{PF}_{k\text{-}1}\right) + u_{k},\ \hat{x}^{PF}_{0} = E\left(x_{0}\right), \tag{5}$$

$$\begin{aligned} P^{PF}_{k/k-1} &= 2Tr_{n\times n}\left(\Phi^{xx}_{k}P^{PF}_{k-1}\left(\Phi^{xx}_{k}P^{PF}_{k-1}\right)^{T}\right) + 4\left(\left(\hat{x}^{PF}_{k-1}\right)^{T} \otimes I_{n}\right)\Phi^{xx}_{k}P^{PF}_{k-1}\left(\Phi^{xx}_{k}\right)^{T}\left(\hat{x}^{PF}_{k-1} \otimes I_{n}\right) + \\ &+ 2\left(\left(\hat{x}^{PF}_{k-1}\right)^{T} \otimes I_{n}\right)\Phi^{xx}_{k}P^{PF}_{k-1}\left(\Phi^{x}_{k}\right)^{T} + 2\Phi^{x}_{k}P^{PF}_{k-1}\left(\Phi^{xx}_{k}\right)^{T}\left(\hat{x}^{PF}_{k-1} \otimes I_{n}\right) + \Phi^{x}_{k}P^{PF}_{k-1}\left(\Phi^{x}_{k}\right)^{T} + \Gamma_{k}Q_{k}\Gamma^{T}_{k}, \quad P^{PF}_{0} = P_{0}, \end{aligned} \tag{6}$$

$$\hat{x}^{PF}_{k}\left(Y_{k}\right) = \hat{x}^{PF}_{k/k-1} + K_{k/k-1}\left(y_{k} - \hat{y}_{k/k-1}\right), \tag{7}$$

$$P^{PF}_{k} = P^{PF}_{k/k-1} - K^{PF}_{k/k-1}\left(P^{PF}_{x_k y_k}\right)^{T}, \tag{8}$$

$$K^{PF}_{k/k-1} = P^{PF}_{x_k y_k}\left(P^{PF}_{y_k}\right)^{-1}, \tag{9}$$

где

$$\hat{y}^{PF}_{k/k-1} = H^{0}_{k} + H^{x}_{k}\hat{x}^{PF}_{k/k\text{-}1} + \left(\left(\hat{x}^{PF}_{k/k\text{-}1}\right)^{T} \otimes I_{m}\right)H^{xx}_{k}\hat{x}^{PF}_{k/k\text{-}1} + Tr_{m\times 1}\left(H^{xx}_{k}P^{PF}_{k/k-1}\right), \tag{10}$$

$$P^{PF}_{x_k y_k} = 2P^{PF}_{k/k-1}\left(H^{xx}_{k}\right)^{T}\left(\left(\hat{x}^{PF}_{k/k\text{-}1}\right)^{T} \otimes I_{m}\right)^{T} + P^{PF}_{k/k-1}\left(H^{x}_{k}\right)^{T}, \tag{11}$$

$$\begin{aligned} P^{PF}_{y_k} &= R_{k} + 2Tr_{m\times m}\left(H^{xx}_{k}P^{PF}_{k/k-1}\left(H^{xx}_{k}P^{PF}_{k/k-1}\right)^{T}\right) + 4\left(\left(\hat{x}^{PF}_{k/k\text{-}1}\right)^{T} \otimes I_{m}\right)H^{xx}_{k}P^{PF}_{k/k-1}\left(H^{xx}_{k}\right)^{T}\left(\hat{x}^{PF}_{k/k\text{-}1} \otimes I_{m}\right) + \\ &+ 2\left(\left(\hat{x}^{PF}_{k/k\text{-}1}\right)^{T} \otimes I_{m}\right)H^{xx}_{k}P^{PF}_{k/k-1}\left(H^{x}_{k}\right)^{T} + 2H^{x}_{k}P^{PF}_{k/k-1}\left(H^{xx}_{k}\right)^{T}\left(\hat{x}^{PF}_{k/k\text{-}1} \otimes I_{m}\right) + H^{x}_{k}P^{PF}_{k/k-1}\left(H^{x}_{k}\right)^{T}. \end{aligned} \tag{12}$$

Используемый в этих выражениях оператор $Tr_{a\times b} : R^{n\cdot a\times n\cdot b} \to R^{a\times b}$ переводит матрицу $n\cdot a \times n\cdot b$

$$M = \begin{pmatrix} M_{1,1} & \ldots & M_{1,b} \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ M_{a,1} & \ldots & M_{a,b} \end{pmatrix}$$ в матрицу $$Tr_{a\times b}\left(M\right) = \begin{pmatrix} tr\left(M_{1,1}\right) & \ldots & tr\left(M_{1,b}\right) \\ \ldots & \ldots & \ldots \\ tr\left(M_{a,1}\right) & \ldots & tr\left(M_{a,b}\right) \end{pmatrix}$$ размерности $a\times b$,

где $M_{i,j}$, $i = 1,\ldots,a;\ j = 1,\ldots,b$ – матрицы размерности $n \times n$.

Таким образом, алгоритм полиномиальной фильтрации сводится к реализации соотношений (5)–(12). Обращаем внимание, что, несмотря на тот факт, что на каждом шаге алгоритм вычисления оценки линейным образом зависит от текущих измерений, в целом алгоритм является нелинейным. Это объясняется тем, что получающаяся в результате матрица ковариаций ошибки оценки на текущем шаге, используемая в дальнейших вычислениях, зависит от оценки прогноза, которая естественным образом зависит от измерений, полученных на предыдущих шагах.

Пример. В докладе обсуждается эффективность применения предложенного алгоритма для решения ряда конкретных прикладных задач, связанных с обработкой навигационной информации. Здесь же с целью конкретизации полученных соотношений рассмотрим лишь методический пример, полагая все используемые величины безразмерными.

Требуется решить задачу оценивания вектора состояния

$$\begin{aligned} x_{1k} &= x_{1k-1} - ax_{1k-1}x_{2k-1} + aw_{k}, \\ x_{2k} &= x_{2k-1}, \end{aligned} \qquad x_{0} \in N\left(x_{0}; \begin{bmatrix} \overline{x}_{10} \\ \overline{x}_{20} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_{1}^{2} & 0 \\ 0 & \sigma_{2}^{2} \end{bmatrix}\right)$$

по измерениям

$$y_{k} = x_{1k} + bx_{1k-1}x_{2k-1} + v_{k},$$

где a и b – известные коэффициенты.

В этих соотношениях w_k, v_k, – независимые между собой и от x_0 центрированные дискретные гауссовские белые шумы с дисперсиями σ_w^2 и σ_v^2.

Матрицы, входящие в модель (1), (2), для этого примера примут вид:

$$\Phi_k^x = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},\ \Phi_k^{xx} = \left(\left\{ \Phi_k^{xx} \right\}_1^T, \left\{ \Phi_k^{xx} \right\}_2^T \right)^T,\ \left\{ \Phi_k^{xx} \right\}_1 = \begin{pmatrix} 0 & -0.5a \\ -0.5a & 0 \end{pmatrix}, \left\{ \Phi_k^{xx} \right\}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$H_k^x = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix},\ H_k^{xx} = \left(\left\{ H_k^{xx} \right\}_1^T \right)^T = \begin{pmatrix} 0 & 0.5b \\ 0.5b & 0 \end{pmatrix}, Q_k = \frac{\sigma_w^2}{a},\ \Gamma_k = \begin{pmatrix} \Delta t \\ 0 \end{pmatrix},\ P_0 = diag\left(\sigma_1^2, \sigma_2^2 \right).$$

В результате выражения (5)–(7) и (10)–(12) для предлагаемого алгоритма могут быть записаны как:

$$\hat{x}_{k/k\text{-}1}^{PF} = \hat{x}_{k\text{-}1}^{PF} + \begin{pmatrix} -\hat{x}_{1k\text{-}1}^{PF} \hat{x}_{2k\text{-}1}^{PF} \\ 0 \end{pmatrix} a - \underbrace{\begin{pmatrix} P_{21k-1}^{PF} \\ 0 \end{pmatrix} a,} \tag{13}$$

$$P_{k/k-1}^{PF} = \underbrace{\begin{pmatrix} \left(P_{12k-1}^{PF} \right)^2 + P_{1k-1}^{PF} P_{2k-1}^{PF} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} a^2} + \begin{pmatrix} P_{1k-1}^{PF} \left(\hat{x}_{2k-1}^{PF} \right)^2 + 2P_{12k-1}^{PF} \hat{x}_{1k-1}^{PF} \hat{x}_{2k-1}^{PF} + P_{2k-1}^{PF} \left(\hat{x}_{1k-1}^{PF} \right)^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} a^2 - \tag{14}$$

$$- \begin{pmatrix} 2P_{1k-1}^{PF} \hat{x}_{2k-1}^{PF} + 2P_{12k-1}^{PF} \hat{x}_{1k-1}^{PF} & P_{12k-1}^{PF} \hat{x}_{2k-1}^{PF} + P_{2k-1}^{PF} \hat{x}_{1k-1}^{PF} \\ P_{12k-1}^{PF} \hat{x}_{2k-1}^{PF} + P_{2k-1}^{PF} \hat{x}_{1k-1}^{PF} & 0 \end{pmatrix} a + P_{k-1}^{PF} + \begin{pmatrix} \sigma_\xi^2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} a^2,$$

$$P_{x_k y_k} = bP_{k/k-1}^{PF} \begin{pmatrix} \hat{x}_{2k/k-1}^{PF} \\ \hat{x}_{1k/k-1}^{PF} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} P_{1k/k-1}^{PF} \\ P_{12k/k-1}^{PF} \end{pmatrix}, \tag{15}$$

$$P_{y_k} = \sigma_v^2 + P_{1k/k-1}^{PF} + \underbrace{b^2 \left[\left(P_{12k/k-1}^{PF} \right)^2 + P_{1k/k-1}^{PF} P_{2k/k-1}^{PF} \right]} + 2P_{12k/k-1}^{PF} b\hat{x}_{1k/k\text{-}1}^{PF} \left(b\hat{x}_{2k/k\text{-}1}^{PF} + 1 \right) + \tag{16}$$

$$+ P_{1k/k-1}^{PF} b\hat{x}_{2k/k\text{-}1}^{PF} \left(b\hat{x}_{2k/k\text{-}1}^{PF} + 2 \right) + P_{2k/k-1}^{PF} \left(b\hat{x}_{1k/k\text{-}1}^{PF} \right)^2,$$

$$\hat{y}_{k/k-1} = \hat{x}_{1k/k\text{-}1}^{PF} + b\hat{x}_{1k/k\text{-}1}^{PF} \hat{x}_{2k/k\text{-}1}^{PF} + \underbrace{bP_{12k/k-1}^{PF}}. \tag{17}$$

Используя эти соотношения, нетрудно конкретизировать выражения для оценки (7) и матрицы ковариаций (8) для текущего шага. Проведем сопоставление описанного выше алгоритма с обобщенным фильтром Калмана. Нетрудно показать, что в рассматриваемом примере соотношения для ОФК имеют вид, аналогичный соотношениям (3)–(17), но при этом в них будут отсутствовать слагаемые, отмеченные нижними фигурными скобками. Наличие этих слагаемых в соотношениях для предлагаемого алгоритма объясняется тем фактом, что при вычислении оценок и соответствующих им матриц ковариаций в этом алгоритме используются более точные соотношения, чем в ОФК. В частности, в уравнениях прогноза для оценок и измерений в (3) и (15) имеются слагаемые, учитывающие взаимную корреляцию оцениваемых компонент вектора состояния.

Для сравнения алгоритмов и оценки их эффективности при решении рассматриваемой задачи было проведено ее моделирование. В ходе моделирования рассчитывались значения действительных и расчетных среднеквадратических ошибок (СКО) оценивания, вычисляемых с использованием сопоставляемых алгоритмов, по аналогии с тем, как это описано, например, в [15]. Результаты расчетов приведены на рис. 1. При этом фиолетовая (расчетная) и синяя (действительная) кривые соответствуют оптимальному алгоритму, реализуемому с использованием фильтра частиц [4] (количество частиц – 500); красная (расчетная) и зеленая (действительная) кривые соответствуют предлагаемому алгоритму; фиолетовая прерывистая (расчетная) и синяя (действительная) прерывистая – ОФК. Осреднение проводилось по 100 реализациям.

При моделировании были приняты следующие значения: $\overline{x}_{10} = 2.5$, $\overline{x}_{20} = 0.6$, $a = 0.1$, $b = 1$, $\sigma_1^2 = 4$, $\sigma_2^2 = 0.04$, $Q_k = \sigma_w^2 = 0.01$, $R_k = \sigma_v^2 = 0.01$. Число шагов принималось равным 300.

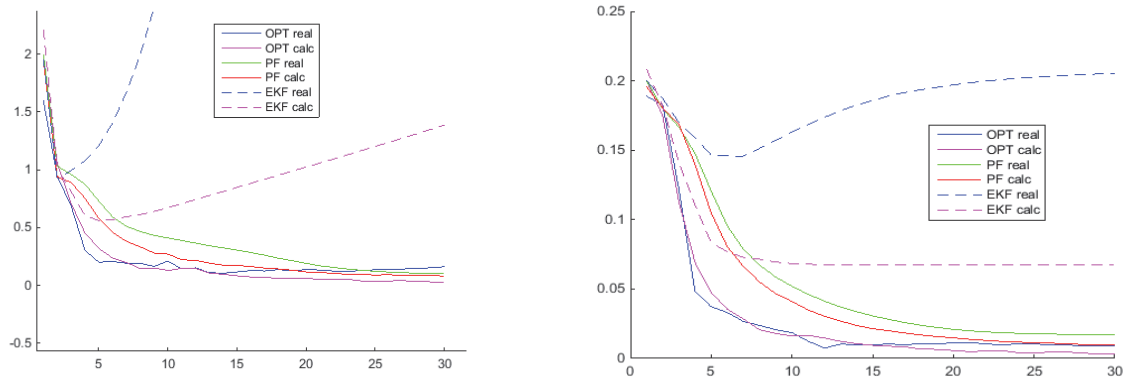


Рис. 1. Действительные и расчетные среднеквадратические ошибки оценивания точности x_1 и x_2 оценивания для различных алгоритмов

Из представленных результатов следует, что в рассматриваемом примере предложенный алгоритм обеспечивает точность, близкую к точности оптимального алгоритма и, кроме того, вырабатываемая в нем расчетная матрица ковариаций согласована с действительной матрицей ковариаций. При этом традиционный ОФК по сути расходится и не позволяет выработать адекватную характеристику точности.

Работа проведена при поддержке гранта РФФИ №18-08-01261А.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Brown, R.G., Hwang, P.Y.C.** Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering (Wiley, 2012, 4st edn.).
2. **Grewal, M.S. and Andrews, A.P.,** (1993) Kalman Filtering: Theory and Practice. Prentice Hall, New Jersey.
3. **Степанов О.А.** Методы обработки навигационной измерительной информации. Санкт-Петербург 2017, 196 с.
4. **Doucet, A., Freitas, N., Gordon, N.** Sequential Monte Carlo Methods in Practice, New York, NY, Springer New York, 2001, 590 p.
5. **Särkkä, S**., Bayesian Filtering and Smoothing, Cambridge University Press, 2013.
6. **Julier, S.J., Uhlmann, J.K.,** Unscented filtering and nonlinear estimation, Proceedings of the IEEE, vol. 92(3), pp. 401–422, 2004.
7. **Arasaratnam, S.H.,** Cubature Kalman filters, IEEE Transactions on Automatic Control, 54(6), (2009), pp. 1254–1269.
8. **Zhang, F., Xue, W.F., Liu, X.,** Overview of Nonlinear Bayesian Filtering Algorithm, Procedia Engineering, 15, 2011, pp. 489–495.
9. **Stano, P., Lendek, Z., Braaksma, J., Babuska, R., de Keizer, C., den Dekker, A.J.**, Parametric Bayesian filters for nonlinear stochastic dynamical systems: A survey, IEEE Trans. Cybernetics, vol. 43, no. 6, 2013, pp. 1607–1624.
10. **Afshari, H.H., Gadsden, S.A., Habibi, S.,** Gaussian filters for parameter and state estimation: A general review of theory and recent trends, Signal Processing, 2017, vol. 135, pp. 218–238.
11. **Kulikov, G.Yu., Kulikova M.V.,** A Comparative Study of Kalman-like Filters for State Estimation of Turning Aircraft in Presence of Glint Noise, Proceedings of IFAC-V 2020, Germany.
12. **Basin, M. and Hernandez-Gonzalez, M.,** Discrete-time filtering for nonlinear polynomial systems over linear observations, International Journal of Systems Science, 2014, vol. 45(7), pp. 1461–1472.
13. **Басин М.В.** Среднеквадратическая фильтрация состояния полиномиальных стохастических систем с мультипликативным шумом. Автоматика и телемеханика. 2016. № 2. С. 69–93.
14. **Hernandez-Gonzalez, M., Basin, M., and Stepanov, O.A.,** Discrete-time state estimation for stochastic polynomial systems over polynomial observations, International Journal of General Systems, 2018, vol. 47(5), pp. 512–528.
15. **Stepanov, O.A., Vasiliev, V.A., Toropov, A.B., Loparev, A.V., Basin, M.V.,** Efficiency analysis of a filtering algorithm for discrete-time linear stochastic systems with polynomial measurement, Journal of the Franklin Institute, 2019, vol. 356, pp. 5573–5591.
16. **Zhankue Zhao, Rong, X., Vesselin Li, 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.
17. **Степанов О.А.** Линейный оптимальный алгоритм в нелинейных задачах обработки навигационной информации // Гироскопия и навигация. 2006. № 4 (55). С. 11–20.
18. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Сравнительное исследование линейного и нелинейного оптимальных алгоритмов в задачах обработки навигационной информации // Гироскопия и навигация. 2010. № 3 (70). С. 24–36.

M.V. Basin (ITMO University, Saint-Petersburg, Autonomous University of Nuevo Leon San Nicolas de los Garza, Mexico), O.A Stepanov, Yu.A. Litvinenko (ITMO University, CSRI Elektropribor, Saint-Petersburg), V.A. Vasiliev, V.A. Tupusev (CSRI Elektropribor, Saint-Petersburg)

POLYNOMIAL FILTERING ALGORITHM IN THE PRESENCE OF NONLINEARITIES IN THE EQUATIONS FOR MEASUREMENTS AND THE STATE VECTOR

To solve estimation problems in the presence of polynomial-type nonlinearities in the measurement equations and the dynamics equations describing the state vector, a recurrent Kalman-type algorithm is proposed. The prediction estimate and the gain in this algorithm at each step are calculated based on the assumption of the Gaussian nature of the posterior density at the previous step by minimizing the covariance matrix of the estimation errors when processing the current measurement.

A methodological example is considered that illustrates the algorithm specifics and its advantages over the extended Kalman filter.

К. А. РЫБАКОВ
(Московский авиационный институт, Москва)

ПРИМЕНЕНИЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ РАЗЛОЖЕНИЙ СЛУЧАЙНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕПРЕРЫВНОМ ФИЛЬТРЕ ЧАСТИЦ

Представлен алгоритм оценивания траекторий линейной стохастической системы с полиномиальным измерителем, сформированный с помощью спектральной формы математического описания, в основе которой лежит представление функций ортогональными разложениями, и фильтра частиц. Время предполагается непрерывным как в исходных моделях динамической системы и измерителя, так и для приближенной оценки. Цель работы состоит в построении фильтра частиц без дискретизации времени. Полученные результаты могут найти применение в задачах полиномиальной фильтрации, сглаживания и прогнозирования.

Введение. В работе рассматривается применение ортогональных разложений случайных процессов для решения задачи оценивания траекторий линейной стохастической системы с непрерывным временем. В качестве математического аппарата используется спектральный метод, или спектральная форма математического описания сигналов и систем управления – одна из форм математического описания наряду с описанием дифференциальными уравнениями, переходными и передаточными функциями [1].

В настоящее время для решения задач оценивания (в основном задачи фильтрации) часто применяют фильтры частиц, основанные на непосредственном моделировании динамической системы, траектории которой подлежат оцениванию [2–4]. По известной математической модели динамической системы может быть получен ансамбль траекторий, или выборка состояний при фиксированном времени. Имеющиеся измерения, а также известная математическая модель измерителя позволяют сопоставить состояниям, полученным в результате моделирования, веса. В свою очередь, они показывают, насколько близко смоделированное состояние к искомой оценке. Пары «состояние + вес» называют частицами, по ним можно оценить различные статистические характеристики состояния системы по имеющимся измерениям: моменты, функцию распределения, плотность распределения, моду и т.д. Наиболее часто используют дискретные фильтры частиц, это обусловлено скорее тем, что многие задачи оценивания изначально формулируются в дискретной постановке [2, 5, 6]. Реже применяют непрерывные фильтры частиц, но они подразумевают, как правило, дискретизацию времени [7–10]. И с учетом дискретизации они мало чем отличаются от дискретных фильтров частиц.

Основная цель работы – продемонстрировать возможность построения фильтра частиц без дискретизации времени. Такой фильтр может быть построен с помощью применения ортогональных разложений случайных процессов [11], например, для линейных динамических систем с полиномиальным измерителем [12]. Подобные модели динамических систем и измерителей применяются в задачах оценивания при обработке навигационной информации по данным карт геофизических полей [13, 14].

Применение ортогональных разложений в задачах оценивания. Математическая модель динамической системы, траектории которой подлежат оцениванию, описывается линейным стохастическим дифференциальным уравнением с аддитивным или мультипликативным шумом либо системой таких уравнений. Измеритель описывается нелинейным стохастическим дифференциальным уравнением с аддитивным шумом, нелинейность задается полиномом произвольной степени.

Случайный процесс, траектории которого нужно оценить по результатам измерений, при определенных условиях (существование второго момента и его непрерывность) может быть представлен разложением по собственным функциям его ковариационного оператора [15] или каноническим разложением [16]. Собственные функции ковариационного оператора образуют ортонормированный базис пространства квадратично интегрируемых функций и, в свою очередь, могут быть представлены в виде ортогональных разложений по произвольному ортонормированному базису. Это дает возможность использовать универсальные ортонормированные

базисы, например полиномы Лежандра, тригонометрические функции, функции Уолша и Хаара, представляя с их помощью решения линейных стохастических дифференциальных уравнений и систем [11, 12].

Применение спектральной формы математического описания предполагает, что решениям стохастических дифференциальных уравнений ставятся в соответствие спектральные характеристики – бесконечные матрицы-столбцы, образованные упорядоченными коэффициентами разложения, которые являются случайными величинами. Процедура поиска решения сводится к операциям матричной алгебры (сложению, умножению и обращению бесконечных матриц – спектральных характеристик линейных операторов). При приближенном решении бесконечные матрицы и матрицы-столбцы усекаются до некоторого выбранного порядка, а соответствующие случайные процессы приближенно представляются линейными комбинациями базисных функций со случайными коэффициентами, причем такое представление сохраняет непрерывность времени в отличие от применения численных методов решения стохастических дифференциальных уравнений. В частности, были получены и исследованы приближения к таким случайным процессам, как винеровский процесс (броуновское движение), процесс Орнштейна–Уленбека (экспоненциально коррелированный случайный процесс), броуновский мост и геометрическое броуновское движение [17], при этом использовались универсальные ортонормированные базисы, перечисленные выше.

Эти результаты легли в основу построения фильтра частиц без дискретизации времени. При расчете весов в непрерывном фильтре частиц используется формула, включающая скалярные произведения реализаций случайных процессов. Спектральное преобразование сохраняет скалярное произведение, т.е. скалярное произведение в пространстве квадратично интегрируемых функций сводится к скалярному произведению соответствующих спектральных характеристик в пространстве квадратично суммируемых последовательностей. Использование специальной спектральной характеристики, представляемой бесконечной пространственной матрицей, позволяет рассматривать преобразование случайных процессов в измерителе с помощью полинома произвольной степени. Такой подход обеспечивает возможность решать задачи фильтрации, сглаживания и прогнозирования.

Предполагается, что задача оценивания решается на фиксированном промежутке времени, известна спектральная характеристика измерений на этом промежутке. Алгоритм оценивания включает моделирование реализаций спектральной характеристики случайного процесса, траектории которого требуется оценить, и вычисление соответствующих весов. Оценка траектории получается сразу на всем заданном промежутке времени, она зависит от момента времени, до которого учитываются измерения. Оценка в этот момент времени дает решение задачи фильтрации, при меньших или больших значениях времени – решения задач сглаживания и прогнозирования соответственно.

Алгоритм оценивания траекторий линейной стохастической системы с полиномиальным измерителем с применением ортогональных разложений случайных процессов на основе спектральной формы математического описания сигналов и систем управления реализован в системе компьютерной математики Mathcad как часть программного обеспечения оптимального оценивания состояний стохастических динамических систем [18]. Апробация алгоритма проведена на примере оценивания траекторий процесса Орнштейна–Уленбека, измеритель задавался полиномом первой, второй и третьей степени.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Солодовников В.В., Семенов В.В., Пешель М., Недо Д.** Расчет систем управления на ЦВМ: спектральный и интерполяционный методы. М.: Машиностроение, 1979.
2. **Степанов О.А., Торопов А.Б.** Применение последовательных методов Монте-Карло с использованием процедур аналитического интегрирования при обработке навигационной информации // XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014). Москва, 16–19 июня 2014 г.: Тр. М.: ИПУ РАН, 2014. С. 3324–3337.
3. **Doucet, A., Freitas, N. de, Gordon, N.** (eds.), Sequential Monte Carlo Methods in Practice, Springer, 2001.
4. **Cappé, O., Godsill, S.J., Moulines, E.,** An overview of existing methods and recent advances in sequential Monte Carlo, *Proc. IEEE*, 2007, vol. 95, no.5, pp. 899–924.
5. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Том 1. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2017.

6. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации: Том 2. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2017.
7. **Bain, A., Crisan, D.,** Fundamentals of Stochastic Filtering. Springer, 2009.
8. **Рыбаков К.А., Ющенко А.А.** Непрерывные фильтры частиц и их реализация в реальном масштабе времени // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2018. № 3. С. 56–64.
9. **Косачев И.М., Чугай К.Н., Рыбаков К.А.** Методология высокоточной нелинейной фильтрации случайных процессов в стохастических динамических системах с фиксированной структурой. Часть 1 // Труды МАИ. 2019. № 105.
10. **Косачев И.М., Чугай К.Н., Рыбаков К.А.** Методология высокоточной нелинейной фильтрации случайных процессов в стохастических динамических системах с фиксированной структурой. Часть 2 // Труды МАИ. 2019. № 106.
11. **Рыбаков К.А.** Моделирование и анализ выходных процессов линейных непрерывных стохастических систем на основе ортогональных разложений случайных функций // Известия РАН. Теория и системы управления. 2020. № 3. С. 14–29.
12. **Rybakov, K.A.,** Spectral method of analysis and optimal estimation in linear stochastic systems, *International Journal of Modeling, Simulation, and Scientific Computing*, 2020, vol. 11, no. 3. Id 2050022.
13. **Stepanov, O.A., Vasiliev, V.A., Toropov, A.B., Loparev, A.V., Basin, M.V.,** Efficiency analysis of a filtering algorithm for discrete-time linear stochastic systems with polynomial measurements, *Journal of Franklin Institute*, 2019, vol. 356, no. 10, pp. 5573–5591.
14. **Tupysev, V.A., Litvinenko, Yu.A.,** Application of polynomial-type filters to integrated navigation systems with modular architecture, *Proc. 26th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems (ICINS)*, IEEE, 2019, pp. 1–4.
15. **Гихман И.И., Скороход А.В., Ядренко М.И.** Теория вероятностей и математическая статистика. Киев: Вища школа, 1988.
16. **Синицын И.Н.** Канонические представления случайных функций и их применение в задачах компьютерной поддержки научных исследований. М.: Торус Пресс, 2009.
17. **Рыбаков К.А.** Моделирование линейных нестационарных стохастических систем спектральным методом // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2020. № 3. С. 98–128.
18. **Кудрявцева И.А., Руденко Е.А., Рыбаков К.А.** Программное обеспечение оптимального оценивания состояний стохастических динамических систем // Информационные и телекоммуникационные технологии. 2019. № 43. С. 23–28.

K.A. Rybakov (Moscow aviation institute, Moscow)

APPLYING ORTHOGONAL EXPANSIONS OF RANDOM PROCESSES IN CONTINUOUS-TIME PARTICLE FILTER

An algorithm using both the spectral form of mathematical description based on the representation of functions by orthogonal expansions and the particle filter is presented for estimating trajectories of a linear stochastic system with polynomial measurements. The time is assumed to be a continuous variable in the dynamical system model, in the measurements model, and for the approximate estimate. The purpose of this work is to form the particle filter without time discretization. The obtained results can be used in problems of polynomial filtering, smoothing, and prediction.

И. Б. ФУРТАТ
(ИПМаш РАН, Санкт-Петербург)

П. А. ГУЩИН
(Губкинский университет, Москва)

НАБЛЮДАТЕЛИ ВОЗМУЩЕНИЙ И ПОМЕХ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С СЕКТОРНОЙ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ

Разработаны наблюдатели возмущений и помех измерения для динамических систем с секторной нелинейностью и параметрической неопределенностью. Предложены условия существования данных наблюдателей в виде разрешимости линейных матричных неравенств. С использованием наблюдателей возмущений и помех измерения разработан закон управления, обеспечивающий стабилизации объекта. Алгоритм экспериментально испытан на стенде по управлению сетью электрических генераторов.

Введение. Задача управления в условиях возмущений и помех измерения усложняется, если доступен измерению только выходной сигнал объекта, а не вектор состояния. На сегодняшний день предложено достаточно много решений в данной области. Часть работ посвящена использованию различного рода линейных [1] и нелинейных [2, 3] фильтров для выделения или подавления сигналов с определенными частотами. В ряде других работ синтез систем управления основан на использовании фильтра Калмана для оценки вектора состояния объекта в условиях шумов [4–6]. В данной статье особый интерес вызывает алгоритм [7]. В [7] решена задача управления в условиях возмущений и помех измерения при более общих условиях для параметров модели, чем в [1–3]. В [8] предложен алгоритм управления, позволяющий преодолеть данные проблемы. Однако алгоритм [8] разработан для линейных объектов с измеряемым вектором состояния и скалярным управлением. Настоящая статья посвящена обобщению результата [8] на нелинейные объекты с векторными входными и выходными воздействиями, когда не доступен измерению вектор состояния.

В представленной статье рассматривается нелинейный объект управления с векторными входными и выходными сигналами. Измерению доступен сигнал, равный сумме выхода объекта и помехи измерения, размерности которых совпадают, а источники помехи измерения и возмущения независимы. Параметрические и внешние возмущения могут присутствовать в любом уравнении модели объекта. Получено условие расчета параметров алгоритма в виде разрешимости линейного матричного неравенства (ЛМН).

В статье будут использованы следующие *обозначения*: R – множество действительных чисел; I_l – единичная матрица порядка l; $\widetilde{I}$ – матрица размерности $(m-1)\times m$, полученная из единичной матрицы порядка m путем вычеркивания i-й строки; $\mathrm{O}_{n\times l}$ – нулевая матрица размерности $n\times l$; A^{+} – псевдообратная матрица к A; $E_j=[0,...,0,1,0,...,0]^{\mathrm{T}}$ – вектор соответствующей размерности, у которого j-я компонента равна 1, а остальные – нулю; $|\cdot|$ и $\|\cdot\|$ означают евклидову норму вектора и согласованную с ней норму матрицы соответственно.

Постановка задачи. Рассмотрим объект управления, модель которого описывается уравнениями

$$\dot{x}(t)=Ax(t)+Bu(t)+D\big(\psi(x)+c_0u(t)+\varphi(t)\big),\quad y(t)=Lx(t), \tag{1}$$

$$z(t)=y(t)+\xi(t), \tag{2}$$

где $x(t)=[x_1(t), x_2(t), ..., x_n(t)]^{\mathrm{T}}$ – вектор состояния, $u(t)\in R^l$ – сигнал управления, $y(t)\in R^m$ – выходной сигнал объекта недоступный измерению ($m\geq 2$), $z(t)\in R^m$ – сигнал доступный измерению, $\xi(t)=[\xi_1(t), \ldots, \xi_m(t)]^{\mathrm{T}}$ – ограниченная помеха измерения. Неизвестные функции $\psi(x)\in R^l$ и $\varphi(x,t)\in R^l$ удовлетворяют следующим условиям: $\varphi(t)$ – ограниченная функция, $\big|\dot{\varphi}(t)\big|\leq\chi_1$, $\big|\psi(x)\big|\leq\alpha_1|x|$ и $\left\|\dfrac{\partial\psi(x)}{\partial x}\right\|\leq\alpha_2$, $\chi_1>0$, $\alpha_1>0$ и $\alpha_2>0$. Матрицы $A\in R^{n\times n}$, $B\in R^{n\times l}$, $D\in R^{n\times l}$ и $L\in R^{m\times n}$

известны, причем A – гурвицева, $(LD)^+(LD) = I_l$, $(LD)^+(LB) = kI_l$, $k \in R$. Неизвестный коэффициент c_0 принадлежит известному отрезку, а именно $c_0 \in [c_{\min}, c_{\max}]$, причем $c_{\min} + k > 0$.

Выполнение условий $(LD)^+(LD) = I_l$, $(LD)^+(LB) = kI_l$ потребуется в доказательстве утверждения 1 для формирования скалярного дифференциального оператора. Данный оператор позволит для объекта (1) с векторным входом и векторным выходом сформировать требуемую модель замкнутой системы и затем получить линейное матричное неравенство. Также из доказательства утверждения 1 будет видно, что выполнение условия $c_{\min} + k > 0$ позволит обеспечить ограниченность сигнала управления. С практической точки зрения условие $c_{\min} + k > 0$ равносильно обеспечению отрицательной обратной связи в замкнутой системе.

Предположим, что существует i-я компонента вектора $\xi(t)$, для которой выполнено следующее соотношение:

$$\limsup_{t\to\infty\ t\geq 0} \xi_i(t) < \limsup_{t\to\infty\ t\geq 0} \xi_g(t), \tag{3}$$

где $i \in \{1, ..., m\}$ и $g \in \{1, ..., i-1, i+1, ..., m\}$.

Поясним необходимость выполнения условия (3). Для одновременной компенсации независимых возмущений и помех измерения требуется минимум два независимых измерения выходного сигнала объекта. Пусть *априори* известно, что предельное значение i-й компоненты вектора ξ меньше, чем предельные значения остальных. Тогда сначала оценивается сигнал $\widetilde{\xi} = [\xi_1, ..., \xi_{i-1}, \xi_{i+1}, ..., \xi_m]^{\mathrm{T}}$, который является частью помехи измерения ξ без i-й компоненты. Как будет показано в конце следующего раздела, от значения i-й компоненты вектора ξ будет зависеть точность оценки вектора $\widetilde{\xi}$, поэтому и требуется выполнение условия (3). Далее, зная оценку вектора $\widetilde{\xi}$, строится оценка истинного выходного сигнала объекта и формируется оценка возмущения, которая затем компенсируется.

Дополнительно предположим, что $\dot{\xi}_i(t)$ – ограниченный сигнал, и обозначим $|\xi_i(t)| \leq \chi_2$ и $|\dot{\xi}_i(t)| \leq \chi_3$, где χ_2 и χ_3 – положительные константы.

Требуется разработать алгоритм управления, который обеспечит выполнение целевого условия

$$\limsup_{t\to\infty\ t\geq 0} |y(t)| \leq \delta, \tag{4}$$

где значение $\delta > 0$ будет определено в утверждении 1.

Основной результат. Рассмотрим систему управления, состоящую из:

- алгоритма оценки вектора $\widetilde{\xi}(t)$ (наблюдатель помехи измерения)

$$\hat{\xi}(t) = \int_0^t \left[\widetilde{A}\,\hat{\xi}(s) - \widetilde{A}_1 z(s)\right] ds + \widetilde{z}(t), \qquad \widetilde{z}(t) = \widetilde{I}Lx(t) + \widetilde{\xi}(t), \tag{5}$$

  где $\hat{\xi}(t)$ – вектор оценки сигнала $\widetilde{\xi}(t)$, $\widetilde{A} = \widetilde{I}LAL^+\widetilde{E}$, $\widetilde{A}_1 = \widetilde{I}LAL^+$;

- закона управления (содержащий оценку возмущения)

$$u(t) = -\frac{1}{\mu}(LD)^+\left[\hat{y}(t) - LAL^+\int_0^t \hat{y}(s)ds - \theta\right], \qquad \hat{y}(t) = z(t) - \widetilde{E}\hat{\xi}(t). \tag{6}$$

Утверждение. Рассмотрим систему управления, состоящую из объекта (1), (2), алгоритма оценки помехи (5) и закона управления (6). Пусть для заданных чисел $\beta > 0$ и $\mu > 0$ существуют коэффициенты $\tau_1 > 0$, $\tau_2 > 0$, $\rho > 0$ и матрица $P > 0$, такие что выполнено линейное матричное неравенство (ЛМН)

$$\Psi < 0.$$

Тогда алгоритм (5), (6) обеспечивает выполнение целевого условия (4), где

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho\sum_{i=1}^{3}\chi_i^2}{2\beta\lambda_{\min}(P)}},$$

$\lambda_{\min}(P)$ – наименьшее собственное число матрицы P.

Доказательство утверждения аналогично [9].

Закон управления (5), (6) экспериментально испытан на лабораторном стенде по управлению сетью электрических генераторов [10] (см. рис. 1, слева). На рис. 2 справа приведены результаты переходных процессов по частоте вращения роторов, где на 10 с происходит внезапное изменение сопротивления линии электропередач в трех фазах в течение 2 с. Моделирование алгоритма для сети, состоящей из 100 электрических генераторов в приложении MatLab/Simulink (SimPowerSystems), показало обеспечение синхронизации сети по частоте вращения роторов и выходному напряжению.

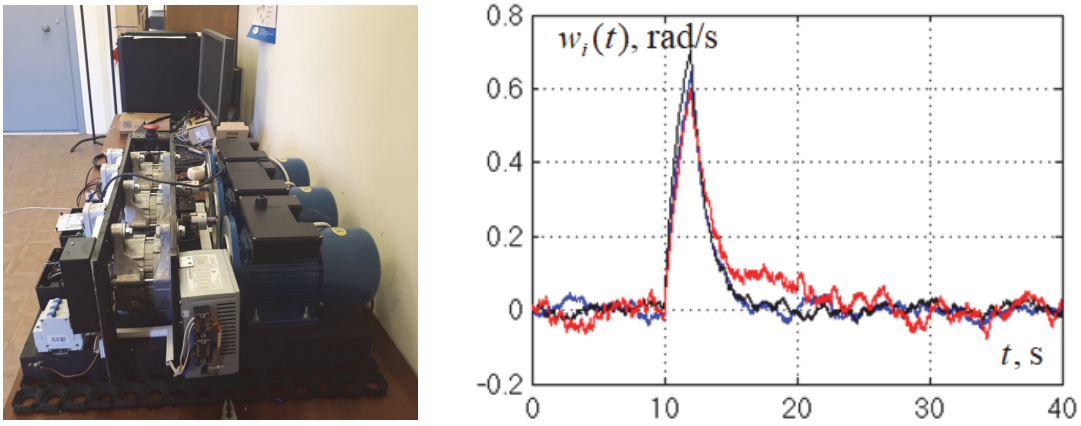


Рис. 1. Стенд по управлению сетью электрических генераторов (слева) и переходные процессы по частоте вращения роторов (справа)

Заключение. В статье разработан алгоритм управления с компенсацией возмущений и помех измерения для нелинейных объектов. В отличие от существующих результатов в представленной статье: 1) алгоритм работоспособен в условиях помех измерения, размерности которых равны размерности выходного сигнала объекта управления; 2) значения возмущений и помех могут не совпадать; 3) не используется наблюдатель производных; 4) параметрические и внешние возмущения могут присутствовать в любом уравнении модели объекта. Получено линейное матричное неравенство, разрешимость которого гарантирует предельную ограниченность решений уравнения объекта в замкнутой системе.

Работы выполнены при поддержке гранта РНФ № 18-79-10104 в ИПМаш РАН. Испытание алгоритма для систем большой размерности выполнено при поддержке гранта РФФИ 19-08-00246 в ИПМаш РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Johnson, L.M.,** Modelling. Science, 1998, vol. 2, no. 3, pp. 13–17.
2. **Paarmann, L.D.,** Design and Analysis of Analog Filters: A Signal Processing Perspective, Springer Science & Business Media, 2001, 440 p.
3. **Haykin, S.,** Adaptive Filter Theory, Prentice-Hall, Inc., 1991, 920 p.
4. **Katzenelson, J., Gould, L.A.,** The design of nonlinear filters and control systems. Part II, Information and Control, 1964, vol. 7, no. 2, pp. 117–145.
5. **Браммер К., Зиффлинг Г.** Фильтр Калмана-Бьюси. Детерминированное наблюдение и стохастическая фильтрация. М.: Наука, 1982. 199 с.
6. **Степанов О.А.** Фильтр Калмана. История и современность. (К 80-летию Рудольфа Эмиля Калмана) // Гироскопия и навигация. 2010. № 2 (69). С. 107–121.
7. **Цыкунов А.М.** Робастное управление с компенсацией возмущений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 304 с.
8. **Furtat, I.B.,** Control of Linear Time-Invariant Plants with Compensation of Measurement Noises and Disturbances, Proc. of the 56th IEEE Conference on Decision and Control (CDC2017), December 12–15, 2017, Melbourne, Australia.
9. **Фуртат И.Б., Гущин П.А., Перегудин А.А.** Алгоритм управления по выходу нелинейными системами с компенсацией возмущений и помех измерения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2019. Т. 20. № 1. С. 3–15.
10. **Стенд по управлению** сетью электрических генераторов: http://www.ipme.ru/ipme/ru/infrastr/labmes/ES.html.

I.B. Furtat, (IPME RAS, St. Petersburg), P.A. Gushchin (Gubkin University, Moscow)

DISTURBANCE AND NOISE OBSERVERS FOR DYNAMIC SYSTEMS WITH SECTOR NONLINEARITY

Observers of disturbances and measurement noises have been developed for dynamic systems with sector nonlinearity and parametric uncertainty. Conditions for the existence of these observers are proposed in the form of solvability of linear matrix inequalities. Using observers of disturbances and measurement noises, a control law has been developed to ensure the stabilization of the plant.

Д. Т. ХОАНГ, А. А. ПЫРКИН
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ КООРДИНАТ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

Предлагается новый адаптивный наблюдатель локальных координат подвижного объекта по измерениям линейной скорости, угла рысканья и дальности до одного маяка с известными координатами. Показаны условия, при которых алгоритм асимптотически устойчивый, а также состояния, в которых целесообразно использовать загрубленную оценку.

Введение. Рассматривается задача оценивания текущих координат подвижного объекта (например, мобильного робота) по пеленгационным измерениям координат наблюдаемых целей с известными координатами. В качестве ориентиров рассматриваются радиомаяки, которые можно распознавать как точки с известными координатами. Робот оснащен датчиками, которые дают информацию о линейной скорости перемещения, курсовом угле (угол рысканья), а также расстоянии до одного маяка с известным положением в абсолютной системе координат, связанной с Землей. Допускается, что расположения маяка относительно подвижного объекта (слева или справа от робота, спереди или сзади) известно: в каком квадранте маяк по отношению к роботу. В работе предлагается новый адаптивный наблюдатель пеленга на маяк, обеспечивающий асимптотическую сходимость к нулю ошибки оценивания. На основе значения пеленга формируются оценки глобальных координат мобильного робота.

Постановка задачи. Рассматривается подвижный объект на плоскости, положение которого может описываться в полярных (ρ, θ) и декартовых $(y_1,\ y_2)$ координатах. Объект движется с продольной скоростью $V(t)$ с углом рыскания $K(t)$ вблизи стационарного маяка с координатами $(y_1^*,\ y_2^*)$. С целью упрощения вычислений будем считать, что маяк расположен в начале координат: $y_1^* = 0, y_2^* = 0$.

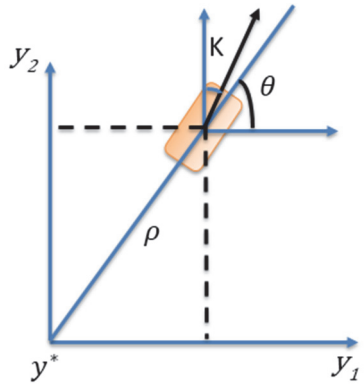


Рис. 1. Робот в абсолютной координатой системе

Модель движения объекта описывается уравнениями:

$$\dot{\rho} = V\sin(\theta + K) \tag{1}$$

$$\dot{\theta} = \frac{V}{\rho}\cos(\theta + K). \tag{2}$$

Зная величины курса $K(t)$, скорости $V(t)$, расстояния до маяка $\rho(t)$ и расположение маяка (находится слева или справа относительно подвижного объекта), требуется:

а) синтезировать наблюдатель угла в полярных координатах $\hat{\theta}(t)$

$$\lim_{t\to\infty}\left|\theta(t) - \hat{\theta}(t)\right| = 0\,; \tag{3}$$

б) найти положение в декартовой системе координат (y_1, y_2)

$$\lim_{t\to\infty}\left|y_{1,2}(t) - \hat{y}_{1,2}(t)\right| = 0. \tag{4}$$

Синтез наблюдателя. Рассмотрим вспомогательную переменную $\psi = \theta + K$, для которой справедливо соотношение

$$\dot{\psi} = \dot{\theta} + \dot{K} = \dot{K} + \frac{V}{\rho}\cos\psi. \tag{5}$$

Если отклонение угла рысканья от линии, соединяющей объект и маяк, более некоторого заданного δ, то переменная ψ может быть оценена по известным значениям угла рысканья, дальности до маяка и линейной скорости объекта в системе координат, связанной с Землей.

Утверждение. Наблюдатель переменной ψ

$$\hat{\psi}(t) = \begin{cases} \hat{x}, \text{если маяк слева: } \cos\psi > 0 \\ \pi - \hat{x}, \text{ если маяк справа: } \cos\psi < 0 \end{cases}'$$

$$\hat{x}(t) = K(t)sign(\cos\psi) + \gamma\rho(t) + \zeta(t),$$

$$\dot{\zeta}(t) = \frac{V(t)}{\rho(t)}\cos\hat{x}(t) - \gamma V(t)\sin\hat{x}(t)$$

обеспечивает выполнение условия $\lim\limits_{t\to\infty}\left|\psi(t) - \hat{\psi}(t)\right| = 0$, если отклонение курсового угла от линии, соединяющей объект и маяк, более некоторой заданной величины δ.

Доказательство утверждения. Рассмотрим модель ошибки $\tilde{\psi} = \psi - \hat{\psi}$. Если маяк слева и $\cos\psi > 0$, то

$$\dot{\tilde{\psi}} = \dot{\psi} - \dot{\hat{x}} = \dot{K} + \frac{V}{\rho}\cos\psi - \dot{K} - \gamma\dot{\rho}(t) - \dot{\zeta}(t) = \frac{V}{\rho}\left(\cos\psi - \cos\hat{\psi}\right) - \gamma V\left(\sin\psi - \sin\hat{\psi}\right)$$

$$= -\frac{2V}{\rho}\sin\frac{\psi+\hat{\psi}}{2}\sin\frac{\psi-\hat{\psi}}{2} - 2\gamma V\cos\frac{\psi+\hat{\psi}}{2}\sin\frac{\psi-\hat{\psi}}{2}$$

$$= -\frac{2V}{\rho}\left(\sin\frac{\psi+\hat{\psi}}{2} + \gamma\rho\cos\frac{\psi+\hat{\psi}}{2}\right)\sin\left(\frac{1}{2}\tilde{\psi}\right) \quad (6)$$

Если маяк справа и $\cos\psi < 0$, то

$$\dot{\tilde{\psi}} = \dot{\psi} - \dot{\pi} + \dot{\hat{x}} = \dot{K} + \frac{V}{\rho}\cos\psi - \dot{K} + \gamma\dot{\rho}(t) + \dot{\zeta}(t)$$

$$= \frac{V}{\rho}\left(\cos\psi + \cos\left[\pi - \hat{\psi}\right]\right) + \gamma V\left(\sin\psi - \sin\left[\pi - \hat{\psi}\right]\right)$$

$$= -\frac{2V}{\rho}\sin\frac{\psi+\hat{\psi}}{2}\sin\frac{\psi-\hat{\psi}}{2} + 2\gamma V\cos\frac{\psi+\hat{\psi}}{2}\sin\frac{\psi-\hat{\psi}}{2}$$

$$= -\frac{2V}{\rho}\left(\sin\frac{\psi+\hat{\psi}}{2} - \gamma\rho\cos\frac{\psi+\hat{\psi}}{2}\right)\sin\left(\frac{1}{2}\tilde{\psi}\right). \quad (7)$$

Для гарантирования асимптотической устойчивости положений равновесия $\tilde{\psi} = 0$ необходимо потребовать выполнение двойного неравенства $-\gamma\rho < \tan\frac{\psi+\hat{\psi}}{2} < \gamma\rho$, что справедливо почти на всем интервале определения ψ, за исключением окрестностей вблизи $\psi = \frac{\pi}{2}$ и $\psi = \frac{3\pi}{2}$. Можно показать, что размер этой окрестности δ уменьшается с увеличением настроечного параметра γ.

Замечание. Если невозможно достоверно определить, слева маяк или справа, то это означает, что отклонение курсового угла от направления на маяк в некоторой малой окрестности δ (почти сонаправлены) и оценку переменной ψ следует принять равной

$$\hat{\psi}(t) = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, \text{если маяк сзади } (\sin\psi > 0) \\ \frac{3\pi}{2}, \text{если маяк впереди } (\sin\psi < 0) \end{cases}.$$

Оценки координат объекта могут быть вычислены по формуле

$$\hat{y}_{1,2} = \rho(t)\begin{bmatrix}\cos\hat{\theta} \\ \sin\hat{\theta}\end{bmatrix}, \quad (8)$$

где $\hat{\theta}$ – оценка угла θ, связанного с пеленгом, определяемая по следующему алгоритму

$$\hat{\theta} = \left(\hat{\psi} - K\right) mod\ 2\pi,$$

Заключение. В статье предложен новый метод синтеза наблюдателя координат подвижного объекта на плоскости по имеющимся измерениям курса, линейной скорости и расстояния до стационарного маяка с точно известными координатами. В ситуациях, когда объект движется вдоль

направления на маяк, целесообразно использовать загрубленные оценки. В дальнейшем планируется продолжить исследование проблемы наблюдаемости рассматриваемой математической модели вблизи особых точек с целью получения асимптотической и экспоненциальной сходимости ошибок оценивания к нулю для всех значений курсового угла и пеленга на маяк.

T.D. Hoang, A.A. Pyrkin (ITMO University, Saint-Petersburg)

ADAPTIVE POSITION OBSERVER FOR MOVING OBJECT

A new adaptive observer of the local coordinates of a moving object is proposed based on measurements of linear velocity, yaw angle (heading), and distance to one beacon with known position. The conditions under which the algorithm is asymptotically stable are shown, as well as the states in which it is reasonable to use a robust estimate.

А. Б. ТОРОПОВ, А. В. ЛОПАРЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

А. Е. ПЕЛЕВИН
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

СРАВНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА ПРИ ОДНОМАЯКОВОЙ НАВИГАЦИИ

Проводится сравнительный анализ эффективности двух алгоритмов определения местоположения подводного аппарата по измерениям дальности до дрейфующего буя и радиальной скорости. При этом рассмотрен алгоритм, основанный на построении изолиний положения, и алгоритм полиномиальной фильтрации. При сопоставлении алгоритмов анализируются процент недостоверных данных и радиальная среднеквадратическая погрешность позиционирования. На основе проведенного анализа отдается предпочтение алгоритму полиномиальной фильтрации.

Введение. Одним из перспективных направлений определения местоположения автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) без всплытия на поверхность воды является использование дрейфующего буя [1–5]. При этом буй оснащается аппаратурой приема сигналов спутниковой навигационной системы (СНС) и гидроакустической системой связи, обеспечивающей передачу координат своего местоположения под водой на АНПА. Будем полагать, что аппаратура АНПА также позволяет определять дистанцию до буя и скорость сближения АНПА и буя в дискретные моменты времени. Одновременно АНПА по известным курсу и скорости производит счисление координат. На XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова авторами были предложены два алгоритма оценки местоположения АНПА с использованием информации от буя. Один из этих алгоритмов основан на построении изолиний положения [6], второй – на использовании полиномиального фильтра [7]. В настоящем докладе проводится сопоставление представленных алгоритмов на основе моделирования, условия которого приближены к условиям натурного эксперимента.

Постановка задачи. Рассмотрим движение АНПА в декартовой системе координат $O\xi\eta\varsigma$, центр которой совпадает с координатами излучающей гидроакустической антенны буя, находящейся под точкой расположения антенны приемника СНС. Ось $O\eta$ направлена на север, ось $O\xi$ – на восток, ось $O\varsigma$ – вертикально вниз (рис. 1). АНПА находится в точке M и движется со скоростью V курсом K на глубине H относительно излучателя. Измеряемыми параметрами являются расстояние $OM = \rho = \sqrt{\xi^2 + \eta^2 + H^2}$ и скорость его изменения (радиальная скорость) $V_\rho = \dot{\rho}$. Координаты ξ, η подлежат определению, при этом желательно минимизировать среднеквадратическую погрешность (СКП) оценивания.

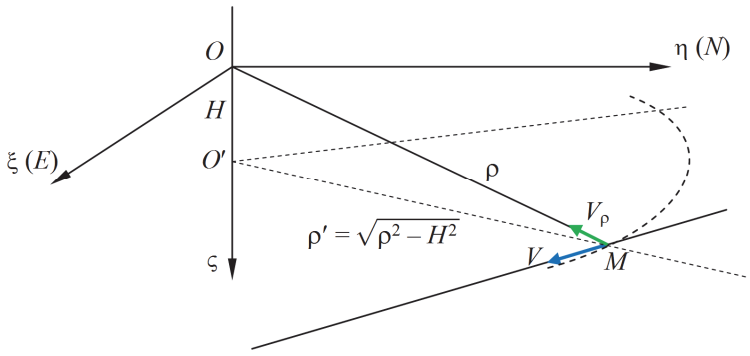


Рис. 1. Движение АНПА и изолинии положения

Алгоритм, основанный на построении изолиний положения (ИП). Алгоритм основан на получении в явном виде выражений для координат точек пересечения линий положения, соответствующих фиксированным значениям ρ и $\dot{\rho}$. Эти линии представляют собой соответственно окружность с центром в точке O' и два луча, исходящих из этой точки (рис. 1, штриховые линии). Выражения для координат АНПА будут иметь вид:

$$\xi = \frac{\rho}{V}\left(\dot{\rho}\sin K \pm \cos K\sqrt{V^2\left(1-\left(H/\rho\right)^2\right)-\dot{\rho}^2}\right),$$
$$\eta = \frac{\rho}{V}\left(\dot{\rho}\cos K \mp \sin K\sqrt{V^2\left(1-\left(H/\rho\right)^2\right)-\dot{\rho}^2}\right). \quad (1)$$

При наличии информации о величинах ρ и $\dot{\rho}$ уравнения (1) можно интерпретировать как модель измерений, при этом погрешности измерений аппроксимируются аддитивными центрированными дискретными белыми шумами с ковариацией, зависящей от СКП определения дальности и радиальной скорости. Неопределенности в выражении (1) снимаются при наличии априорной информации о взаимном расположении буя и траектории движения АНПА.

Обработка измерений (1) осуществляется фильтром Калмана, настроенного на модель движения АНПА, характеризующуюся текущими параметрами V, K, H, полученными по результатам измерений, в предположении отсутствия маневрирования. Флуктуации и погрешности определения навигационных параметров учитываются путем добавления в правые части уравнений динамики белошумных возмущений. Снос буя учитывается в уравнении движения путем вычисления приращений его координат, полученных по данным СНС. При формировании начальных установок фильтра может быть использован первый набор данных ρ, $\dot{\rho}$.

Алгоритм полиномиальной фильтрации (ПФ). В этом алгоритме в качестве измерений используются вычисленные значения

$$\rho^2 - H^2 = \xi^2 + \eta^2,$$
$$\rho\dot{\rho} = \xi\dot{\xi} + \eta\dot{\eta} = \xi V\sin K + \eta V\cos K. \quad (2)$$

Правые части уравнений (2) представляют собой полиномиальные функции искомых координат ξ, η. Обработка данных осуществляется полиномиальным фильтром [8], при этом модель динамики и ковариация погрешностей измерений формируются аналогично алгоритму, рассмотренному выше. При формировании начальных установок фильтра может быть использована априорная информация о текущем местоположении АНПА либо однократно проведены вычисления по формулам (1).

Отметим, что особенностью обоих рассмотренных алгоритмов является то, что при отсутствии измерений дальности измерения радиальной скорости игнорируются.

Пример. Сопоставление рассмотренных алгоритмов проведем путем компьютерного моделирования на примере движения АНПА со скоростью 17 уз. курсом 346° на глубине 10 м в сторону дрейфующего буя. Флуктуации параметров движения АНПА задавались путем построения формирующего фильтра, параметры которого были подобраны в соответствии с данными, полученными в ходе натурного эксперимента. Аналогичным образом моделировался дрейф буя. Предполагалось, что СКП знания начальных координат составляют 200 м.

На рис. 2 приведены истинные траектории движения АНПА (жирная линия) и 1500 реализаций их оценок двумя алгоритмами для различных реализаций измерений. Начальные координаты АНПА задавались таким образом, чтобы траверзное расстояние до буя лежало в пределах 600 м. На рис. 2 синей линией отмечен дрейф буя в процессе решения задачи.

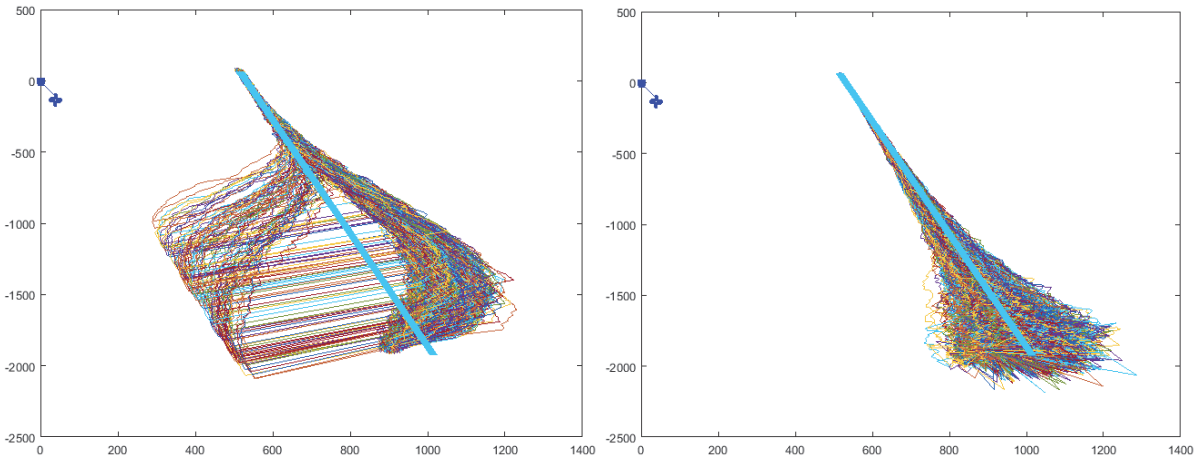
Из рис. 2 видно, что оба алгоритма эффективно решают задачу определения места АНПА. Выборочные предельные радиальные СКП на конец интервала оценивания составили 25 м для алгоритма ИП и 8 м для алгоритма ПФ и совпадали с их действительными значениями.

В то же время при уменьшении траверзного расстояния начинает сказываться наличие второй точки пересечения линий положения, соответствующей второму (ложному) экстремуму апостериорной плотности распределения вероятностей. На рис. 3 представлены результаты моделирования для такого случая, когда траверзное расстояние составляло 100 м.

Доля недостоверных данных, соответствующих ложному экстремуму, составила при использовании алгоритма ИП 1,5%; при использовании алгоритма ПФ – 7,5%. При этом истинные радиальные СКП на конец интервала оценивания составили соответственно 75 и 160 м, а расчетные значения – 15 и 11 м.

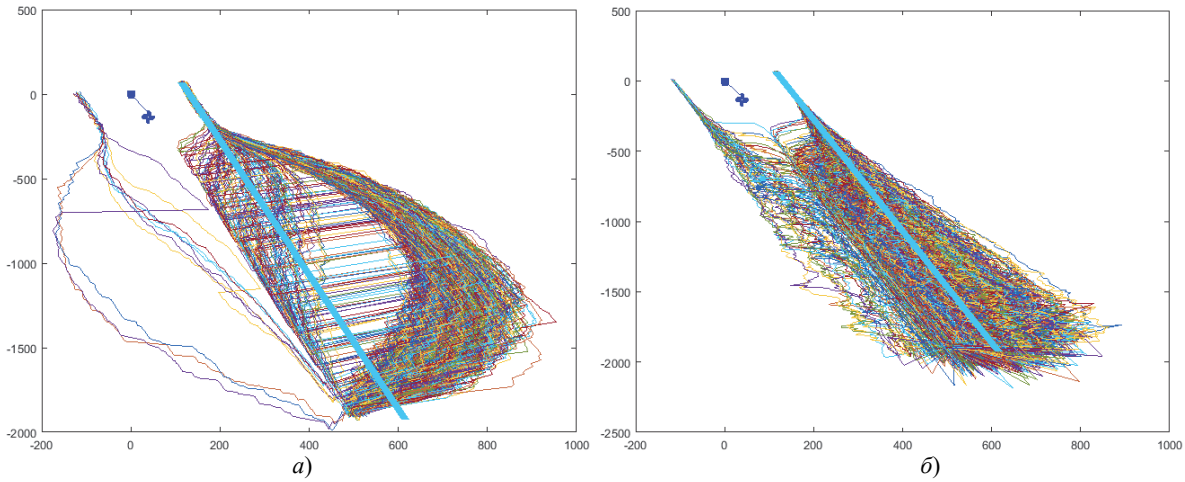
С целью снижения процента недостоверных данных рассмотрена возможность совершения маневра по курсу; соответствующая траектория движения показана на рис. 4. Эффективность ма-

неврирования подтверждена только при использовании алгоритма ПФ (доля недостоверных данных снизилась до 0,4%); в то же время алгоритм ИП, предполагающий движение АНПА прямолинейными галсами, не позволил получить корректные результаты (доля недостоверных данных 4%). При этом истинные радиальные СКП на конец интервала оценивания составили соответственно 135 (ИП) и 42 м (ПФ), а расчетные значения – 15 и 11 м.



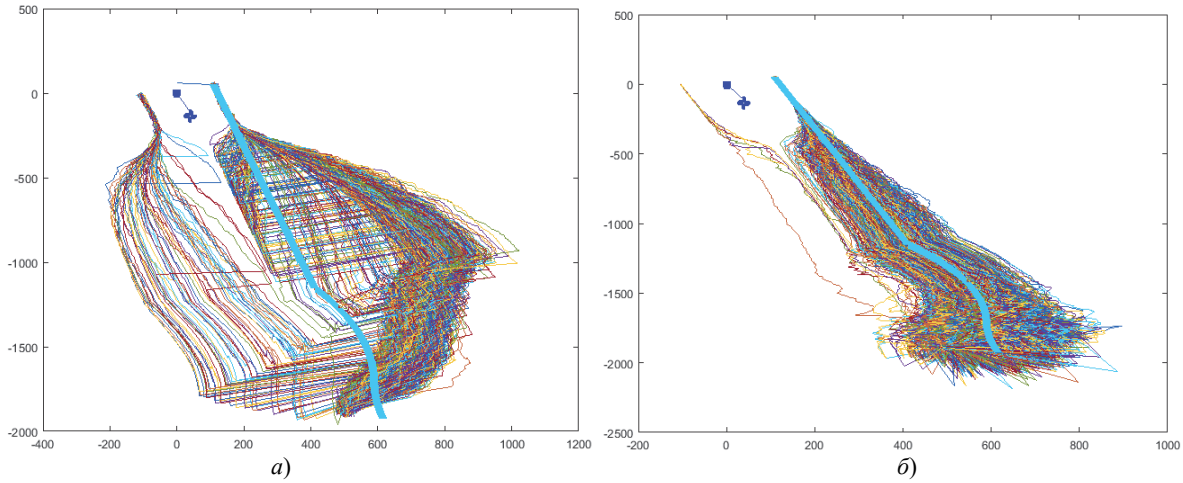
а) *б*)

Рис. 2. Истинная траектория движения АНПА (жирная линия) и ее оценки с использованием алгоритмов: *а*) ИП; *б*) ПФ (траверзное расстояние 600 м)



а) *б*)

Рис. 3. Истинная траектория движения АНПА (жирная линия) и ее оценки с использованием алгоритмов: *а*) ИП; *б*) ПФ (траверзное расстояние 100 м)



а) *б*)

Рис. 4. Истинная траектория движения АНПА (жирная линия) и ее оценки с использованием алгоритмов: *а*) ИП; *б*) ПФ (траверзное расстояние 100 м, маневр по курсу)

Для повышения устойчивости алгоритма ИП предлагается использовать данные, полученные на маневре, только с целью уточнения априорной информации о взаимном расположении буя и траектории движения АНПА.

Заключение. Проведено сопоставление двух алгоритмов определения местоположения АНПА по данным от дрейфующего буя, основанных на построении изолиний положения и полиномиального фильтра в условиях, близких к натурному эксперименту. Установлено, что в общем случае ПФ дает более точные оценки местоположения и при этом также лучше работает на непрямолинейных траекториях. В то же время ПФ уступает по точности алгоритму ИП на прямолинейной траектории при наличии в области неопределенности ложного экстремума. Совершение маневра по курсу позволяет улучшить качество оценивания ПФ, при этом вопрос выбора оптимального маневра остается открытым.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ 18-08-01261а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pedro, M., Moreno-Salinas, D., Crasta, N., Pascoal, A.,** Underwater Single-Beacon Localization: Optimal Trajectory Planning and Minimum-Energy Estimation, Proc. IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV' 2015), Girona, Spain, 28–30 April, 2015.
2. **Bayat, M., Crasta, N., Aguiar, A.P., Pascoal, A.M.,** Range-Based Underwater Vehicle Localization in the Presence of Unknown Ocean Currents: Theory and Experiments, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, vol. 1.
3. **McPhail, S.D., Pebody, M.,** Range-only Positioning of a Deep-diving Autonomous Underwater Vehicle from a Surface Ship, IEEE J. of Oceanic Eng., 2009, vol. 34, no 4, pp. 669–677.
4. **Дубровин Ф.С., Щербатюк А.Ф.** Исследование некоторых алгоритмов одномаяковой мобильной навигации БПА: результаты моделирования и морских испытаний // Гироскопия и навигация. 2015. № 4. С. 160–170.
5. **Кошаев Д. А.** 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. **Пелевин А.Е.** Определение местоположения АНПА по информации о дальности и скорости ее изменения при одномаяковой навигации // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор». 2018. С. 155–162.
7. **Степанов О.А., Васильев В.А., Торопов А.Б., Лопарев А.В., Басин М.В.** Сравнительный анализ алгоритмов фильтрации в задачах обработки навигационных измерений полиномиального типа // Материалы XXXI конференции памяти выдающегося конструктора гироскпических приборов Н.Н. Острякова. СПб.: ЦНИИ «Электроприбор». 2018. С. 146–154.
8. **Stepanov, O.A., Vasiliev, V.A., Toropov, A.B., Loparev, A.V., Basin, M.V.,** Efficiency analysis of a filtering algorithm for discrete-time linear stochastic systems with polynomial measurements, Journal of the Franklin Institute, 2019, vol. 356, is. 10, pp. 5573–5591.

A.B. Toropov, A.V. Loparev (Concern CSRI Elektropribor, ITMO University, St. Petersburg), A.E. Pelevin (Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg)

COMPARING ALGORITHMS FOR ESTIMATION OF UNDERWATER VEHICLE POSITION BY THE USE OF SINGLE-BEACON NAVIGATION

The comparative analysis of two algorithms aimed at estimation of Underwater Vehicle Position using measurements of the range and the radial velocity with respect to a drifting buoy is carried out. The algorithm based on position lines building and polynomial filtering algorithm are considered. For algorithms comparison, invalid data rate and DRMS are taking into account. Based on the investigation made, the polynomial filtering algorithm is accepted as preferable.

А. А. ВЕДЯКОВ, А. А. ПЫРКИН, В. В. БЕСПАЛОВ, В. А. АНТИПОВ, Д. А. ЧЕРГИНЕЦ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

АДАПТИВНЫЙ НАБЛЮДАТЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОТОКА, УГЛА ПОВОРОТА И УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Синтезирован адаптивный наблюдатель магнитного потока и положения для синхронного двигателя с постоянными магнитами по измерениям сил токов и напряжений в обмотках статора, позволяющий получать оценки с нулевой ошибкой за конечное время при отсутствии помех измерения. Итеративное использование предлагаемого алгоритма позволило получить оценки угловой скорости вращения ротора и момента нагрузки.

Введение. Широкое распространение синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ) в авиационной технике, автомобильном машиностроении, биомедицинской аппаратуре, бытовой технике, роботехнических системах, также в промышленности, особенно в системах регулирования скорости с большим диапазоном и высоким темпом пусков, остановок и реверса [1], привело к росту исследований в области управления такими двигателями. Одним из активно развивающихся направлений является бездатчиковое управление на основе оценок углового положения и угловой скорости ротора двигателя по измеренным сигналам сил токов и напряжений обмоток статора [2]. Ключевым элементом при таком управлении является быстрое и точное получение оценок текущего углового положения и угловой скорости ротора.

В наблюдателе переменных состояний нелинейной модели СДПМ, предложенном в [3], для оценивания скорости вращения ротора применяется метод фазовой автоподстройки частоты, который обладает локальной сходимостью ошибок оценивания к нулю, что может затруднить использование такого алгоритма в контуре управления. Представленная работа посвящена синтезу адаптивного наблюдателя, обеспечивающего глобальную сходимость ошибок оценивания переменных состояния системы и внешнего момента к нулю при отсутствии помех измерения за конечное время. Наблюдатель строится на основе метода, предложенного в [5], в два шага: на первом шаге синтезируется алгоритм оценивания магнитного потока и положения, на втором – наблюдатель скорости вращения ротора.

Постановка задачи. Система уравнений, описывающая динамику классического двухполюсного синхронного двигателя с постоянными магнитами в неподвижной системе координат, связанной со статором, имеет следующий вид [5]:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega, \\ J\dot{\omega} &= n_p i^T j\lambda - \tau_L, \\ \dot{\lambda} &= u - Ri, \\ Li &= \lambda - \lambda_m \begin{bmatrix} \cos(n_p\theta) \\ \sin(n_p\theta) \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{1}$$

где $\lambda \in \mathrm{R}^2$ – магнитный поток, $i \in \mathrm{R}^2$ – вектор силы тока в обмотках статора, $u \in \mathrm{R}^2$ – вектор напряжения на обмотках статора, $L, R \in \mathrm{R}$ – индуктивность и сопротивление обмоток статора соответственно, $J > 0$ – инерция ротора, $\theta \in [0, 2\pi]$ – угловое положение ротора, $\omega \in \mathrm{R}$ – механическая угловая скорость, $\tau_L \in \mathrm{R}$ – момент нагрузки, $n_p \in N_+$ – количество пар полюсов, $\lambda_m > 0$ – магнитный поток от постоянных магнитов, а $j = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$.

Измеряемыми сигналами являются сила тока и напряжение обмоток статора. Параметры двигателя, за исключением количества пар полюсов, сопротивления и индуктивности обмоток статора, считаются неизвестными. Момент внешней нагрузки принимается постоянным, момент силы трения не учитывается.

Целью работы является синтез наблюдателя, использующего сигналы сил токов и напряжений и позволяющего получить оценки магнитного потока, угла, скорости вращения ротора и момента нагрузки за конечное время, т.е. будет существовать такое время $t_1 > 0$, что

$$\begin{aligned} &\left|\hat{\lambda}(t) - \lambda(t)\right| = 0, \\ &\left|\hat{\theta}(t) - \theta(t)\right| = 0, \\ &\left|\hat{\omega}(t) - \omega(t)\right| = 0, \\ &|\,\hat{\tau}_L(t) - \tau_L(t)\,| = 0 \end{aligned} \tag{2}$$

для времени $t \geq t_1$, где величины $\hat{\lambda}(t), \hat{\theta}(t), \hat{\tau}_L(t)$ и $\hat{\omega}(t)$ – оценки магнитного потока, положения, момент нагрузки и скорости ротора соответственно.

Синтез наблюдателя магнитного потока и положения ротора. Введем вспомогательное отображение

$$\chi := \phi(x) = \lambda_m \begin{bmatrix} \cos(n_p x) \\ \sin(n_p x) \end{bmatrix}, \tag{3}$$

обратная форма которого имеет вид

$$x = \phi^L(\chi) = \frac{1}{n_p} \arctan \frac{\chi_1}{\chi_2}. \tag{4}$$

Рассмотрим производную (3)

$$\dot{\chi} = u - Ri - L\dot{\hat{i}}. \tag{5}$$

Используя линейный фильтр вида $\frac{\alpha}{p+\alpha}$, где $p := \frac{d}{dt}$ и $\alpha > 0$, получим отфильтрованные версии сигналов, которые доступны для использования: $i_f = \frac{\alpha}{p+\alpha}[i]$, $u_f = \frac{\alpha}{p+\alpha}[u]$. Здесь и далее под доступными будем понимать сигналы, которые являются измеряемыми или могут быть вычислены на основе измеряемых сигналов и известных величин.

Лемма 1. Систему из уравнений (3) и (5) можно представить в виде линейной регрессионной модели

$$\varphi^T(t,\alpha)\chi = c(t,\alpha)$$

с регрессором и выходом, вычисляемыми на основе измеряемых сигналов:

$$\begin{aligned} \varphi(t,\alpha) &= u_f(t,\alpha) - Ri_f(t,\alpha) - L\dot{\hat{i}}_f(t,\alpha), \\ c(t,\alpha) &= \varsigma_f(t,\alpha) - \frac{L}{\alpha}\varphi^T(t,\alpha)\dot{\hat{i}}_f(t,\alpha) - \frac{L^2}{2\alpha}\left|\dot{\hat{i}}_f(t,\alpha)\right|^2, \end{aligned}$$

где

$$\varsigma(t) := \frac{1}{\alpha}\left[u(t) - Ri(t)\right]^T \varphi(t,\alpha) + \frac{L}{\alpha^2}\left[\dot{u}_f(t,\alpha) + \left(\frac{\alpha L}{2} - R\right)\dot{\hat{i}}_f(t,\alpha)\right]^T \dot{\hat{i}}_f(t,\alpha).$$

Доказательство леммы 1 приведено в [4]. Применяя метод динамического расширения и смешивания регрессора (ДРСР) [4] к регрессионной модели, представленной в лемме 1, и выбирая два линейных фильтра с параметрами $\alpha_1, \alpha_2 > 0$, получим следующую систему матричных уравнений:

$$C(t) = \Phi(t)\chi(t), \tag{6}$$

где $C(t) := \begin{bmatrix} c(t,\alpha_1) \\ c(t,\alpha_2) \end{bmatrix}$, $\Phi(t) := \begin{bmatrix} \varphi^T(t,\alpha_1) \\ \varphi^T(t,\alpha_2) \end{bmatrix}$.

Следующим шагом в методе ДРСР является «смешивание» для декомпозиции исходной модели линейной регрессии (6) на систему скалярных уравнений

$$Y_x(t) = \Delta(t)\chi(t), \tag{7}$$

где

$$Y_x(t) := adj\{\Phi(t)\}C(t),\ \Delta(t) := \chi \det\{\Phi(t)\}.$$

На основе выражений (4), (5) и (7) можно получить оценки магнитного потока и положения ротора:

$$\dot{\bar{\lambda}}(t) = u - Ri + \gamma_x \Delta\left[Y_x - (\bar{\lambda}(t) - Li)\Delta\right], \tag{8}$$

где $\gamma_x > 0$ – коэффициент настройки, $\bar{\lambda}(t)$ – оценка магнитного потока.

Применяя модификацию, описанную в [6] для получения, получим выражение для оценки магнитного потока за конечное время

$$\hat{\lambda}(t) = \frac{1}{1 - w_\lambda}(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}(0)w_\lambda - w_\lambda \int_0^t (Ri - u + L\frac{di}{dt})d\tau), \tag{9}$$

где функция w_ω равна

$$w_\lambda = \begin{cases} \rho_\lambda, w_1 \geq \rho_\lambda \\ w_1, w_1 < \rho_\lambda \end{cases}$$

с $\rho_\lambda \in (0,1)$ и доступным сигналом системы $\dot{w}_1 = -\gamma_\lambda \Delta^{\ 2} w_1$ и начальными условиями $w_4(0) = 1$. Модификация обеспечивает глобальную сходимость ошибки оценивания к нулю в том случае, если

$$\exists t_\lambda > 0 : \int_0^{t_\lambda} \Delta^2 d\tau \geq -\frac{1}{\gamma_x}\ln(\rho_\lambda). \tag{10}$$

На основе оценки магнитного потока (9) получим выражения для восстановления информации о положении ротора за конечное время:

$$\begin{aligned} \hat{\chi}(t) &= \hat{\lambda}(t) - Li, \\ \hat{\theta}(t) &= \frac{1}{n_p}\arctan\frac{\hat{\chi}_2(t)}{\hat{\chi}_1(t)}. \end{aligned} \tag{11}$$

Синтез наблюдателя скорости ротора. Теперь итеративно применим описанный метод для синтеза наблюдателя скорости и момента нагрузки, используя полученную на предыдущем шаге оценку положения (11). Из (1) получим систему уравнений

$$\begin{aligned} L\frac{di}{dt} + Ri - u &= -\lambda_m n_p jC\omega, \\ \dot{\omega} &= \frac{-i^T d(t)}{J} - \frac{1}{J}\tau_L, \end{aligned} \tag{12}$$

где $C = \begin{bmatrix} \cos n_p\hat{\theta} \\ \sin n_p\hat{\theta} \end{bmatrix}$, а $d(t) = -\lambda_m n_p jC.$

Применив линейный фильтр вида $\frac{\alpha}{p+\alpha}$ и лемму о расширенной ошибке [7] к (12), получим систему уравнений

$$z = Q\begin{bmatrix} \tau_L \\ \omega \end{bmatrix}, \tag{13}$$

где $Q = \begin{bmatrix} q_1 & q_2 \end{bmatrix}$,

$$z = L\frac{\alpha p}{p+\alpha} i + Ri_f - u_f - \frac{1}{p+\alpha}\left[\frac{i^T d(t)}{J}\frac{\alpha}{p+\alpha} d(t)\right],$$

$$q_1 = \frac{1}{J}\frac{1}{p+\alpha}\left[\frac{\alpha}{p+\alpha}[d(t)]\right],$$

$$q_2 = \frac{\alpha}{p+\alpha}[d(t)].$$

На основе системы уравнения (13) и метода ДРСР определим дополнительные доступные сигналы $Z = adj(Q)z$ и $\Delta_q = \det(Q)$, на основе которых синтезируем алгоритм оценивания момента нагрузки и скорости вращения ротора:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{\tau}}_L &= \gamma_\tau \Delta_q [Z_1 - \bar{\tau}_L \Delta_q], \\ \dot{\bar{\omega}} &= -\frac{i^T d(t)}{J} - \frac{1}{J}\bar{\tau}_L + \gamma_m q^T (Z_2 - \bar{\omega}\Delta_q), \end{aligned} \tag{14}$$

где $\gamma_m, \gamma_{\tau_L} > 0$ – коэффициенты настройки, $\bar{\omega}$ и $\bar{\tau}_L$ – оценки скорости и момента нагрузки на роторе соответственно.

Следующим шагом применим модификацию [6] аналогично (9) для оценивания момента нагрузки на роторе за конечное время:

$$\hat{\tau}_L(t) = \frac{1}{1 - w_{\tau_L}}(\bar{\tau}_L - \bar{\tau}_L(0) w_{\tau_L}), \tag{15}$$

где функция w_{τ_L} равна

$$w_{\tau_L} = \begin{cases} \rho_{\tau_L}, w_3 \geq \rho_{\tau_L} \\ w_3, w_3 < \rho_{\tau_L} \end{cases}$$

с $\rho_{\tau_L} \in (0,1)$ и измеряемым сигналом системы $\dot{w}_3 = -\gamma_{\tau_L} \Delta_q{}^2 w_3$ с начальными условиями $w_3(0) = 1.$

Финальным этапом синтеза наблюдателя скорости вращение ротора является модификация алгоритма оценки скорости (14) с подстановкой оценки момента нагрузки (15):

$$\hat{\omega}(t) = \frac{1}{1 - w_\omega}(\bar{\omega} - \bar{\omega}(0) w_\omega - w_\omega \int_0^t \frac{-id(t) - \hat{\tau}_L}{J} d\tau), \tag{16}$$

где функция w_ω равна

$$w_\omega = \begin{cases} \rho_\omega, w_4 \geq \rho_\omega \\ w_4, w_4 < \rho_\omega \end{cases}$$

с $\rho_\omega \in (0,1)$ и доступным сигналом $\dot{w}_4 = -\gamma_\omega \Delta_q{}^2 w_4$ с начальными условиями $w_4(0) = 1.$

Аналогично условию (10) для алгоритма (9) будут существовать такие $t_{\tau_L}, t_\omega, t_\theta$, после которых ошибка оценивания равна нулю при отсутствии помех измерения, что позволяет утверждать, что $\exists t_1 : t_1 \geq t_\lambda, t_1 \geq t_{\tau_L}, t_1 \geq t_\omega, t_1 \geq t_\theta$ и выполняется целевое условие (2).

Заключение. Предложен новый наблюдатель магнитного потока, углового положения, момента нагрузки, и скорости вращения ротора для СДПМ, обеспечивающий глобальную сходимость ошибок оценивания к нулю за конечное время при отсутствии помех измерения. Наблюдатель получен итеративным применением метода [4]. К недостаткам синтезированного наблюдателя можно отнести допущение о постоянстве момента нагрузки и отсутствии в модели двигателя учета сил трения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Sakunthala, A.,** Review on Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Using Different Control Techniques, International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), 2018.
2. **Leonhard, W.,** Control of electrical drives. Berlin:Springer Science & Business Media, 2012.
3. **Bazylev, D., Vukosavic, S., Bobtsov, A., Pyrkin, A., Stankovic, A., Ortega, R.,** Sensorless Control of PM Synchronous Motors with a Robust Nonlinear Observer, 2018.
4. **Pyrkin, A., Bobtsov, A., Ortega, R., Vedyakov, A., Aranovskiy, S.,** Adaptive State Observers Using Dynamic Regressor Extension and Mixing, Systems & Control Letters, 2019.
5. **Nam, K.H.,** AC Motor control and electric vehicle applications, 2010, CRC Press.
6. **Gersimov, D., Ortega, R., Nikiforov, V.,** Adaptive Control of Multivariable Systems with Reduced Knowledge of High Frequency Gain: Application of Dynamic Regressor Extention and Mixing Estimators, IFAC, 2018.
7. **Sastry, Sh. and Bodson, M.,** Adaptive control: stability, convergence and robustness. Courier Corporation, 2011.

A. Vedyakov, A. Pyrkin, V. Bespalov, V. Antipov, D. Cherginets (ITMO University, St.Petersburg)

ADAPTIVE OBSERVER OF MAGNETIC FLUX, ROTATION ANGLE AND ANGULAR ROTATION SPEED OF THE ROTOR OF A SYNCHRONOUS MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

An adaptive magnetic flux and position observer has been synthesized for a permanent magnet synchronous motor. The measurable signals are coils currents and voltages only. The observer provides observation error convergence to zero in finite time in absence of noises. in the measurements. The algorithm is iteratively applied to obtain the rotor speed and load torque observer.

Д. В. КРАСНОВ, А. В. УТКИН
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва)

НАБЛЮДАТЕЛИ СОСТОЯНИЙ И ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ С БЕЗДАТЧИКОВЫМ МАНИПУЛЯТОРОМ

Для следящей электромеханической системы в условиях параметрических и внешних возмущений, когда регулируемые переменные механической подсистемы не измеряются и датчики расположены только на приводах, разработан двухконтурный наблюдатель внутренних и внешних переменных, по которым формируется обратная связь, не требующий построения динамических моделей внешних воздействий.

Введение. При традиционном синтезе высокоточных следящих систем в условиях неполной информации для обеспечения робастности в контур обратной связи вводятся генераторы внешних воздействий, идентификаторы параметров, наблюдатели состояний и возмущений, которые повторяют структуру моделей объекта управления и внешних воздействий и оценивают соответствующие внутренние и внешние переменные по отдельности. Такой подход приводит к существенному усложнению регулятора и необходимости перенастройки автономных моделей при изменениях режимов работы и условий эксплуатации. При этом динамический порядок замкнутой системы может в несколько раз превышать динамический порядок объекта управления, что приводит к увеличению времени счета и к появлению запаздывания по управлению.

Для минимально-фазовых систем в предположении о гладкости (или кусочной дифференцируемости) внешних воздействий динамический порядок замкнутой системы слежения может быть сокращен без потери качества и без ввода дополнительных датчиков, если за основу для построения наблюдателя принять виртуальную каноническую модель «вход–выход», записанную относительно ошибок слежения. Если именно выходные переменные измеряются, то тогда такой наблюдатель с «силовыми» корректирующими воздействиями (глубокими обратными связями, разрывными управлениями или их непрерывными аппроксимациями) даст оценки смешанных переменных (функций от переменных состояния, внешних возмущений, задающих воздействий и их производных), по которым непосредственно формируется обратная связь [1–3]. При таком подходе динамический порядок замкнутой системы увеличивается не более чем в два раза, регулятор не нуждается в перенастройке и обеспечивает работоспособность следящей системы при различных штатных режимах.

В данной работе рассматривается возможность реализации указанного комплексного подхода к оцениванию неизмеряемых сигналов для объектов, функционирующих в условиях неопределенности, выходные (регулируемые) переменные которых не подлежат измерениям, на примере полноприводных электромеханических систем с бездатчиковыми манипуляторами.

Модель объекта управления. Постановка задачи оценивания. Без ограничения общности рассмотрим динамическую модель однозвенного жесткого манипулятора, имеющего упругое соединение с редуктором, на котором установлен привод постоянного тока:

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = a_{21}(x_3 - x_1) - a_{22}\sin x_1 + f(t), \qquad (1)$$

$$\dot{x}_3 = x_4, \dot{x}_4 = -a_{43}(x_3 - x_1) - a_{44}x_4 + a_{45}x_5,\ \dot{x}_5 = -a_{54}x_4 - a_{55}x_5 + bu, \qquad (2)$$

где x_1, x_2 и x_3, x_4 – угловые положения и скорости манипулятора и вала редуктора соответственно, x_5 – ток якоря привода, u – напряжение якоря (разрывное управление), $f(t)$ – неконтролируемое возмущение; a_{ij}, b – положительные коэффициенты, зависящие от параметров электромеханического объекта [4], a_{43}, a_{44}, a_{45} – известны, $a_{21}, a_{22}, a_{54}, a_{55}, b$ – точно не известны, но диапазоны их значений ограничены, в частности $\underline{b} \le b \le \overline{b}$. При $f(t) \equiv 0$ система (1)–(2) является управляемой и наблюдаемой относительно выхода $x_1(t)$.

Рассматривается задача синтеза обратной связи, обеспечивающей отслеживание выходной переменной $x_1(t)$ заданного, допустимого сигнала $g(t)$. Данную задачу будем решать в рамках

блочного подхода с линейными локальными связями [2, 3, 5]. В предположении о гладкости (или кусочной дифференцируемости) внешних воздействий $f(t), g(t)$ и ограниченности их производных с помощью невырожденных замен переменных представим систему (1)–(2) в верхнетреугольной форме «вход–выход» относительно ошибки слежения $e_1 = x_1 - g$:

$$\dot{e}_i = -\bar{k}_i e_i + e_{i+1}, \bar{k}_i = \text{const} > 0,\ i = \overline{1,4}; \dot{e}_5 = \varphi + bu, \tag{3}$$

где $e_2 = x_2 - \dot{g} + k_1 e_1$, $e_i = \frac{d}{dt} e_{i-1} + (k_{i-1} - k_{i-2}) e_{i-1}, i = 3,4,5$, $\bar{k}_1 = k_1$, $\bar{k}_i = k_i - k_{i-1}$, $i = 2,3,4$. В предположении об ограниченности функции $\varphi(x_1,...,x_5, g, \dot{g},..., g^{(5)}, f, \dot{f}, \ddot{f}, \dddot{f})$: $|\varphi(t)| \le \Phi, t \ge 0$ базовый закон разрывного управления

$$u = -k_5 \text{sign} e_5, k_5 > \Phi / \bar{b} \tag{4}$$

обеспечит за конечное время скользящий режим на поверхности $e_5 = 0$, что, в свою очередь, приведет к экспоненциальной сходимости в нуль ошибки слежения с желаемыми темпами.

Для реализации обратной связи (4) потребуется информация о смешанной переменной $e_5(x_1,...,x_5, g, \dot{g},..., g^{(4)}, f, \dot{f}, \ddot{f})$. Если угловое положение манипулятора $x_1(t)$ измеряется, то ошибка слежения известна. Тогда задача оценивания $e_5(t)$ может быть решена по измерениям $e_1(t)$ с помощью наблюдателя, построенного на основе виртуальной модели (3) [1–3]. Такой подход обеспечивает робастность, при этом не требует установки дополнительных датчиков, расширения пространства состояний за счет динамических генераторов заданий и возмущений, а также параметрической определенности объекта управления (1)–(2).

Однако иногда нежелательно или невозможно размещение датчиков на манипуляторе, поэтому датчики устанавливают только на приводах. Будем рассматривать два случая, когда измеряются: 1) все переменные $x_3(t), x_4(t), x_5(t)$ электрической подсистемы; 2) только угловое положение вала редуктора $x_3(t)$ и ток якоря $x_5(t)$. В обоих случаях система (1)–(2) является наблюдаемой. В следующем разделе представлен основной результат: для информационного обеспечения закона управления (4) предложен двухконтурный наблюдатель. В первом контуре по имеющимся измерениям оценивается угловое положение манипулятора $x_1(t)$. Восстановленный сигнал вместе с задающим воздействием используется для формирования обратной связи в наблюдателе смешанной переменной $e_5(t)$ во втором контуре.

Синтез двухконтурного наблюдателя. В первом случае при измерениях $x_3(t), x_4(t), x_5(t)$ для оценивания $x_1(t)$ достаточно наблюдателя первого порядка, построенного как реплика второго уравнения подсистемы (2) с учетом измеряемых сигналов в виде

$$\dot{z} = -a_{43} x_3 - a_{44} x_4 + a_{45} x_5 + v, \tag{5}$$

где z – переменная состояния, v – корректирующее воздействие наблюдателя. Относительно ошибки наблюдения $\varepsilon = x_4 - z$ получим систему $\dot{\varepsilon} = a_{43} x_1 - v$, в которой $x_1(t)$ трактуется как внешнее, ограниченное возмущение с ограниченной производной $|x_1(t)| \le X_1$, $|\dot{x}_1(t)| = |x_2(t)| \le X_2$. Нужно обеспечить стабилизацию ошибки наблюдения и ее производной, тогда при $t > T_1$ корректирующее воздействие будет служить оценкой «возмущения»:

$$|\varepsilon(t)| \le \delta, |\dot{\varepsilon}(t)| = |a_{43} x_1(t) - v(t)| \le \delta. \tag{6}$$

Для обеспечения (6) используем кусочно-линейную коррекцию с двумя параметрами:

$$v = m\text{sat}(l\varepsilon) = \begin{cases} m\text{sign}\varepsilon, |\varepsilon| > 1/l, \\ ml\varepsilon, |\varepsilon| \le 1/l,\ m, l = \text{const} > 0. \end{cases} \tag{7}$$

С учетом измерений установим $z(0) = x_4(0) \Rightarrow \varepsilon(0) = 0$. Из достаточных условий получим оценку для выбора амплитуды $m > 0$, обеспечивающего $|\varepsilon(t)| \le 1/l$, $t \ge 0$:

$$\varepsilon\dot{\varepsilon} = \varepsilon(a_{43} x_1 - m\text{sign}\varepsilon) \le |\varepsilon|(a_{43} X_1 - m) < 0 \Rightarrow m > a_{43} X_1.$$

В линейной зоне уравнения для ошибки наблюдения и ее производной имеют вид

$\dot{\varepsilon} = a_{43}x_1 - ml\varepsilon, \ddot{\varepsilon} = a_{43}x_2 - ml\dot{\varepsilon}$. Из достаточных условий получим оценку для выбора большого коэффициента $l > 0$, обеспечивающего заданную точность оценивания (6):

$$\varepsilon\dot{\varepsilon} \le |\varepsilon|(a_{43}X_1 - ml|\varepsilon|) < 0 \wedge \dot{\varepsilon}\ddot{\varepsilon} \le |\dot{\varepsilon}|(a_{43}X_2 - ml|\dot{\varepsilon}|) < 0 \Rightarrow l > a_{43}\max\{X_1; X_2\}/(m\delta).$$

Итак, оценкой $x_1(t)$ служит сигнал $\tilde{x}_1(t) = v(t)/a_{43}$: $|x_1(t) - \tilde{x}_1(t)| = |\alpha(t)| \le \overline{\alpha} = \delta/a_{43}$, $t > T_1$.

Во втором случае при измерениях $x_3(t), x_5(t)$ для оценивания $x_1(t)$ требуется наблюдатель второго порядка, построенный как реплика первого и второго уравнений подсистемы (2):

$$\dot{z}_3 = z_4 + v_3, \dot{z}_4 = -a_{43}x_3 - a_{44}z_4 + a_{45}x_5 + v_4. \quad (8)$$

Тогда относительно ошибок наблюдения $\varepsilon_i = x_i - z_i, i = 3,4$ получим следующую систему:

$$\dot{\varepsilon}_3 = \varepsilon_4 - v_3, \dot{\varepsilon}_4 = a_{43}x_1 - a_{44}\varepsilon_4 - v_4.$$

Использование кусочно-линейной коррекции типа (7), а именно $v_3 = m_3\mathrm{sat}(l_3\varepsilon_3)$, $v_4 = m_4\mathrm{sat}(l_4v_3)$, и каскадной процедуры настройки ее параметров [1, 2] обеспечат:

$$|\varepsilon_i(t)| \le \delta,\ i = 3,4, |a_{43}x_1 - v_4| \le \delta \Rightarrow \tilde{x}_1(t) = v_4(t)/a_{43},\ |x_1(t) - \tilde{x}_1(t)| \le \overline{\alpha},\ t > T_1. \quad (9)$$

Полученный оценочный сигнал $\tilde{x}_1(t)$ вместе с заданием $g(t)$ поступает во второй контур – наблюдатель смешанных переменных, который строится как реплика виртуальной системы (3). Для оценивания переменной $e_5(t)$, по которой формируется обратная связь (4), достаточно построить наблюдатель 4-го порядка:

$$\dot{s}_i = -\bar{k}_i s_i + s_{i+1} + w_i, i = \overline{1,3};\ \dot{s}_4 = -\bar{k}_4 s_4 + w_4, \quad (10)$$

где s_i – переменные состояния наблюдателя, w_i – его корректирующие воздействия, $i = \overline{1,4}$. В силу (3), (10) относительно ошибок наблюдения $\chi_i = e_i - s_i$ получим систему

$$\dot{\chi}_i = -\bar{k}_i\chi_i + \chi_{i+1} - w_i, j = \overline{1,3};\ \dot{\chi}_4 = -\bar{k}_4\chi_4 + e_5 - w_4,$$

где $e_5(t)$ трактуется как внешнее ограниченное возмущение, в качестве ее оценки выступает корректирующее воздействие последнего уравнения $w_4(t)$. Отличие наблюдателя (10) от (5) и (8), где можно обеспечить любую заданную точность (9), состоит в том, что в виртуальном выходе $\tilde{x}_1(t) - g(t) = e_1(t) - \alpha(t)$ к полезному сигналу добавляется малый, но незатухающий паразитный сигнал $\alpha(t)$. Возможность его компенсации в контуре наблюдения отсутствует. Поэтому задача оценивания $e_5(t)$ формулируется следующим образом:

$$|\chi_i(t)| \le \beta,\ i = \overline{1,4},\ |e_5(t) - w_4(t)| \le \beta, t > T_2 > T_1,\ \beta > \overline{\alpha}, \quad (11)$$

а также обеспечивается выбором параметров $p_i, c_i = \mathrm{const} > 0$ кусочно-линейных корректирующих воздействий $w_i = p_i\mathrm{sat}(c_i w_{i-1}),\ i = \overline{1,4}$, где $w_0 = \tilde{x}_1 - g - s_1 = \chi_1 - \alpha(t)$.

Общая размерность двухконтурного наблюдателя (5) (или (8)) и (10) равна (или на один больше) размерности объекта управления (1)–(2). В замкнутой системе разрывное управление (4) с учетом (11) будет реализовано в виде $u = -k_5\mathrm{sign}w_4$, что при $t > T_3 > T_2$ приведет к возникновению реального скользящего режима в пограничном слое $|e_{5i}(t)| \le \beta$, что, в свою очередь, приведет к ошибке слежения в установившемся режиме $|e_1(t)| \le \beta/(\bar{k}_4\bar{k}_3\bar{k}_2\bar{k}_1), t > T_3$.

Заключение. Теоретические результаты подтверждены результатами моделирования. Вычислительные эксперименты показали, что при прочих равных в системе с бездатчиковым манипулятором показатели процесса слежения несколько хуже, чем в системе с бездатчиковым приводом, где регулируемые переменные измеряются. Представленный подход рекомендуется для систем, в которых не предъявляются жесткие требования к точности позиционирования.

Работа проводилась при частичной поддержке гранта РФФИ 20-01-00363а.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Краснов Д.В., Уткин А.В.** Синтез многофункциональной системы слежения в условиях неопределенности // Управление большими системами. 2017. Вып. 69. С. 29–49.

2. **Краснова С.А., Уткин В.А., Уткин А.В.** Блочный подход к анализу и синтезу инвариантных нелинейных систем слежения // Автоматика и телемеханика. 2017. № 12. С.26–53.
3. **Антипов А.С., Краснов Д.В., Уткин А.В.** Декомпозиционный синтез системы управления электромеханическими объектами в условиях неполной информации // Прикладная математика и механика. 2019. Т. 83. Вып. 4. С. 530–548.
4. **Spong, M.,** Modeling and control of elastic joint robots, ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1987, vol. 109, pp. 310–319.
5. **Краснова С.А., Сиротина Т.Г., Уткин В.А.** Структурный подход к робастному управлению // Автоматика и телемеханика. 2011. № 8. С. 65–95.

D.V. Krasnov, A.V. Utkin (V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow)

OBSERVERS OF STATES AND EXTERNAL INFLUENCES FOR AN ELECTROMECHANICAL CONTROL PLANT WITH A SENSORLESS MANIPULATOR

For a tracking electromechanical system under conditions of parametric and external disturbances, when the controlled variables of the mechanical subsystem are not measured and the sensors are located only on the drives, a two-circuit observer of states and mixed variables has been developed that does not require the construction of dynamic models of external influences.

МАТЕРИАЛЫ XXXII КОНФЕРЕНЦИИ ПАМЯТИ
ВЫДАЮЩЕГОСЯ КОНСТРУКТОРА ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ
Н. Н. ОСТРЯКОВА, 2020

Верстка *Е.А. Дубровская*

Государственный научный центр Российской Федерации АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
197046, С.-Петербург, ул. Малая Посадская, 30.
Тел. (812) 499-82-93, факс (812) 232 33 76,
e-mail: editor@eprib.ru
http://www. elektropribor.spb.ru