



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



МЕЖДУНАРОДНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
«АКАДЕМИЯ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ»



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ»



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ ГРУППА РОССИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО КОМИТЕТА
ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ

НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ

МАТЕРИАЛЫ
XXIV КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ

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

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

Санкт-Петербург
2022

Навигация и управление движением. Материалы XXIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием / Науч. редактор д.т.н., проф., член-корр. РАН О.А.Степанов / Под общ. ред. академика РАН В.Г.Пешехонова. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2022. 291 с. ISBN 978-5-91995-093-6

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

Конференция проходила 15 по 18 марта 2022 г. в ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». В сборник включены доклады, рекомендованные к опубликованию программным комитетом. Материалы конференции, начиная с первой конференции, которая состоялась в 1999 г., включены в базу Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

член-корреспондент РАН, д.т.н., проф. О.А. Степанов к.т.н. Ю.А. Литвиненко	– Председатель , АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
Andrei M. Shkel, Prof., PhD G. F. Trommer, Prof., PhD д.ф.-м.н. М.А. Барулина	– Заместитель председателя , АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург University of California, Irvine, USA Университет ИТМО, С.-Петербург
д.т.н., проф. А.А. Бобцов д.т.н., проф. А.М. Боронахин	Институт проблем точной механики и управления РАН, г. Саратов Университет ИТМО, С.-Петербург
к.т.н. Е.А. Депутатова к.т.н. Д.П. Елисеев	Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» Филиал ФГУП «НПЦАП» - «ПО «Корпус», Саратов АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
к.т.н. А.С. Ковалев к.т.н. А.С. Кремлев член-корреспондент РАН, д.ф.-м.н., проф. Н.В. Кузнецов к.т.н. А.В. Лопарев	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург Университет ИТМО, С.-Петербург Санкт-Петербургский государственный университет
д.т.н., проф. А.А. Пыркин	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
д.т.н., проф. В.Я. Распопов к.т.н. Д.О. Тарановский	Университет ИТМО, С.-Петербург
д.т.н., проф. Ю.В. Филатов	Тульский государственный университет
д.т.н., проф. И.Б. Фуртат	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
к.т.н. С.Ю. Шевченко	Институт проблем машиноведения РАН, Университет ИТМО, С.-Петербург
к.т.н. Е.В. Шевцова	Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

О.М. Яшникова	– Председатель , АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, С.-Петербург
С.Д. Пешехонова	– заместитель председателя , АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург
Л.Г. Кутлугульдина	– заместитель председателя , АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург
Н.Л. Гора	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
А.А. Зуева	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
Е.Н. Климова	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО
Е.Г. Литуненко	АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

СОДЕРЖАНИЕ

От программного и организационного комитетов XXIV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением»	9
---	---

СЕКЦИЯ 1. ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

М.В.Фещенко, К.А. Стожков Синтез модального регулятора с использованием метода Фаддева-Леверье	11
П.Я. Стронгин, Л. М. Яковис Робастные настройки регуляторов для многосвязных объектов на основе сверхустойчивости	14
К. А. Гордиевич, П.А. Коновалов Координация группы мобильных роботов при прохождении полосы препятствий в коридоро-подобной сцене	17
И.М. Белан Исследование нескомпенсированного реактивного момента космического аппарата при перенацеливании в зависимости от алгоритма разгона двигателя	20
Н. В. Пак Многоцелевая цифровая стабилизация маятника Фуруты	23
В.Г. Караулов, А.М. Грузликов Определение маршрута и скорости движения АНПА в задаче приведения к базовой станции	26
З. М. Абдуллаева, Д. И. Депутатова Выбор метода синтеза оптимального алгоритма управления движением судна	30
Я.В. Раудонис, И.В. Семенов, Д.В. Антонов Синтез регулятора для системы управления гиросtabilизатором гравиметра на волоконно-оптических гироскопах	32
И. Р. Гогорев Система косвенной гироскопической стабилизации линии визирования оптического прибора.....	36
В. В. Воробьев, К. Н. Калинин, А. А. Шуркова Разработка высокоточной следящей системы с интеллектуальным управлением	40

СЕКЦИЯ 2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

А. В. Мищенко, С. С. Поваров Моделирование работы прибора спутниковой навигационной системы с использованием конечных автоматов	44
Е.Г. Литуненко, Ю.М. Скородумов, М.В. Толмачева, Р.Л. Крючков Энергоэффективное планирование информационных обменов в сети автономных необитаемых подводных аппаратов.....	48
Е.Г. Литуненко, А.М. Грузликов, Ю.М. Скородумов Моделирование энергоэффективной сети подводных аппаратов	51
В. С. Быкова Моделирование системы управления автономного необитаемого подводного аппарата	55

А. Е. Панарин, Д. А. Мухин Мобильный гидроакустический имитатор морских целей	59
Т. Самсонова WI-FI устройство трансляции навигационных параметров для гидрометеорологических веб-приложений	62
Мясников М.Р. Авторская модель оценки стоимости программных продуктов SCENERY	65
Козлов А.С., Тулаев А.Т., Костыгов Д.В., Беляев Я.В. Разработка каскадного сигма-дельта аналого-цифрового преобразователя	68
К.А. Насеткин Комплексный подход к созданию радиационно-стойкой аппаратуры	71
П.А. Коновалов, И.Ю. Широколов Учебно-исследовательский стенд для апробации мультиагентных робототехнических систем на базе конструктора ТРИК	74
А. В. Рыбалко Управление перемещением робота ТРИК с помощью одометрии	77
А. Р. Сагатдинов Реализация простейшей системы круиз-контроля для робота ТРИК	80
М.Ю. Лаврухин, Т.И.Амирханов Реализация системы обхода препятствия на роботе ТРИК	82

СЕКЦИЯ 3. ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИБОРОВ НАВИГАЦИИ

А. В. Смирнова, С. В. Варжель, В. Е. Стригалев Исследование способов стабилизации оптических параметров фазового модулятора путем подавления пироэлектрического эффекта	85
Д.А. Михайленко Оптимизация топологии встречно-штыревого преобразователя кольцевого волнового резонатора на поверхностных акустических волнах	88
И. С. Пестерев, А. К. Батанов, А. В. Гаринков, А. А. Кузьмин Разработка и применение широкополосного гидроакустического звукопоглощающего экрана	91
Е.Э. Калугин, А.Б. Мухтубаев, И.К. Мешковский Исследование влияния герметизации стеклоприпоем на значение коэффициента поляризационной экстинкции в двулучепреломляющем оптическом волокне	94
Н. С. Каранин, О. С. Юльметова Формирование объемной структуры чувствительного слоя микромеханического акселерометра	97
Г. М. Шубин, Д. В. Сафронов Формирование топологий навигационных сенсоров на поверхностных акустических волнах при помощи лазерного излучения	100
А. Д. Казакова Моделирование разъюстировки угловых шкал из метаповерхностей	103
М.А. Власова, А.Н. Шевченко Перспективы применения технологий микроэлектроники и микромеханики для изготовления газовых ячеек прецизионных приборов квантовой электроники	107
О. Ю. Черняева, А. Н. Никонов Компьютерное моделирование автоматизированной системы управления технологическим процессом на базе симулятора промышленного логического контроллера	111

СЕКЦИЯ 4. ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Д.В.Антонов, И.В.Семенов Выбор критерия при решении задачи управления углом наклона оптической глиссады	114
В. В. Богомолов Оценка эффективности нелинейных навигационных решений по разномоментным измерениям дальности до гидроакустических маяков	120
А.М. Исаев Сравнительный анализ субоптимальных алгоритмов оценивания при наличии нелинейности полиномиального типа в измерениях	124
Н. Г. Скиданов, А. В. Бездетко О формировании измерений при решении задачи векторной гравиметрии инерциально-геодезическим методом	129
В. А. Васильев Отбраковка измерений гравиметра с двойной кварцевой упругой системой.....	133
К. В. Дунаевская Исследование метода вычисления текущей характеристики точности в задаче навигации по полю микрорельефа	137
Д.Р. Ужва «Опознавание по сжатию» разреженных магнитометрических данных	140
В. А. Ерофеева, А. Н. Сергеев, М. Б. Турсунова Ускоренный рандомизированный алгоритм стохастической аппроксимации для задачи трекинга.....	143
В. В. Прокопович Модель траекторного сопровождения в гидроакустической станции.....	146
Д. А. Добриков, А. В. Шафранюк Программа имитации распространения сигналов гидроакустической связи	150
Д. А. Добриков, А. В. Шафранюк Имитация режима освещения ледовой обстановки	153
И. С. Налбат, В. С. Мельканович Визуализация трехмерных данных обзора пространства на экране монитора с использованием цветовой кодировки.....	157
В. В. Прокопович Модель классификации наблюдаемых объектов в гидроакустической станции	159
И. С. Налбат, В. С. Мельканович Технологический программный комплекс для отработки методики оценки параметров антенных устройств с использованием измерительного координатного устройства	162
Б.Х. Нгуен Управление многоканальными линейными объектами с гарантией нахождения регулируемых переменных в заданных множествах	164

СЕКЦИЯ 5. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

П. В. Абрамов, Е. А. Келлер, А. П. Бондарчук Кинематика мобильного робота с полным приводом и полным управлением	167
Д. П. Михайлов, А. А. Ким, А. Н. Лукичев, С. А. Гринишена Тормозная система автономного транспортного средства	170

Н. В. Орлова, А. В. Дроздова Информационно-измерительная система оценки состояния железнодорожного пути. Метрологическое сопровождение	173
Э. Д. Чуряев, А.В. Большакова, Р.В. Шалымов, Нгуен Чонг Иен Алгоритм поиска коротких дефектов поверхности катания рельса по показаниям акселерометров с не эквидистантной пространственной записью	175
В. В. Воробьев, К. Н. Калинин, А. А. Шуркова Разработка методики динамических испытаний высокоточной системы управления движением	179
И. А. Токарева, А. В. Царёва Выбор компонентов измерительного модуля системы оценки техники восстановления навыка ходьбы	182
А.Ю. Федоринов, В.В. Перлюк Разработка системы управления движением малых космических аппаратов в группе на основе методов имитационного моделирования	184
М.С. Щербаков, С.А. Медведев Подход к поддержанию инспекционного движения с помощью одноимпульсной программы управления в условиях нормального поля притяжения Земли	186
А. Ю. Толстоногов Метод оценки скорости набегающего потока на основе анализа изменения параметров работы маршевых движителей подводного аппарата	189
А. Ю. Толстоногов Метод анализа эффективности движительно-рулевого комплекса подводного аппарата	192
СЕКЦИЯ 6. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ	
А. А. Аристов, М. А. Епринцев Применение алгоритма «efficient-perspective-n-points» при использовании оптического метода определения пространственной ориентации микроспутников в группе	195
Н.А. Моряков, А.А. Кумарин Разработка метода определения ориентации космического аппарата по видимости навигационных спутников	199
А.А. Кумарин, А.Н. Соборницкая Оценка применимости магнитной системы ориентации на аппаратах формата POCKETCUBE	202
К.С. Лельков Комплексная навигационная система наземного колёсного робота	205
М.А. Коршунов Начальная настройка системы наземной навигации по цифровой карте дорог с применением алгоритма динамической трансформации временной шкалы	210
СЕКЦИЯ 7. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ	
Е.Д. Иванова Влияние неортогональности силовых осей на движение электростатического гироскопа	214
М. А. Сорвина Исследование концентрической топологии для применения в чувствительных элементах инерциальных датчиков на поверхностных акустических волнах	217
Н. А. Быстрова Распределение упругих смещений и механических напряжений сверхширокополосного пластинчатого пьезопреобразователя	220
Д.А. Олейник, Г.М. Гуляев, В.И. Гупалов Принципы построения прецизионных пьезоэлектрических акселерометров кажущегося ускорения	223

Е. А. Якушина Проектирование и оптимизация синхронного гистерезисного гидродвигателя	226
Д.А.Гонтарь, Е.В.Драницына Сравнение эффективности различных методов машинного обучения при построении температурной компенсации волоконно-оптического гироскопа	228
Е. Н. Климова, Е.В. Драницына Верификация коэффициента экранирования магнитного экрана по данным волоконно-оптического гироскопа	231
Т.М. Ахмадиев Влияние параметров резонатора на характеристики резонаторного гироскопа с модулятором Маха-Цендера	235
Д. Г. Гилев, В. В. Криштоп Метод аппроксимации резонансного пика для минимизации шума датчика угловой скорости	238
В.В. Чалков, А.Н. Шевченко Исследование причин нестабильности масштабного коэффициента ядерного магнитного гироскопа	241
А. С. Завитаев Анализ источников погрешностей ядерного магнитного гироскопа при механических воздействиях.....	245
М. В. Степченко, И. Ю. Волошин Определение путей создания маятниковых акселерометров с использованием технологии микрообработки кремния	248
Ч. И. Нгуен, К. Х. Нгуен, А. В. Большакова Алгоритм калибровки микроэлектромеханических инерциальных датчиков	252
М.В. Цыганков, М.В. Салогуб, М.В. Федоров Разработка конструкции чувствительного элемента трехосевого микромеханического акселерометра	255
Мальцева П.А., Стяжкина А.В., Тулаев А.Т., Шарагина Н.С., Беляев Я.В. Методика оценки параметров механического резонатора с учетом экспериментальных исследований	258
Н. В. Можгова Модель микромеханического модально-локализованного акселерометра с чувствительным элементом в виде балки с начальной погибью	261

СЕКЦИЯ 8. НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ В ШКОЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ

П. А. Коновалов, А. Д. Мещеряков Оптимальное управление роботами в идеальных и неидеальных условиях	265
О. А. Карюков, П. А. Коновалов Алгоритмы управления роботами, играющими в футбол.....	266
Ю. С. Глазов, П. А. Коновалов Алгоритмы построения прогнозов в задачах футбола роботов.....	267
А.В. Балакирский, К.А.Синцов Решение задачи навигации и управления lego-роботом по различным ориентирам.....	268
Г. Н. Филиппов Особенности алгоритма оптимального прохождения маршрута прототипом автономного надводного аппарата.....	269
А.Г. Черняев, С.Ю. Уливанов Разработка устройства измерения силы тока, потребляемого аппаратами формата CANSAT.....	270
Р.В. Карвовский, И.А. Зотов Разработка мультисенсорной системы мониторинга различных параметров окружающей среды.....	274

Е.С. Скурихин, М.А. Танасий Фильтрация методом Калмана измерений инерциальных датчиков	275
--	-----

СЕКЦИЯ 9. ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ

С.М. Тарасов, В.В. Цодокова Сравнительный анализ алгоритмов калибровки датчика угла азимутального привода астрономического универсала по наблюдениям звезд	276
В. П. Наумченко, П. А. Илюшин, Д. Г. Пикунов Способ определения начальных углов ориентации инерциальных измерительных блоков	281
Е. А. Попов, Г. Ю. Киряченко, Ю. Г. Егоров Исследование программ инвариантной калибровки векторного измерителя	284
Е. Б. Амбросовская, Д. В. Калимов Датчик типа “натянутый трос” в системе динамического позиционирования – анализ натуральных данных, определение характера погрешности	287
Статистика конференций	290

**ОТ ПРОГРАММНОГО И ОРГАНИЗАЦИОННОГО КОМИТЕТОВ
XXIII КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ»**

С 15 по 18 марта 2022 г. в ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» состоялась XXIV конференция молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием. Конференция проводится при активном участии Международной общественной организации «Академия навигации и управления движением» (МОО «АНУД»), Университета ИТМО, Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербургской группы Российского национального комитета по автоматическому управлению. Информационная поддержка конференции осуществлялась журналами «Гироскопия и навигация», «Мехатроника, автоматизация, управление», «Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики».

Конференция прошла в смешанном формате, сочетающем очное и дистанционное участие докладчиков и слушателей. Сотрудники АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» принимали участие очно, остальные российские и иностранные участники – дистанционно в сети Интернет.

В работе XXIV конференции приняли участие 250 человек. В программу конференции было включено 102 доклада, из которых заслушано 97. Участники представляли 34 организации из 12 городов и административных районов России: Санкт-Петербурга, Москвы, Перми, Самары, Тулы, Серпухова, Томска, Владивостока, Екатеринбурга, Симферополя, Коврова, Жуковского и из 6 стран: России, Вьетнама, Казахстана, Республики Беларусь, Республики Таджикистан, Нигерии.

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

1. «Проблемы навигации мобильных роботов при коммуникационных ограничениях», представленная профессором кафедры теоретической кибернетики математико-механического факультета СПбГУ, д.ф.-м.н. А.С. Матвеевым;
2. «Инерциальные микро-электромеханические системы», представленная директором Института нано- и микросистемной техники НИУ «МИЭТ» д.т.н., профессором С.П. Тимошенковым;
3. «Создание интеллектуальных робототехнических систем различного назначения и их использование при решении сложных практических задач», представленная заведующей кафедрой автоматизации и управления Дальневосточного федерального университета д.т.н., профессором В.Ф. Филаретовым.

Доклады на XXIV конференции были распределены по 9 секциям:

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

Традиционно в рамках конференции была организована секция «Навигация и управление движением в школьных проектах», неизменно вызывающая значительный интерес у участников. В этом году в рамках секции с докладами выступили учащиеся 8–11 классов из Санкт-Петербурга, Самары и Симферополя.

В очередной раз в рамках конференции прошло собрание секции молодых ученых МОО «АНУД» в формате круглого стола, который был посвящен теме «Инженерные кадры настоящего и будущего». Состоялись три выступления, которые подготовили члены АНУД, чья деятельность непосредственно связана с учебным процессом в университетах. Состоялись выступления: декана факультета информационно-измерительных и биотехнических систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ» д.т.н., профессора А.М. Боронахина, декана факультета систем управления и робототехники Университета ИТМО д.т.н., профессора А.А. Пыркина и начальника научно-образовательного центра АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» члена-корреспондента РАН О.А. Степанова. Все выступления вызвали значительный интерес и сопровождались дискуссией. Опыт проведения собрания секции молодых ученых МОО «АНУД» в рамках конференции был признан успешным, а организация аналогичных собраний на последующих конференциях – целесообразной.

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

- премия имени д.т.н., проф. С.Ф. Фармаковского была вручена Е.А. Попову (ООО «НПП «ИТЭЛМА», Москва) за доклад «Исследование программ инвариантной калибровки векторного измерителя», подготовленный с соавторами Г.Ю. Киряченко (АО «ЦНИИИАГ», Москва) и Ю.Г. Егоровым (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва);
- премии имени д.т.н., проф. Л.П. Несенюка удостоен В.В. Прокопович (ЦНИИ «Электроприбор») за доклад «Модель траекторного сопровождения в гидроакустической станции»;
- премия имени д.т.н. А.С. Анфиногенова – И.С. Пестереву (ЦНИИ «Электроприбор») (соавторы: А.К. Батанов, А.В. Гаринков, А.А. Кузьмин, ЦНИИ «Электроприбор») за доклад «Разработка и применение широкополосного гидроакустического звукопоглощающего экрана».

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

- дипломами I степени – 8 участников;
- дипломами II степени – 6;
- дипломами III степени – 8;
- дипломами за лучший студенческий доклад – 6;
- дипломами за лучший школьный доклад – 2.

Лучшие доклады, рефераты которых опубликованы в настоящем сборнике, рекомендованы для участия в Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам или для публикации в журналах, входящих в перечень ВАК и оказывающих информационную поддержку конференции. В настоящий сборник включено 90 докладов молодых ученых.

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

СЕКЦИЯ 1. ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.51

М.В.ФЕЩЕНКО, К.А. СТОЖКОВ
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»)

СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ФАДДЕВА-ЛЕВЕРЬЕ

Представлена программа расчёта модальных регуляторов для аналоговых и цифровых систем управления с одним входом на основе метода Фаддеева-Леве́рье, разработанная в приложении AppDesigner среды MATLAB. Приведены результаты работы программы.

Введение. Главной задачей синтеза системы автоматического управления (САУ) с модальным управлением является нахождение вектора коэффициентов обратных связей, которые обеспечивает требуемые корни или коэффициенты характеристического полинома замкнутой системы [1]. В широко используемой среде MATLAB имеются стандартные функции `acker` и `place` из пакета `ControlSystemToolbox` для численного решения поставленной задачи. Функция `acker`, использующая формулу Аккермана [2], предназначена для систем с одним управляющим входом (SingleInputMultipleOutput – SIMO). Функция `place`, основанная на методе правых собственных векторов [3], применяется к системам и с одним, и с несколькими управляющими входами (MultipleInputsMultipleOutput – MIMO) [4]. Корректная работа представленных функций возможна при полной управляемости системы управления и заданном векторе корней желаемого характеристического полинома, полученном на основе стандартных форм, описанных в [1, 5].

Описание алгоритма. В работах [6, 7] рассматривается алгоритм синтеза модальных регуляторов методом Фаддеева-Леве́рье для непрерывных и цифровых САУ. Целью настоящей работы является программная реализация данного алгоритма для систем с одним управляющим входом. Программа разработана в приложении AppDesigner среды MATLAB.

Схожесть всех алгоритмов заключается в приведении корней характеристического уравнения замкнутой системы к желаемому виду, определяемому выбором стандартного полинома. Однако реализованный в данной работе алгоритм синтеза имеет значительные отличия, описанные в [6, 7]. В соответствии с этим алгоритмом, была разработана `m`-функция `fad_lev_Q` для расчёта коэффициентов модальных регуляторов на основе метода Фаддеева-Леве́рье в среде MATLAB, листинг которой представлен на рис. 1.

```
function [Koc] = fad_lev_Q(A,B,pdm,n) %Функция алгоритма Фаддеева-Леве́рье
I = eye(n);
[R{1:n}] = deal(A);
[Q{1:n}] = deal(I);
f = ones(1,n+1);
for k = 2:n+1
    f(k) = -trace(R{k-1})/(k-1);
    Q{k} = (R{k-1}+f(k)*I);
    R{k} = A*Q{k};
end
L = [];
E = [];
for j = 2:n+1
    L = [L Q{1,j-1}*B];
    E = [E pdm(j)-f(j)];
end
Koc = E*inv(L); %Коэффициенты модального регулятора
end
```

Рис. 1. Листинг функции `fad_lev_Q` для расчёта коэффициентов модальных регуляторов на основе метода Фаддеева-Леве́рье

Параметрами функции являются: матрицы системы A и B , вектор-строка коэффициентов желаемого характеристического полинома pdm и порядок системы n . В результате, функция возвращает вектор-столбец коэффициентов модального регулятора K_{oc} .

Разработка графического интерфейса. Используя методики, описанные в [8], для предлагаемого выше алгоритма расчёта коэффициентов модального регулятора в приложении AppDesigner среды MATLAB была разработана программа синтеза систем с одним входом и модальным управлением, реализованная в виде графического интерфейса, представленного на рис. 2.

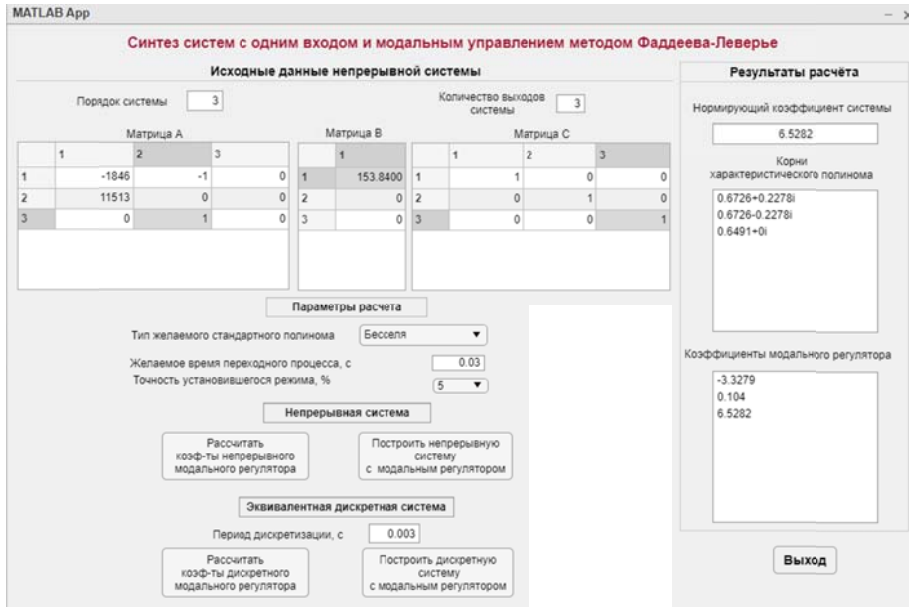


Рис. 2. Графический интерфейс программы синтеза систем управления с одним входом и модальным управлением методом Фаддеева-Леверье

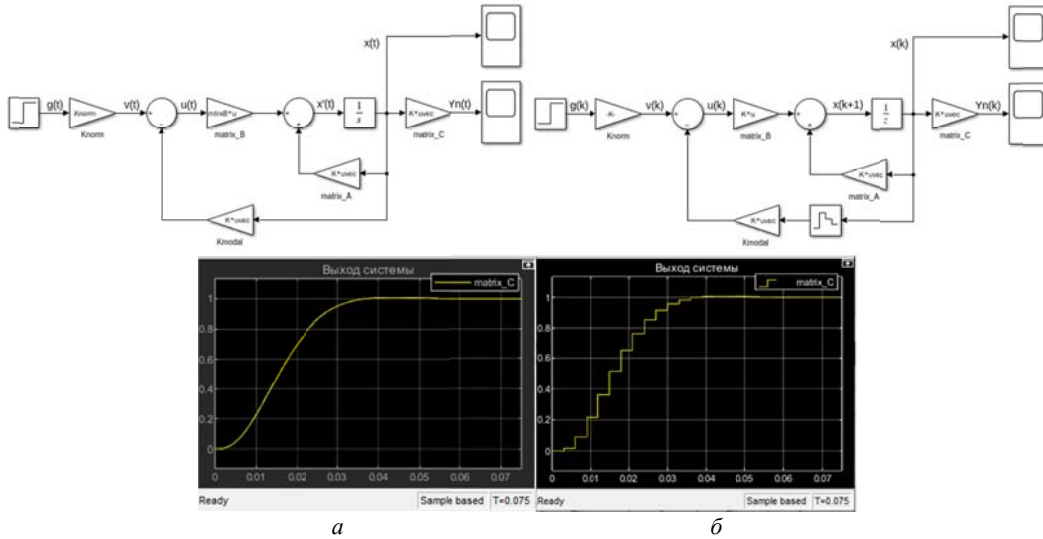


Рис. 3. Simulink-модели и результаты моделирования: а–непрерывной; б–цифровой САУ с модальным регулятором

При запуске программы пользователь вводит данные исходной непрерывной системы (порядок системы n , количество выходов y , матрицы A , B и C), выбирает тип желаемого характеристического полинома из группы стандартных (Ньютона, Баттерворта или Бесселя), точность установившегося режима ($\sigma = 2\%$, 5%) и требуемое время переходного процесса ($t_{пп}$), а на выходе получает, с помощью нажатия соответствующей выделенной области (стилизованные кнопки на рис. 2), коэффициенты модального регулятора (K_{oc}) непрерывной, либо дискретной

системы с выбранным периодом дискретизации (T). Расчеты для непрерывной или дискретной системы выполняются независимо.

Программа выводит результаты расчёта в окно результатов (область на рис. 2, справа), а также в командное окно MATLAB в виде подробного отчёта. Кроме выполнения расчетов в программе разработаны функции построения непрерывной и дискретной Simulink-моделей систем с модальным регулятором, которые выполняются при нажатии соответствующих областей (стилизованные кнопки на рис. 2). Созданные модели систем автоматически загружаются в среду Simulink, в которой, после симуляции, можно наблюдать переходные процессы как по выходной переменной y_n (рис. 3), так и по каждой переменной состояния $x_{i=1,n}$. В дальнейшем эти модели можно использовать в качестве подсистем при проектировании более сложных моделей и ряда других задач проектирования.

Заключение. Результатом работы является разработанная программа графического интерфейса пользователя, выполняющая синтез модальных регуляторов на основе метода Фаддеева-Леверье, созданная в приложении AppDesigner среды MATLAB и предназначенная как для непрерывных, так и для цифровых САУ. Разработанная функция `fad_lev_Q` дополняет встроенные стандартные функции `acker` и `place`, расширяя инструментарий синтеза модальных регуляторов. Дополнительно, на основе представленной программы, разработана ее версия для открытой системы GNUOctave[9].

ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев В.В., Журавлёва Н.В., Лукьянова Г.В., Сергеев К.А. Синтез систем автоматического управления методом модального управления. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007, 108 с.
2. Zubov N.E., Vorob'eva E.A., Mikrin E.A., Misrikhanov M.Sh., Ryabchenko V.N., Timakov S.N. Synthesis of Stabilizing Spacecraft Control Based on Generalized Ackermann's Formula. Journal of Computer and Systems Sciences International, 2011, vol. 50, no. 1, pp. 93–103.
3. Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н. Матричные методы в теории и практике систем автоматического управления летательных аппаратов. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016, 672 с.
4. Лапин А.В., Зубов Н.Е. Реализация в среде MATLAB аналитических алгоритмов модального управления по состоянию и по выходу. Инженерный журнал: наука и инновации, 2020, вып. 1., С. 1-16.
5. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М, «Машиностроение», 1976, 184 с.
6. Голик С.Е., Никоца А.В. Алгоритмы модального управления для микропроцессорных систем. Л.: Известия ЛЭТИ, вып. 354, 1985.
7. Петухова М.С., Криц А.А., Миронюк А.В., Голик С.Е. Метод расчета коэффициентов модального регулятора с использованием алгоритма Фаддеева-Леверье. Перспективы развития науки и образования: сборник научных трудов по материалам XIX международной научно-практической конференции, 31 июля 2017 г./Под общ. ред. А.В. Туголукова – Москва: ИП Туголуков А.В., 2017, С. 93-95.
8. Никоца А.В., Филатова Е.С. Основы разработки систем управления в среде MATLAB: метод. указания к практ. занятиям по дисц. «Проектирование систем в среде MATLAB». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015, 84 с.
9. Голик С.Е., Никоца А.В., Фещенко М. Программа расчета модального регулятора для одномерных непрерывных и цифровых систем управления с использованием алгоритма Фаддеева-Леверье. Св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022614709 от 24.03.2022.

УДК 662.642:621.926.7

П.Я. СТРОНГИН, Л. М. ЯКОВИС

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

РОБАСТНЫЕ НАСТРОЙКИ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ МНОГОСВЯЗНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕСВЕРХУСТОЙЧИВОСТИ

Работа посвящена исследованию методов робастной настройки типовых регуляторов для многосвязных динамических объектов с параметрической неопределенностью. Показано, каким образом на основе робастных интегральных регуляторов, рассчитанных применительно к статическим объектам, можно сформировать робастные настройки регуляторов разного типа для многосвязных динамических объектов управления.

Введение. Вследствие повышения требований к современным системам управления все большее практическое значение приобретает задача робастного управления [1]. Речь идет о поиске таких постоянных настроек регулятора, которые обеспечивают приемлемое качество управления при любых возможных значениях параметров математической модели объекта управления. Определение робастных настроек типовых регуляторов (интегральные (И), пропорционально-интегральные (ПИ), пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы [2]) для многомерных объектов с перекрестными связями, динамические модели которых содержат различные запаздывания по каналам управления [3], представляет собой сложную задачу [1]. В данной работе предлагается метод решения, базирующийся на свойстве сверхустойчивости замкнутой системы управления.

Формализованная постановка задачи и методика приближенного решения. Рассматривается система управления, которая характеризуется вектором параметров модели объекта D и вектором параметров регулятора F . Заданы показатель качества управления (например, интегральный квадратичный критерий, характеризующий переходный процесс в замкнутой системе при действии ступенчатого возмущения) $J = \varphi(D, F)$, а также область возможных значений неизвестных параметров объекта управления $D \in G$ (например, интервалы возможных значений каждого параметра модели объекта управления [4]). Тогда робастные настройки регулятора F_r , обеспечивающие оптимальное (для определенности наименьшее) значение показателя J «в худшем случае» могут быть найдены в результате решения минимаксной задачи определения

$$J_{\min \max} = \min_F \max_{D \in G} \varphi(D, F). \quad (1)$$

Пусть уравнения системы «объект – регулятор», записанные с помощью передаточных функций в векторно-матричной форме, имеют вид

$$y = H(p) u + n, \quad u = W(p) (y^* - y),$$

что соответствует блок-схеме, приведенной на рис. 1.

Далее конкретизируем задачу, приняв, что динамика по каналам передачи управляющих воздействий u описывается распространенной в автоматике моделью с самовыравниванием

$$H(p) = [h_{ij}(p)], \quad h_{ij}(p) = \tilde{h}_{ij}(p) e^{-p\tau_{ij}}, \quad i = \overline{1, l}, \quad j = \overline{1, m}, \quad (2)$$

где $\tilde{h}_{ij}(p)$ и τ_{ij} – соответственно устойчивые передаточные функции и запаздывания.

Будем полагать, что для управления по отклонению используются ПИД-регуляторы

$$W(p) = [w_{ji}(p)], \quad w_{ji}(p) = a_{ji} + b_{ji}/p + c_{ji}p, \quad i = \overline{1, l}, \quad j = \overline{1, m}$$

и задача состоит в настройке их параметров a_{ji}, b_{ji}, c_{ji} . Если же интересует применение И-регуляторов или ПИ-регуляторов, то соответствующие параметры a_{ji} или (и) c_{ji} полагаются равными нулю.

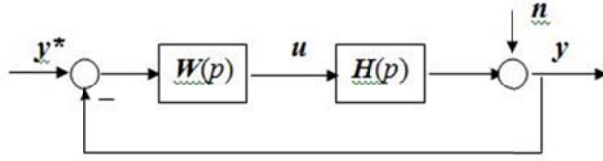


Рис.1. Блок-схема системы управления

Суть предлагаемого метода заключается в том, что приближенное решение сложной задачи (1) ищется в два этапа. На первом этапе рассматривается задача робастного управления статическим объектом, модель которого задается матрицей статических коэффициентов усиления исходного объекта $K = H(0)$. Решение этой задачи ищется в классе многомерных И-регуляторов $W(p) = B/p$, обеспечивающих свойство сверхустойчивости замкнутой системы управления. Условия сверхустойчивости, то есть экспоненциальной сходимости к нулю нормы вектора выходных переменных $\|y(t)\| = \max_{1 \leq i \leq l} |y_i(t)|$, состоят в требовании диагональной доминантности матрицы $A = KB$ и имеют вид

$$\sigma(A) = \sigma = \min_{1 \leq i \leq l} \left\{ a_{ii} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^l |a_{ij}| \right\} > 0. \quad (3)$$

Принимая, без потери общности, для модели в отклонениях $y^* = 0$, можно показать, что при выполнении условий (3) имеет место монотонное убывание нормы вектора выходных переменных $\|y(t)\| \leq \|y(0)\| \exp(-\sigma t)$, что соответствует смыслу достаточно осторожного управления в условиях значительной неопределенности. Если в качестве критерия эффективности управления принять максимум запаса сверхустойчивости

$$J(K, B) = \sigma(A)|_{A=KB} = \sigma(A),$$

то задача робастного управления статическим объектом сводится к определению

$$-\sigma^{\max} = \min_B \max_K \{ -\sigma(KB) | K \in G_K \}.$$

Путь практического решения этой, вообще говоря, сложной задачи может лежать через дискретизацию, то есть замену непрерывного множества G_K возможных значений элементов матрицы K конечным множеством принадлежащих G_K точек $K_n, n = \overline{1, N}$. Можно показать, что таким образом задача может быть сведена к задаче линейного программирования [5], в результате решения которой определяются параметры $\tilde{B} = [\tilde{b}_{ij}]$ многомерного робастного И-регулятора для статического объекта.

На втором этапе приближенного решения применительно к исходному объекту управления (2) методами компьютерного имитационного моделирования поисковым путем определяются единые для всех каналов управления параметры a, b, c многомерного ПИД-регулятора $W(p) = (a + b/p + cp)\tilde{B}$, дающие приближенное решение задачи (1) в рассмотренном выше дискретном варианте. Существование решения, гарантирующего устойчивость замкнутой системы управления для всех возможных значений параметров объекта управления, следует из общих результатов работы [6].

Заключение. Предложен метод робастной настройки типовых регуляторов для многосвязных динамических объектов с запаздыванием и параметрической неопределенностью. В дальнейшем предполагается продолжить проверку эффективности

разработанного метода средствами компьютерного моделирования для различных практических задач управления.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Поляк Б.Т., Щербаков П.С.** Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2007. 303с.
2. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2004, 400 с.
3. **Рей У.** Методы управления технологическими процессами. М.: Мир, 1983. 368 с.
4. **Жолен Л., Кифер М., Дидри О., Вальтер Э.** Прикладной интервальный анализ. М.:Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 468 с.
5. **Юдин Д. Б., Гольштейн Е. Г.** Линейное программирование. М.: Наука, 1969. 424 с.
6. **Маркечко М.И., Рыбашов М.В.** Оптимизация квазистационарного режима в линейных системах // Автоматика и телемеханика. №12, 1987., С. 55 – 65.

P.Y.Strongin, L.M.Yakovis, (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg). **Robastic Settings of Regulators for multiply Objects based on Superstability**

The work is devoted to the study of methods for robust tuning of typical controllers for multiply connected dynamic objects with parametric uncertainty. It is shown how, on the basis of robust integral controllers calculated for static objects, it is possible to form robust settings for controllers of various types for multiply connected dynamic control objects.

.УДК 681.5

К. А. ГОРДИЕВИЧ

(Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург)

П.А. КОНОВАЛОВ

(СПбГУ, Институт проблем машиностроения РАН, Санкт-Петербург)

КООРДИНАЦИЯ ГРУППЫ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ПОЛОСЫ ПРЕПЯТСТВИЙ В КОРИДОРО-ПОДОБНОЙ СЦЕНЕ¹

Представлен алгоритм управления однородной группой автономных мобильных роботов, обеспечивающий формирование плотного барьера поперек коридора и прохождение полосы препятствий в коридоре с последующим восстановлением исходной формации.

Введение. Управление однородными группами мобильных роботов является бурно развивающейся областью робототехники. В работе рассматривается задача автономной самоорганизации группы мобильных роботов в плотный барьер поперек коридоро-подобной сцены с последующим прохождением коридора полученной формацией. Подобные задачи представляют интерес для разведки территорий, автоматического разминирования, экологического мониторинга, обработки протяженных поверхностей, поиска источников загрязнений или целевых объектов, спасательных операций и др. В контексте этих приложений типично наличие препятствий в коридоре, в связи с чем требуются алгоритмы, сочетающие безопасность движения с разумным приближением к основной цели миссии. В работе предложены алгоритмы такого рода и представлены результаты их верификации.

Литература по заматающему покрытию областей группами роботов в основном посвящена геометрическому и комбинаторному аспектам проблемы (планирование маршрутов и распределение по ним роботов) и как правило предполагает подробное знание сцены; здесь популярны методы, основанные на сеточной аппроксимации или клеточном разбиении рабочей зоны. Соответствующие алгоритмы часто вычислительно затратны и практикуют элементы централизованного принятия решений. В работе предложен вычислительно экономичный децентрализованный алгоритм, опирающийся на минимальные знания сцены и команды.

Постановка задачи. Команда из $N \geq 2$ роботов должна в автономном режиме равномерно распределиться поперёк коридора (часть плоскости, ограниченная двумя параллельными линиями) и пройти его, избегая столкновений с препятствиями, границами коридора и друг с другом. Часть коридора, содержащую препятствия, назовём *полосой препятствий*. Роботы должны достичь общей заданной скорости $v_*, > 0$, расположиться на подвижном отрезке, перпендикулярном границам коридора, и равномерно распределиться по ширине коридора. Такая формация может разрушаться в процессе прохождения полосы препятствий, но после ее прохождения должна автоматически восстанавливаться. Роботы не имеют средств связи, не различают друг друга и не способны выполнять разные ролевые функции в команде. Соответственно, требуется децентрализованная стратегия управления, при которой все роботы подчиняются единому правилу. Роботы не знают размер N команды и ширину коридора w . Каждый робот имеет доступ к направлению коридора и может определять расположение объектов, в том числе препятствий и границ коридора, в пределах конечного диапазона видимости $R_{vis} > 0$.

Модель робота. Используем декартову систему отсчета, в которой границы коридора задаются уравнением $y = \frac{w}{2}$, а ось X направлена в желаемом направлении движения вдоль коридора. Рассматриваем роботов, динамика движения которых, описывается следующей стандартной кинематической моделью [1]:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix}, \quad (1)$$

¹ Научный руководитель: д-р физ.-мат. наук, профессор Алексей Серафимович Матвеев

где: x, y – координаты характерной точки робота; θ – угол его ориентации. Управление осуществляется выбором линейной v и угловой ω скоростей.

Децентрализованный алгоритм управления группой роботов. Он использует базовый алгоритм и состоит в выполнении нескольких протоколов, переключение между которыми производится при выполнении определённых условий.

Базовый алгоритм обеспечивает перемещение робота в заданную целевую точку, генерируя соответствующие управления v и ω . Он реализован как ПД-регулятор, где в качестве входа выступает расстояние между роботом и целью, а также разность между углом ориентации робота и направлением на цель. Даны рекомендации по настройке параметров регулятора.

Протокол 1 играет ключевую роль в равномерном распределении роботов вдоль общего подвижного отрезка поперек коридора. Он следует идее правила ближайших соседей [2] и для i -го робота рассматривает его “фиктивного двойника” с упрощенной кинематикой $\dot{r}_i = v_i, r_i = [x_i, y_i], v_i = [v_i^x, v_i^y]$, управляемого согласно следующим правилам:

$$v_i^x(t) := v_{\rightarrow} + \frac{1}{|N_i(t)|} \sum_{j \in N_i(t)} Y[x_j(t) - x_i(t)], \quad v_i^y(t) := \Xi[d_{i,\delta}^+(t)] - \Xi[d_{i,\delta}^-(t)], \quad (2)$$

$$d_{i,\delta}^{\pm} := \begin{cases} \min_{j \in J_{i,\delta}^{\pm}} \pm(y_j - y_i) & \text{если } J_{i,\delta}^{\pm} := \{j \neq i: \pm(y_j - y_i) \geq 0, \\ & R_{vis} > \|r_j - r_i\|, |x_j - x_i| < \delta\} \neq \emptyset, \\ |\pm w - y_i|, & \text{если } J_{i,\delta}^{\pm} := \{j \neq i: \pm(y_j - y_i) \geq 0\}, \\ R_{vis}, & \text{в противном случае} \end{cases}, \quad (3)$$

где $\delta > 0$ – параметр алгоритма; Y, Ξ –возрастающие функции; N_i – множество, формируемое определенным образом из видимых соседей, которые - близки по оси X к i -му роботу; $d_{i,\delta}^{\pm}$ – расстояние до ближайшего правого/левого элемента N_i . Позиции “двойника” в моменты времени, кратные выбранному шагу, образуют последовательность целевых точек “истинного” робота. Теоретически доказано, что при определенных условиях и при отсутствии препятствий протокол 1 обеспечивает асимптотическое достижение цели управления.

Протокол 2 обход препятствий включается, если расстояние до ближайшего препятствия в переднем секторе робота меньше заданного расстояния D_{safe} . Для обхода препятствий использован алгоритм (включающий правило выхода из режима обхода) из работы [3].

Протокол 3 прохождения узких мест включается, если расстояние между левым и правым препятствиями (к которым относим и стенки коридора) становится меньше C_w :

$$C_w := |N_i(t)| \cdot (D_{safe} + L), \quad (4)$$

Где L –ширина робота.

Если i -ый робот является крайним сверху (имеет наибольшую из всех роботов координату y), то есть выполнено условие:

$$y_i - y_j > 0 \quad \forall j \in N_i(t), \quad (5)$$

то он пропускает вперёд своего ближайшего соседа снизу и начинает следовать за ним. Аналогично происходит, если робот является крайним снизу (то есть имеет наименьшую из всех роботов координату y). Когда ширина коридора снова станет достаточно большой, то снова включается протокол 1. Если коридор продолжает сужаться, то роботы выстраиваются друг за другом в цепочку. При возникновении конфликтных ситуаций, например, ширина прохода позволяет пройти только одному, приоритет на действия всегда отдаётся верхнему, то есть роботу с большей координатой y .

Протокол 4 предотвращения разбегания роботов по оси X после прохождения полосы включается, если средняя скорость по оси X i -го робота меньше желаемого значения v_{\rightarrow} и выполнены условия включения протокола 1. При этом протоколе робот двигается по оси X с максимально допустимой скоростью до тех пор, пока средняя скорость не станет равна желаемой. Средняя скорость робота считается с момента последнего выключения протокола 1.

Для апробации разработанного алгоритма была создана модель двух колёсного робота и нескольких сцен с коридором в 3D симуляторе Gazebo [4]. Была проделана серия компьютерных экспериментов, их результаты доступны на GoogleDisc [5]

Заключение. В работе представлен децентрализованный алгоритм управления группой мобильных роботов в задачах заматающего покрытия коридоров с препятствиями. Эффективность алгоритма частично обоснована теоретически и продемонстрирована серией экспериментов с использованием симулятора Gazebo.

ЛИТЕРАТУРА

1. **J. Čerkala, T. Klein, A. Jadlovská** Modeling and Control of Mobile Robot with Differential Chassis. Electrical Engineering and Informatics 6: proceedings of the Faculty of Electrical Engineering and Informatics of the Technical University of Košice. 651-656.
2. **J. Cochran, M. Krstić** Nonholonomic source seeking with tuning of angular velocity, IEEE Transactions on Automatic Control 54 (4) (2009) 717–731.
3. **Alexey S. Matveev, Hamid Teimoori, Andrey V. Savkin** A method for guidance and control of an autonomous vehicle in problems of border patrolling and obstacle avoidance, Automatica, Volume 47, Issue 3, 2011, Pages 515-524, ISSN 0005-1098, <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2011.01.024>.
4. Gazebo [Электронный ресурс]: Gazebo. URL: <http://gazebosim.org> (дата обращения: 15.01.2022)
5. Gazebo Simulator [Электронный ресурс] // Google Disc. Режим доступа: <https://drive.google.com/drive/folders/1TteWTcswLkKiSrFz6yCBhOLUB673GMSM?usp=sharing>

К.А. Gordievich, P.A. Konovalov (SPBU, Saint Petersburg). **“Coordination of mobile robots when passing through an obstacle course in corridor-like environments”**

The paper presents a decentralized control strategy for a homogeneous group of mobile robots that autonomously drives them into the densest net-like barrier across the corridor, makes this barrier moving along the corridor with the pre-specified speed, and ensures safely trespassing through an obstacle course inside the corridor, along with the subsequent restoration of the original formation.

The performance of the proposed algorithm is partly justified by a mathematically rigorous result and is also confirmed via computer simulation tests by using the 3D simulation platform Gazebo.

УДК 681.51

И.М. БЕЛАН
(Корпорация «Комета», Университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОМПЕНСИРОВАННОГО РЕАКТИВНОГО МОМЕНТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ПЕРЕНАЦЕЛИВАНИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ АЛГОРИТМА РАЗГОНА ДВИГАТЕЛЯ

Статья посвящена разработке системы перенацеливания подвижной части космического спутника. Главной целью является нахождение оптимального алгоритма разгона, оказывающего наименьший реактивный момент на основании космического аппарата.

Введение. Космические тела находятся в невесомости, не имея точек опоры. Следовательно, любой двигатель, оказывающий момент на подвижную часть спутника, прикладывает равный по значению и противоположный по знаку момент к основанию космического аппарата (КА). Этот эффект нежелательно сказывается на точности позиционирования КА в пространстве, так как реактивный момент приводит к неконтролируемым колебаниям КА [1]. Решением данной проблемы является добавление компенсирующего маховика с редукторной кинематической связью. В этом случае подвижная часть КА и маховик приводятся в движение одним приводом, но вращаются в разные стороны, что частично компенсирует реактивный момент на основании [2]. Из-за не идеальной точности исполнения маховиков некомпенсированный реактивный момент необходимо уменьшить путём подбора оптимального профиля разгона двигателей. Поиску оптимального алгоритма разгона посвящена эта работа. К критериям оптимальности относятся: остаточный момент не более 0.05 Н•м и время движения менее 4.1 с.

Алгоритм разгона шагового двигателя. Шаговый двигатель управляется через драйвер импульсами с микроконтроллера. При подаче одного импульса на драйвер двигатель поворачивается на один шаг; угол шага выставляется на драйвере (обычно 1.8°) [3].

Импульсы могут быть сгенерированы 16-битным таймером, расположенным в микроконтроллере. Это позволит шагам быть приуроченными к разрешению одного периода таймера [4].

Задержка, программируемая таймером-счётчиком:

$$\delta t = \frac{c}{f}, \quad (1)$$

где c – отчёт счётчика; f – частота таймера.

Скорость двигателя:

$$\omega = \frac{\alpha \cdot c}{f}, \quad (2)$$

где α – угол одного шага.

Ускорение двигателя:

$$\varepsilon = \frac{2\alpha f^2 (c_1 - c_2)}{c_1 c_2 (c_1 + c_2)}, \quad (3)$$

где c_1, c_2 – отсчёты счётчика на первом и втором шаге.

Задержка после первого импульса вычисляется по формуле:

$$c_0 = f \cdot \sqrt{\frac{2\alpha}{\varepsilon}}. \quad (4)$$

Тогда задержка на n -ом шаге определяется как:

$$c_n = c_0 (\sqrt{n+1} - \sqrt{n}). \quad (5)$$

Итоговое уравнение для задержки на n -ом шаге при ускорении имеет вид:

$$c_n = c_{n-1} - \frac{2c_{n-1}}{4n+1}, \quad (6)$$

где n – номер текущего шага.

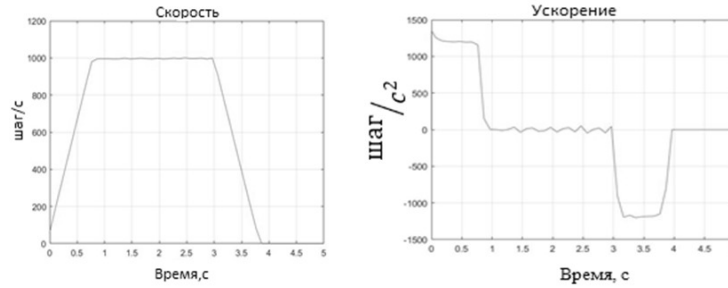


Рис. 1. Трапециевидный профиль разгона

Для более гладкого перехода к максимальной скорости, необходимо снизить ускорение на вершине профиля разгона. Это можно сделать добавлением в формулу расчёта задержек между импульсами масштабного коэффициента, который зависит от текущего шага [5]. При достижении скорости, близкой к номинальной, задержка шага пересчитывается по следующей формуле:

$$c_n = c_{n-1} - \frac{2c_{n-1}}{4n+1} \cdot \frac{n_2 - n}{n_1}. \quad (7)$$

Коэффициент $\frac{n_2 - n}{n_1}$ уменьшается с каждым шагом (ростом n). При достижении шага n_1 привод движется с постоянной скоростью до шага n_3 .

Профили разгона, полученные на основе массива импульсов с микроконтроллера, представлены на рисунке 2.

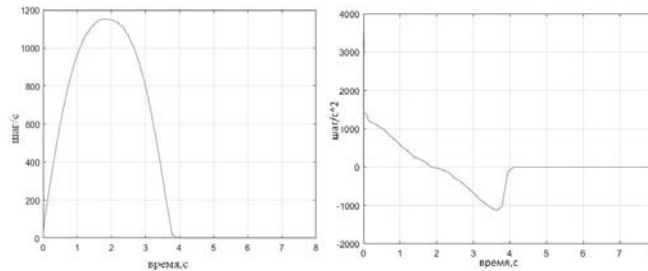


Рис. 2. Сглаженный профиль разгона

Для апробации предложенного подхода была напечатана плата и проведены испытания, в ходе которых были подобраны оптимальные параметры ускорения. Наименьший нескомпенсированный реактивный момент достигается при сглаженном профиле разгона со следующими параметрами:

Ускорение – $1150 \frac{\text{шаг}}{\text{с}^2}$, торможение – $1150 \frac{\text{шаг}}{\text{с}^2}$, максимальная скорость – $1200 \frac{\text{шаг}}{\text{с}}$.

Нескомпенсированный момент при данном профиле разгона показан на рисунке 3.

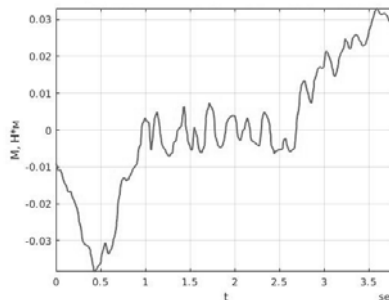


Рис. 3. Нескомпенсированный реактивный момент

Из графика видно, что нескомпенсированный момент не превышает 0.05 Н•м и время перенацеливания меньше 4.1с. Из чего можно сделать вывод, что данный алгоритм разгона удовлетворяет заданным критериям оптимальности.

Заключение. Разработан оптимальный алгоритм разгона шагового двигателя, оказывающего наименьший реактивный момент на основание космического аппарата при перенацеливании.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г.** Управление электроприводами. Л.: Энергоиздат, 1982.
2. **David Austin.** "Generate stepper-motor speed profiles in real time", EE Times-India, 2005.
3. **Арменский Е.В., Фалк Г.Б.** Электрические микромашины. – М.: Высш. Шк., 1985. – 231 с.
4. **Кенио Т.** Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. Пер с англ. – 1987. -200 с.
5. **Зимин Е.Н., Яковлев В.И.** Автоматическое управление электроприводами. М.: Высшая школа, 1979. В

I. M. Belan (Kometa Corp., Saint Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg). **Investigation of the uncompensated reactive torque of the space vehicle during retargeting depending on the engine acceleration algorithm**

The article is devoted to the development of a retargeting system for the moving part of a space satellite. The main goal is to find the optimal acceleration algorithm that provides the smallest moment on the base of the spacecraft.

УДК 681.51

Н. В. ПАК
(Санкт-Петербургский политехнический университет, Санкт-Петербург)

МНОГОЦЕЛЕВАЯ ЦИФРОВАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ МАЯТНИКА ФУРУТЫ

В докладе рассматривается вопрос стабилизации неустойчивого без управления положения равновесия нелинейного объекта – маятника Фуруты. Его реальные условия работы так же требуют учёта воздействия внешних возмущений. Для стабилизации применён многоцелевой подход к синтезу обратной связи. Важным аспектом является построение цифрового регулятора. Особое внимание уделено подавлению колебаний системы.

Введение. В последние годы существенное внимание в научных исследованиях уделяется методам синтеза законов управления для нелинейных систем. Существуют различные подходы, обеспечивающие устойчивость их отдельных движений, однако не существует универсального метода единообразного решения задачи. Наиболее часто среди движений нелинейных систем рассматриваются положения равновесия, неустойчивые без управления [6], стабилизация которых является одним из обязательных требований, предъявляемых к синтезируемому управлению. В данной работе рассматривается основной вопрос об аналитическом синтезе цифровой обратной связи, которая должна обеспечивать стабилизирующее управление маятником Фуруты для всех режимов функционирования, включающих движение в условиях наличия внешнего возмущения [10]. Учитывая всю широкую совокупность требований к динамическим свойствам замкнутой системы, данный вопрос трудно изучать в рамках традиционных подходов, таких как ПИД (пропорционально-интегрально-дифференцирующее) регулирование [4], [5], управление с прогнозом [3]. По этим причинам здесь применяется подход, основывающийся на применении обратной связи с многоцелевой структурой [9] и позволяющий декомпозировать общую задачу синтеза на последовательность локальных подзадач, каждая из которых относится к конкретным режимам движения объекта. Решениями данных задач будут являться модели настраиваемых элементов, которые позволяют существенно повысить качество процессов управления.

Стабилизация маятника Фуруты. Маятник Фуруты – это перевернутый вертикальный маятник, размещенный на вращающемся основании. Вся система смонтирована на платформе, которая вращается горизонтальной плоскости с помощью электромотора. На торце платформы шарнирами закреплен вертикальный стержень, который может вращаться в вертикальной плоскости. Ставится задача построения цифрового управления для нелинейного объекта с использованием обратной связи с многоцелевой структурой. Найденное управление должно удовлетворять конкретным условиям для каждого из рассматриваемых базовых режимов функционирования объекта. При этом необходимо учитывать дискретизацию по времени для обрабатываемой информации. Достижение описанных требований, в частности подавление колебаний элементов маятника, не должно приводить к использованию сравнительно больших энергетических ресурсов, чем при движении без внешнего возмущения.

Общая задача синтеза. Для того, чтобы обеспечить выполнение всей совокупности требований, которые предъявляются к динамике процессов управления маятником Фуруты, будем использовать обратную связь с многоцелевой структурой (МР), описанной в работах [1], [2, 7, 8]. Для синтеза цифрового регулятора с использованием обратной связи с многоцелевой структурой, необходимо перейти к системам разностных уравнений. МР структура в дискретном времени описывается следующими уравнениями:

$$z[n+1] = A_d z[n] + b_d \tau[n] + H_d (y[n] - C_d z[n]), \quad (1)$$

$$\tau[n] = K_d z[n] + \xi[n], \quad (2)$$

$$\xi[n] = F_d(\tilde{z})(y[n] - C_d z[n]), \quad (3)$$

Научный руководитель профессор, доктор технических наук, профессор Уткин Лев Владимирович.

где A_d, b_d, C_d – матрицы дискретной линейной системы, соответствующей непрерывной линейной системе, полученной с помощью линеаризации обратной связью, K_d, H_d – матрицы дискретного формирователя и дискретного наблюдателя соответственно, а F_d – передаточная матрица дискретного фильтра. Здесь в качестве управления выступает переменная τ .

Первый элемент структуры – асимптотический наблюдатель (1), предназначенный для восстановления информации о векторе состояния объекта z по результатам его измерений y . Второй элемента структуры формирует управляющий сигнал (2), который подается на электромотор. Он обеспечивает устойчивость замкнутой системы. Третьим элементом является динамический фильтр (3), поддерживающий устойчивость и обеспечивающий желаемые динамические свойства замкнутой системы в условиях воздействия внешних возмущений. $z[n+1] \in E^n$ и $\xi[n] \in E^1$ – вектор состояния наблюдателя и выход фильтра соответственно. Решение задачи синтеза многоцелевой структуры декомпозируется на три локальных задачи, которые решаются последовательно с учётом всех требований к динамике замкнутой системы. Результатом решения локальных задач является формирование дискретной обратной связи в виде (1) – (3), которая подлежит непосредственной реализации для управления рассматриваемым объектом.

Проведение практических расчётов. В докладе представлены аналитические методы решение поставленных локальных задач. Далее приводятся результаты применения описанного подхода к синтезу обратной связи с многоцелевой структурой для управления маятником Фуруты с конкретными числовыми параметрами. Все необходимые вычисления и непосредственно имитационное моделирование динамических процессов управления осуществляется в среде MATLAB с привлечением прикладного пакета Simulink.

Результат компьютерного моделирования. Цифровой регулятор. Анализируя динамику процессов замкнутой системы с построенной цифровой многоцелевой структурой управления при включенном и выключенном цифровом фильтре (рис. 1 и рис.2), видим, что для данного режима движения маятника, а именно при условии воздействия внешних возмущений колебательного характера, фильтр подавляет колебания по углу, а по управлению амплитуда колебаний остаётся примерно на том же уровне. Тогда можно сделать вывод, что в данном режиме функционирования построенный цифровой регулятор подавляет колебания маятника до небольших величин, увеличивая при этом затрачиваемые ресурсы на управление.

Выводы. В ходе проделанной работы был исследован маятник Фуруты, и для него изучены вопросы построения стабилизирующих законов управления. В отличие от известных подходов, синтез обратной связи осуществлен на множестве законов управления с многоцелевой структурой. При выборе ее элементов определяющую роль играли два режима движения системы. На основе непрерывных законов управления было осуществлено построение цифрового регулятора для рассматриваемой динамической системы. Для подтверждения работоспособности и эффективности принятого подхода выполнены практические расчеты, на основании которых проведено имитационное моделирование динамики замкнутой системы с синтезированной многоцелевой структурой управления. Результаты расчетов и моделирования свидетельствуют о достижении поставленных целей работы.

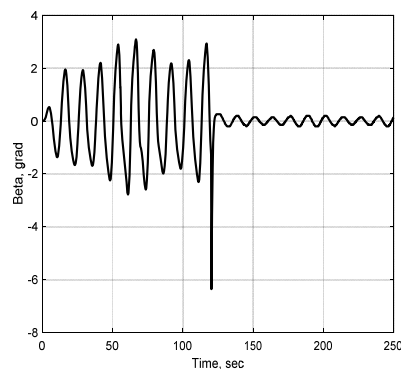


Рис. 1. Сравнение процессов по углу β при сложных колебаниях для дискретного управления

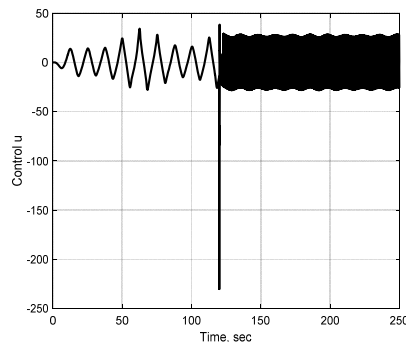


Рис. 2. Сравнение процессов по управлению u при сложных колебаниях

ЛИТЕРАТУРА

1. Веремей Е. И. Линейные системы с обратной связью. СПб.: Лань, 2013. – 448 с.
2. Веремей Е. И. Среднеквадратичная многоцелевая оптимизация. СПб: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2016. – 408 с.
3. Веремей Е. И., Сотникова М. В. Управление с прогнозирующими моделями. Воронеж: Изд-во "Научная книга", 2016. – 214 с.
4. Arnolds B. M. Identification and control of the Rotary Inverted Pendulum. – Technical Traineeship Report, University of Eindhoven, 2003. – DCT report No: 2003.100. – 60 p.
5. Furuta K., Iwase M. Swing-up time analysis of pendulum // Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences. – 2004. – Vol. 52, № 3. – P. 153–163.
6. Khalil H. K. Nonlinear Systems. Third edition. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 2002.
7. Veremey E. I. Separate Filtering Correction of Observer-Based Marine Positioning Control Laws, International Journal of Control. – August 2017, Volume 90, Issue 8, pp. 1561–1575.
8. Evgeny I. Veremey. Optimization of filtering correctors for autopilot control laws with special structures // Optimal Control Applications and Methods. Volume 37, Issue 2, pp. 323–339.
9. Пак Н. В. Управление маятником Фуруты с использованием обратной связи с многоцелевой структурой. – Текст: электронный // Архив открытого доступа Санкт-Петербургского государственного университета. – URL: <http://hdl.handle.net/11701/25985> (дата обращения: 01.05.2021).
10. Веремей, Е.И. and М.В. Сотникова. Применение метода H_∞ -оптимизации для синтеза фильтров морского волнения. Гироскопия и навигация. - 2009. - № 2. - С. 24-36.

УДК 65.012.122

В.Г. КАРАУЛОВ, А.М. ГРУЗЛИКОВ
(АО Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", Санкт-Петербург)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАРШРУТА И СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ АНПА В ЗАДАЧЕ ПРИВЕДЕНИЯ К БАЗОВОЙ СТАНЦИИ

Предложен алгоритм навигации автономного необитаемого подводного аппарата с использованием высокочастотной гидроакустической системы приведения ближнего радиуса действия. На основе имитационного моделирования предложен маршрут и рекомендованная скорость движения аппарата по критерию минимума среднеквадратичной ошибки по оценке координат и углов ориентации. Приведены результаты апробации алгоритма навигации на натурных данных.

Введение. В докладе предлагается решение задачи навигации с использованием высокочастотной гидроакустической системы приведения ближнего радиуса действия в интересах решения задачи стыковки к базовой станции. Указанная задача не является новой, однако в литературе обычно рассматривается только стыковка АНПА с использованием гидроакустической системы длинной базы и ультракороткой базы с использованием маяков-ответчиков [1-3]. Отличием настоящей работы является описание алгоритма решения с использованием только излучателей на базовой станции.

Гидроакустическая система приведения имеет в своём составе приёмные антенны, которые размещаются под килем АНПА в кормовой и носовой части, а также излучатели, устанавливаемые по краям базы и осуществляющие ненаправленное излучение сигнала (рис. 1). Следует отметить, что излучаемые сигналы – это тональные сигналы одной частоты с разнесением по времени излучения таким образом, чтобы по периоду обнаружения сигнала можно было однозначно идентифицировать источник излучения.

Приведение АНПА предполагает маневрирование аппарата и последовательное приближение к базе, что приводит к необходимости решения задач:

- определения координат и углов ориентации относительно базы при различной акустической видимости излучателей приёмными элементами антенн;
- определение зависимости среднеквадратичных оценок перемещения аппарата от маршрута движения и его скорости;
- построение траектории маршрута и рекомендации по скорости движения аппарата по критерию минимума среднеквадратичной ошибки решения навигационной задачи.

В докладе приводятся результаты имитационного моделирования и натурной апробации разработанного алгоритма навигации в испытательной бассейне АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Приведены результаты построения маршрута, рекомендации по скорости движения аппарата в соответствии с заданным критерием.

Цель работы: определение координат и углов АНПА по сигналам базовой станции, определение рекомендуемой скорости и маршрута движения АНПА.

Постановка задачи навигации и описание алгоритма ее решения. Имеется базовая станция с четырьмя излучающими элементами, каждый из которых излучает тональный сигнал в соответствии с заданной временной диаграммой. На АНПА (в носовой и кормовой части) располагаются две антенны, в каждой из которых пять приемных элементов. На вход алгоритма поступают принятые сигналы на приёмные элементы АНПА (суммарный полезный и помеховый сигнал во временной области). Результатом решения задачи являются координаты и углы ориентации АНПА относительно базы при различной акустической видимости излучателей приёмными элементами антенн.

При маневрировании АНПА можно выделить четыре зоны видимости приёмниками различных излучателей:

- зона 1 – в зоне видимости каждой антенны находятся все четыре излучателя;
- зона 2 – в зоне видимости каждой антенны находятся три излучателя;

- зона 3 – в зоне видимости каждой антенны находятся по одному излучателю.

При нахождении АНПА в зоне 1 последовательно решаются следующие задачи:

1. Обнаружение сигналов от маяков базового устройства.
2. Идентификация маяков согласно временной диаграмме последовательности излучений.
3. Решение системы алгебраических уравнений для определения координат и углов ориентации

АНПА с использованием разностно-дальномерного метода [4-5].

При нахождении АНПА в зоне 2 решение задачи совпадает с решением задачи при нахождении АНПА в зоне 1, за исключением уменьшения числа уравнений (исключение носового либо кормового излучателя).

Решение задачи определения координат АНПА в зоне 3 возможно только с использованием прогнозирования времени излучения сигнала от известного маяка причального устройства, т.е. использование оценок времени излучения полученной в результате прохождения АНПА зоны 1 и 2.

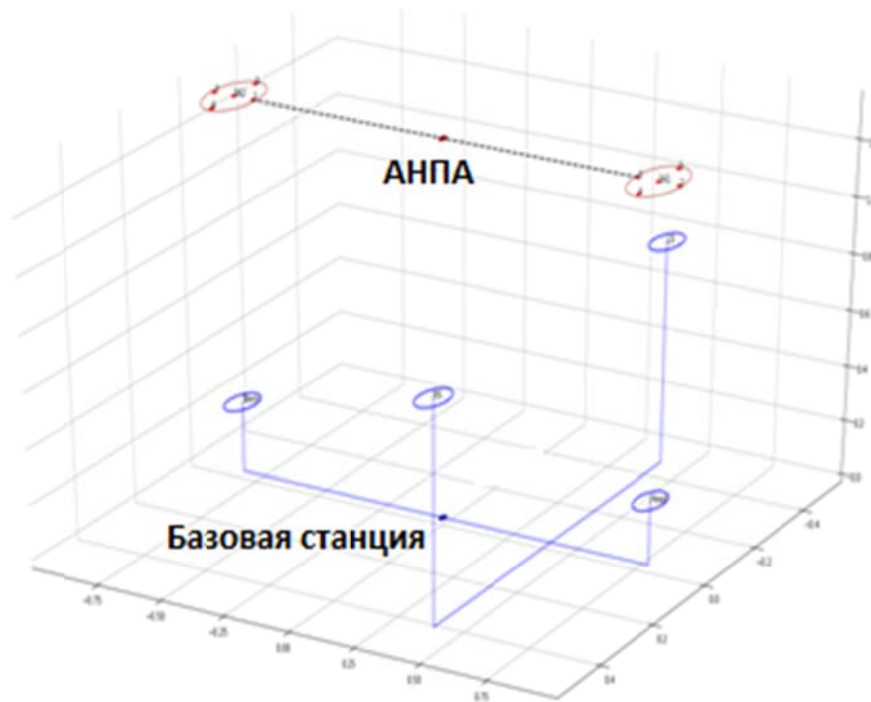


Рис. 1. Схема размещения гидроакустической системы АНПА и базовой станции

Решение алгебраических уравнений проводилось с использованием метода доверительного региона (trust-region method) [6], где в качестве исходных значений устанавливались координаты и углы ориентации АНПА, полученные с использованием метода машинного обучения с учителем: k-ближайших соседей [7]. Обучающая выборка была сформирована с использованием решения геометрической задачи на заданной координатной сетке и таблицы углов ориентации. Метрика – манхэттенское расстояние.

Определение маршрута и скорости движения аппарата. Приведение АНПА к базовому устройству возможно с использованием различных сценариев по траектории и по скорости перемещения аппарата. При этом низкая скорость аппарата приводит к повышению эффективности решения навигационной задачи (уменьшению значений СКО измеряемых величин), но в то же время – к увеличению энергозатрат, что увеличивает разряд аккумуляторных батарей. Кроме того, на ошибки измерения координат влияет и выбор углов перемещения аппарата.

Определение зависимости значений СКО измеряемых величин от скорости движения аппарата осуществлялось с использованием имитационного моделирования: на заданной траектории имитировалось перемещение аппарата при разных значениях скорости и осуществлялось фор-

мирование сигналов на входе приёмных элементов в соответствии с последовательностью излучений базового устройства.

Выбор траектории движения аппарата сводится к решению оптимизационной задачи выбора маршрута в графе, где в качестве весов использовались значения СКО, полученные в результате имитационного моделирования. В качестве исходных данных для модели ошибок измерения сигналов на входе приёмных элементов использовались результаты, полученные в натуральных условиях.

В результате проведенного имитационного моделирования было определено, что минимум СКО достигается при вертикальном перемещении АНПА по центру причального устройства. Рекомендуемая скорость АНПА составила не более 3 уз.

Описание эксперимента. Натурная апробация алгоритма навигации проводилась в испытательном бассейне АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» с использованием подъёмно-поворотного устройства, на котором размещался макет АНПА. На дно бассейна размещался макет базовой станции.

До размещения макета базовой станции, производился монтаж поплавковых индикаторов с целью измерения глубины размещения (наличия крена/дифферента для учёта неровности дна бассейна), а также для определения оси геометрического центра станции.

Приёмные антенны размещались на подъёмно-поворотном устройстве, ось вращения поворотного устройства устанавливалась над геометрическим центром базового устройства и принималась за начало координат (в горизонтальной плоскости). Отсчёт вертикальной координаты производился от плоскости крепления поплавковых индикаторов при отсутствии крена/дифферента макета базы или от точки крепления поплавкового индикатора, имеющего максимальную глубину, при наличии крена/дифферента.

Эксперимент состоял в размещении макета АНПА в заданных точках координат относительно макета базовой станции с различными углами поворота в горизонтальной плоскости и получении оценок в реальном масштабе времени. Работа в зоне №3 (видимость приёмных антенн только одного излучателя) проводилось с переходом из зоны №1.

Результаты представлены в Таблице 1.

Таблица 1.

СКО дистанции на имитационных и натуральных данных

Зоны видимости	Имитационные данные	Натурные данные
Зона 1	СКО = 0.031 м	СКО = 0.038 м
Зона 2	СКО = 0.015 м	СКО = 0.097 м
Зона 3	СКО = 0.002 м	СКО = 0.068 м

Заключение. Выполненные эксперименты подтверждают эффективность предложенного алгоритма определения навигационных параметров АНПА в процессе его приведения к базовой станции. В ходе апробации алгоритма проведена его отладка при различных скоростях и маршрутах перемещения АНПА к базовой станции, отработан переход АНПА из зоны 1 в зону 3 (изменения состава наблюдаемых маяков). Натурные испытания проводились в испытательном бассейне с использованием подъёмно-поворотного устройства при перемещении макета АНПА относительно макета базовой станции. Установлено, что минимум СКО достигается при вертикальном перемещении АНПА по центру базовой станции со скоростью не более 3 уз.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ № 22– 29– 00339.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Матвиенко Ю. В.** Гидроакустический комплекс навигации подводного робота: Дис. ... канд. тех. наук: 01.04.06 / Матвиенко Юрий Викторович. – Владивосток, 2004 – с. 271.
2. **Инзарцев А. В., Матвиенко Ю. В., Рылов Н. И. и др.** Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике, Подводные исследования и робототехника. – 2007. - № 2. – с. 5 – 14.
3. Romeo J., Lester G. Navigation is Key to UAV Missions, Sea Technology. 2001. – V0.42. - № 12. – P. 24-29
4. **Барбанов О. О., Барбанова Л. П.** Математические задачи дальномерной навигации, Физматлит, М., 2007

5. **Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х.** Positioning of mobile sources of radio radiation by the difference method, T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 4. с. 41–46.
6. Colson B., Marcotte P., Savard G. A trust-region method for nonlinear bilevel programming: algorithm and computational experience, Computational Optimization and Applications, 30:3 (2005), 211–227
7. **Вьюгин В.В.** Математические основы теории машинного обучения и прогнозирования М.: 2013. – с. 387.

V.G. Karaulov, A.M. Gruzlikov (Concern CSRI Elektropribor, Saint Petersburg, Russia). **Determining the route and speed of AUV movement in the problem of driving to the base station**

An algorithm for navigation of an autonomous underwater vehicle using a short-range high-frequency hydroacoustic guidance system is proposed. On the basis of simulation modeling, a route and the recommended speed of the vehicle movement are proposed according to the criterion of minimum root-mean-square error in estimating coordinates and orientation angles. The results of approbation of the navigation algorithm on field data are presented.

В АВТОРСКОЙ РЕДАКЦИИ

УДК 681.51

З. М. АБДУЛЛАЕВА

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

Д. И. ДЕПУТАТОВА

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина))**ВЫБОР МЕТОДА СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА
УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СУДНА***Работа посвящена выбору метода синтеза оптимального алгоритма управления движением судна в адаптивной системе, которая при изменении условий плавания (рельефа дна, течения и ветра) наряду с выполнением задач стабилизации по курсу изменяет параметры регулятора.*

Введение. Известно, что бывает затруднительно получить систему управления движением судна классическими методами, требующими наличия сложных корректирующих устройств, в условиях большого числа ограничений на переменные состояния и управления объекта. Большие сложности возникают в системах управления и при изменении критерия качества управления в процессе их функционирования. В то же время изменение этого критерия оказывается желательным при переходе от режима стабилизации на заданной линии профиля к режиму выхода на новый профиль. Предлагаемый доклад посвящен анализу возможности использования метода аналитического конструирования регуляторов А. А. Красовского. Такой подход решает задачу не только стабилизации судна по курсу [1], но и задачу оптимизации при изменяющихся условиях плавания.

Необходимые условия оптимальности приводят к двухточечной краевой задаче [2,3]. Эта задача сводится к решению одноточечной задачи Коши для дифференциальных уравнений в случае конечного времени оптимизации или к решению нелинейных алгебраических уравнений при бесконечном времени. При этом предполагается, что возмущения заданы на всем интервале оптимизации либо как известные функции времени, либо как определенные случайные стационарные процессы с нормальными значениями распределения давления.

Метод численного поиска оптимальных решений, основанный на применении необходимых условий оптимизации [2], приводит к сложным вычислительным операциям, не гарантируя, в общем случае, сходимости полученных решений. Известны методы аналитического конструирования регуляторов [4], позволяющие определить оптимальное управление с помощью более простых приемов в замкнутой аналитической форме для задач высокой размерности. Например, метод аналитического конструирования регулятора А. А. Красовского отличается от приведенных в литературе методов более сложными ограничениями на управление и фазовые координаты, а также тем, что в оптимизирующем функционале не содержится управления.

Таким образом, целью работы является исследование возможности использования метода аналитического конструирования регуляторов А.А. Красовского для решения задач стабилизации курса судна в изменяющихся условиях плавания.

Синтез оптимального регулятора. Для синтеза оптимального регулятора анализируется модель судна, структурно совпадающая с известными выражениями А.М. Басина [5].

Задача определения оптимального алгоритма управления по методу аналитического конструирования регуляторов А.А. Красовского заключается в синтезе такого закона управления, который будет минимизировать функционал

$$I = \int_0^{\infty} (\beta_{22}(\varphi - \varphi_3)^2 + \beta_{33}\omega) dt, \quad (1)$$

где φ – текущий курс; φ_3 – заданный курс; ω – угловая скорость рыскания по курсу; β_{22}, β_{33} – весовые коэффициенты.

Выполняются следующие ограничения:

1. На угол отклонения руля $|\beta \leq 30^\circ|$,

$$2. \int_0^{\infty} [\gamma_{41}\alpha + \gamma_{42}\omega + \gamma_{43}(\varphi - \varphi_3) + \gamma_{44}\beta] dt = C, \quad (2)$$

где $\gamma_{4i}, i, \dots, 4$ – коэффициенты закона управления; C – постоянная, зависящая от начального состояния объекта.

Для указанных исходных условий оптимальным управлением, минимизирующим функционал (1) при дополнительном условии (2), служит управление вида:

$$U_4 = -m_4 / d \sum_{k=1}^4 \gamma_{4k} X_k, \quad (3)$$

где X_k – параметры состояния судна; $m_4 / d = 1$ коэффициент усиления канала U - β ; β – угол перекадки руля; U – входной сигнал системы.

При этом постоянные коэффициенты γ_{4k} определяются системой линейных алгебраических уравнений

$$\sum_{p=1}^4 (b_{pk}\gamma_{ip} + b_{pi}\gamma_{kp}) = \beta_{ik}, ik=1 \dots 4. \quad (4)$$

В коэффициенты $b_{ik}, i, k = 1 \dots 4$ входят величины, изменяющиеся при изменении путевых условий плавания.

Заключение. В докладе проанализирован метод аналитического конструирования регуляторов А. А. Красовского, который учитывает изменение рельефа дна, течения и ветра. Внедрение указанного метода в систему автоматического управления позволит наряду с выполнением задач стабилизации по курсу решить задачу оптимизации в изменяющихся условиях плавания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Асланов, Г. К. Математическая модель движения судна по криволинейной траектории / Г. К. Асланов, З. М. Абдуллаева // Молодежь, наука, инновации: материалы II Всероссийской научно-практической конференции. – Грозный: ГГНТУ имени М. Д. Миллионщикова, 2013. – С. 27-34.;
2. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. – СПб.: Питер, 2006. – 272 с.
3. Нестационарные системы автоматического управления: анализ, синтез, оптимизация / Под ред. К.А. Пупкова и Е.Д. Егунова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 632 с.
4. Красовский А.А., Буков В.Н., Шендрик В.С. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами. – М.: Наука, 1977. – 272 с.
5. Басин А.М. Ходкость и управляемость судов. М.: Транспорт. 1977. 456 с.

Z. M. Abdullayeva, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (ETU «LETI»), Saint Petersburg. D. I. Deputatova, Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" (ETU «LETI»), Saint Petersburg. **Selection of the synthesis method of the optimal ship motion control algorithm.**

The paper presents an adaptive system that, when working conditions change during operation, changes the parameters of the controller to optimize control. The developed automatic control system, along with performing stabilization tasks along the course, also solves the optimization problem under changing sailing conditions.

УДК 531.383:681.7

Я.В. РАУДОНИС, И.В. СЕМЕНОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

Д.В. АНТОНОВ
(Университет ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИРОСТАБИЛИЗАТОРОМ ГРАВИМЕТРА НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПАХ

Рассмотрена задача синтеза регулятора одноосной безредукторной системы гиросtabilизации гравиметра, в которой в качестве чувствительных элементов используются волоконно-оптические гироскопы. Синтез регулятора осуществлен с использованием логарифмических амплитудных частотных характеристик. Представлены результаты моделирования разработанной системы стабилизации.

Введение. Знание гравиметрического поля Земли важно для решения широкого круга научных и практических задач. Измерение силы тяжести производится с помощью гравиметра (ГВ). Его ось чувствительности должна совпадать с направлением вектора силы тяжести Земли. Следовательно, для достижения высокой точности гравиметрической съемки в условиях качающегося основания необходима стабилизация гравиметрического датчика (ГД) в плоскости горизонта [1].

Чаще всего в качестве чувствительного элемента системы стабилизации платформы с ГД используется механический гироскоп (например, двухстепенной поплавковый гироскоп). При использовании ГД с такими чувствительными элементами ранее был разработан ряд зарекомендовавших себя решений [2]. В последнее время в системах пространственной гироскопической стабилизации все большее применение в качестве основных чувствительных элементов находят волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) [3]. Они отличаются высокой надежностью, простотой использования и гибкостью применения. В связи с заменой чувствительных элементов необходима разработка алгоритма системы стабилизации, учитывающего изменившиеся характеристики системы: меньшее время запаздывания и больший уход чувствительного элемента, другие масса-габаритные характеристики и момент инерции платформы.

Целью работы является исследование системы гироскопической стабилизации, построенной на базе ВОГ, синтез регулятора, обеспечивающего приемлемый запас устойчивости системы гироскопической стабилизации и требуемую точность стабилизации. Для разработки контура управления системы стабилизации использовался классический метод синтеза регулятора с помощью логарифмических амплитудных характеристик (ЛАХ) [4].

Математическая модель. Системы гиросtabilизации (СГС) ГД представляют собой двухосный карданов подвес с платформой, стабилизируемой в плоскости горизонта. В математической модели (ММ) рассматриваемой двухосной системы стабилизации примем допущение, об отсутствии взаимного влияния кардановых колец. Тогда приближенно такая модель может быть представлена в виде совокупности двух независимых, несвязанных ММ одноосных гиросtabilизаторов [4-7]. Для описания динамики стабилизатора запишем дифференциальные уравнения в операторной форме:

$$\begin{cases} A_0 p^2 \alpha - R(\gamma - \alpha) = M_B, \\ J_{\text{ог}} p^2 \gamma + R(\gamma - \alpha) = M_{\text{ог}}, \\ M_{\text{ог}} = \frac{k_{\text{ог}} U}{T_{\text{эм}} p + 1} - S_{\text{ог}} (p\gamma - p\alpha), \\ U = -k_y \cdot W_y(p) \cdot \alpha, \\ M_{\text{г}} = M_{\text{мп}} \text{sign}(p\theta) + M_{\text{ост}} \sin(6\pi P\theta) + K_{\text{ж}} \theta + M_{\text{неб}}, \end{cases} \quad (1)$$

где A_0 – момент инерции стабилизируемой платформы, Нмс²; α – абсолютный угол поворота стабилизируемой платформы вокруг оси стабилизации, рад.; M_{mp} – момент трения на оси стабилизации, Нм; R – угловая жесткость соединения ротора моментного двигателя со стабилизируемой платформой, кг·м/рад.; γ – угол поворота вала этого двигателя, рад.; $M_{неб}$ – момент небаланса, Нм; θ – угол поворота основания платформы, рад; $J_{о\epsilon}$ – момент инерции ротора двигателя, Нмс²; $k_{о\epsilon}$ – коэффициент передачи двигателя, Нм/В; $T_{эм}$ – электромагнитная постоянная времени обмотки управления двигателя, с; U – управляющее напряжение, В; $S_{о\epsilon}$ – коэффициент вязкого трения моментного двигателя, Нмс; k_y – коэффициент усиления, значение которого получается при синтезе коррекционного устройства для системы управления стабилизатором; $W_y(p)$ – передаточная функция регулятора; P – число редукции (пар полюсов моментного двигателя), $K_{жс}$ – коэффициент жесткости жгутов, Н/м.

Структурная схема замкнутой СГС представляющая собой систему регулирования с единичной отрицательной обратной связью, изображена на рис. 1.

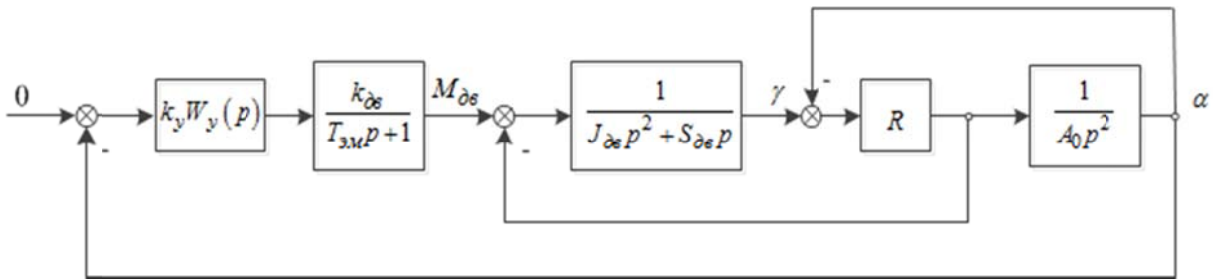


Рис. 1. Структурная схема замкнутой СГС

Необходимо синтезировать регулятор с передаточной функцией $W_y(p)$ для системы управления, такой, чтобы обеспечить приемлемый запас устойчивости, характеризуемый показателем колебательности M , и приемлемую точность стабилизации.

Синтез регулятора. ПФ разомкнутой по углу СГС может быть представлена следующим выражением [6]:

$$W(p) = W_y(p) \frac{K_{pc}}{p(T_{эм}p + 1)(T_c p + 1)(T_k^2 p^2 + 2\xi T_k p + 1)}, \quad (2)$$

где $W_y(p)$ – передаточная функция регулятора, $K_{pc} = k_y k_{о\epsilon} / S_{о\epsilon}$ – общий коэффициент усиления разомкнутой системы, $T_c = (A_0 + J_{о\epsilon}) / S_{о\epsilon}$ – электромеханическая постоянная времени системы, $T_k = \sqrt{A_0 J_{о\epsilon} / (R(A_0 + J_{о\epsilon}))}$ – колебательная постоянная времени системы, $\xi = 0.5 \cdot S_{о\epsilon} \sqrt{A_0 / (R J_{о\epsilon} (A_0 + J_{о\epsilon}))}$ – коэффициент демпфирования колебательного звена.

На рис. 1 не показаны моменты возмущения, принимаемые в рассмотрение при построении ММ (1) [5].

Ввиду наличия сопрягающих частот ниже наибольшей частоты качки традиционный способ расчета усиления на этой частоте [8], основанный на замене исходной ЛАХ единственной асимптотой, характеризующей ее поведение на низких частотах, является неприемлемым. В данном случае значение усиления должно удовлетворять неравенству:

$$\left| k_y \frac{k_{о\epsilon}}{S_{о\epsilon}} / j\omega_i (T_c j\omega_i + 1) \right| \geq \sqrt{2} \frac{A_i}{\psi_i}, \quad (3)$$

где A_i – наибольшая амплитуда качки, ψ_i – максимально допустимая ошибка системы, ω_i – наибольшая частота качки, T_c – наибольшая постоянная времени в системе, соответствующая наименьше сопрягающей частоте.

Из неравенства (3) можно найти наименьший желаемый коэффициент усиления регулятора как минимальное значение, при котором неравенство (3) обращается в равенство:

$$k_y = \sqrt{2} \frac{A_i S_{\partial \theta}}{\psi_i k_{\partial \theta}} \omega_i \sqrt{(T_c \omega_i)^2 + 1}. \quad (4)$$

Используя метод ЛАХ [5], получим ПФ регулятора $W_y(p)$ и постоянных времени T_2, T_3 в виде:

$$W_y(p) = (T_2 p + 1) / (T_3 p + 1), \quad (5)$$

$$T_2 = 1 / \omega_0 \sqrt{M / (M - 1)}, \quad (6)$$

$$T_3 = 1 / \omega_0 \sqrt{M(M - 1) / (M + 1)}, \quad (7)$$

что обеспечивает приемлемый показатель колебательности (далее примем $M = 1.4$), а также наклон ЛАХ -20 дБ/дек в окрестности частоты среза.

При этом частота среза составляет $\omega_0 = \sqrt{D_\omega / T_c}$, а требуемая добротность $D_\omega = \sqrt{2} \frac{A_i}{\psi_i} \omega_i \sqrt{(T_c \omega_i)^2 + 1}$.

Логарифмические частотные характеристики (ЛЧХ) системы примут вид, изображенный на рис. 2а, где штриховой линией обозначены характеристики без корректирующего звена, а сплошной – ЛЧХ скорректированной системы. В качестве внешнего возмущения задается регулярная качка амплитудой 15° и периодом 6 с. Моделирование проведено при следующих значениях параметров: $A_0 = 2.2$ Нмс²; $M_{mp} = 0.04$ Нм; $R = 10^7$ кг·м/рад.; $M_{неб} = 0.04$ Нм; $J_{\partial \theta} = 0.03$ Нмс²; $k_{\partial \theta} = 0.7$ Нм/В; $T_{эм} = 0.02$ с; $S_{\partial \theta} = 0.01$ Нмс; $P = 79$; $K_{жс} = 0.1$ Н/м; $A_i = 15^\circ$; $\psi_i = 15''$; $\omega_i = \pi/3$; $T_c = 219$ с; $T_\kappa = 5.4 \cdot 10^{-5}$ с; $\xi = 1.9 \cdot 10^{-6}$; $k_y = 1.7 \cdot 10^4$; $T_2 = 0.033$ с; $T_3 = 0.03$ с; $D_\omega = 1.2 \cdot 10^6$ с⁻¹; $\omega_0 = 74.7$ с⁻¹.

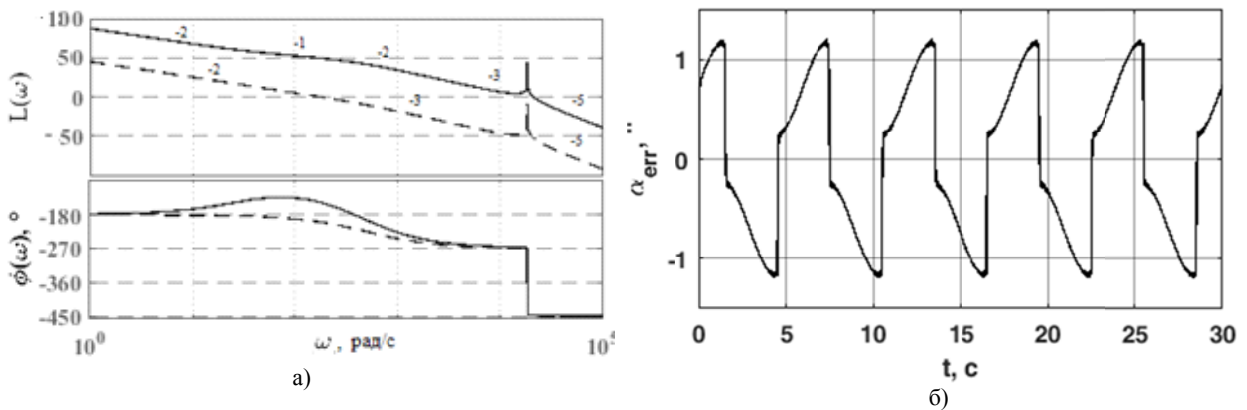


Рис. 2. а - ЛЧХ СГС при введении в систему регулятора (5); б - ошибка стабилизации при введении в систему регулятора (5)

Полученный регулятор обеспечивает значение максимально допустимой ошибки стабилизации не более $1.5''$ (рис. 2б).

Для уменьшения максимальной и среднеквадратической ошибок системы стабилизации введем в контур регулирования изодромное звено. Тогда ПФ регулятор примет вид

$$W_y(p) = \frac{(T_n p + 1)(T_2 p + 1)}{T_n p (T_3 p + 1)}, \quad (8)$$

где $T_{и}$ – постоянная времени изодрома, определяемая из условий $T_2 < T_{и} < T_c$. Выберем $T_{и} = 0.05$ с.

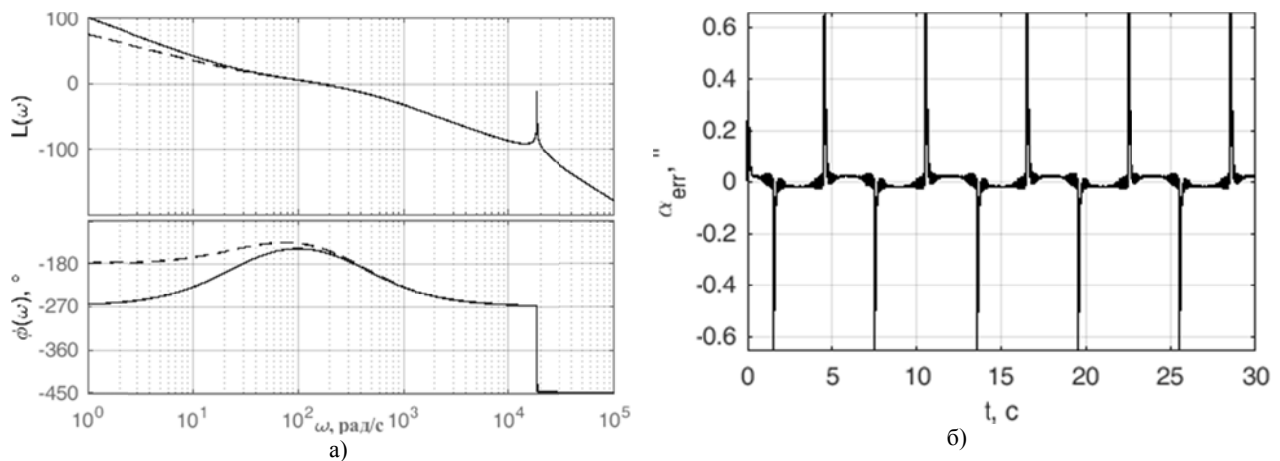


Рис. 3. а - ЛЧХ СГС при добавлении в систему интегрирующего звена; б - ошибка стабилизации при добавлении в систему интегрирующего звена

На рис. 3а представлен график ЛЧХ при использовании регулятора вида (6), где сплошной линией изображена система после введения изодромного звена, а прерывистой – до введения. На рис. 3б изображен график ошибки стабилизации, которая по амплитуде не превышает $0.6''$.

Заключение. По результатам анализа частотных характеристик системы управления гиросtabilизатора определена структура последовательного корректирующего звена, обеспечивающего приемлемый запас устойчивости и высокую точность стабилизации.

В докладе рассмотрена реакция системы гиросtabilизации при воздействии внешнего возмущения типа регулярной качки без учета задержки и собственных погрешностей чувствительных элементов системы. В дальнейшем планируется проанализировать влияние собственного ухода ВОГ на характеристики системы и рассмотреть целесообразность введения акселерометрической коррекции.

Работа проводилась при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-19-00627, <https://rscf.ru/project/18-19-00627>

ЛИТЕРАТУРА

1. Пешехонов В.Г., Степанов О.А. и др. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли. – СПб.: ГНЦ РФ АО «ЦНИИ «Электронприбор», 2017. – 390 с.
2. А.А.Краснов, А.А.Одинцов, И.В.Семенов Система гироскопической стабилизации гравиметра // Гироскопия и навигация № 4 (67) 2009 –С. 54-69
3. А.Н.Дзюба, Л.П.Старосельцев Моделирование погрешностей гиросtabilизатора гравиметра на волоконно-оптических гироскопах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т.13. №6. С. 73-78.
4. Фабрикант Е.А., Журавлев Л.Д. Динамика следящего привода гироскопических стабилизаторов. М.: Машиностроение, 1984. 248 с.
5. Бесекецкий В.А., Фабрикант Е.А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации. М.: Судостроение, 1968.348 с.
6. Семенов И.В. Система управления гиросtabilизированной платформой мобильного вертикального градиентометра: дис. ... канд. техн. наук. АО Концерн «ЦНИИ «Электронприбор». Санкт-Петербург, 2012.
7. Ривкин С.С. Теория гироскопических устройств Часть 1. М.: Судпромгиз, 1962, 497 с.
8. Бесекецкий В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. Изд. «Наука», М., 1975. 768 с.

Y.V. Raudonis, D.V. Antonov, I.V. Semenov (CSRI Electronpribor, Saint-Petersburg). **Synthesis of a regulator for the control system of the gyrostabilizer of a gravimeter on fiber-optic gyroscopes**

The problem of synthesis of a one-axis gearless gravimeter stabilization system regulator, in which fiber-optic gyroscopes are used as sensing elements, is considered. The synthesis of the regulator is realized using Bode Diagrams. Simulation results of the developed stabilization system are presented.

УДК 531.383: 621.396.988

И. Р. ГОГОРЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

СИСТЕМА КОСВЕННОЙ ГИРОСКОПИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ ЛИНИИ ВИЗИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОГО ПРИБОРА

Рассмотрена система косвенной гироскопической стабилизации линии визирования оптического прибора. Приведено обоснование выбора регулятора релейного типа, обеспечивающего работоспособность системы косвенной стабилизации линии визирования в условиях качающегося основания и при воздействии широкополосных вибраций.

Введение. Система косвенной гироскопической стабилизации (СКГС)[1], предназначенная для стабилизации линии визирования оптического прибора, состоит из следующих элементов:

- электромеханический узел, который включает датчик угла (ДУ) и моментный двигатель;
- кольцевой трансформатор (КТ), предназначенный для передачи сигнала возбуждения в ДУ;
- контроллер управления СКГС;
- волоконно-оптический гироскоп (далее ВОГ).

Объектом стабилизации является линия визирования оптического блока, включающего призму и зеркало.

В настоящее время для обеспечения работоспособности СКГС применяется частотный метод коррекции. Регулятор, полученный с использованием указанного подхода, позволяет обеспечить требуемую точность стабилизации на качке, однако при воздействии на систему линейных вибраций, частота которых сопоставима с резонансной частотой замкнутой системы, погрешность стабилизации существенно возрастает [2].

Для устранения этого эффекта в работе предлагается регулятор нелинейного типа, обеспечивающий работоспособность СКГС линии визирования как при воздействии качки, так и при воздействии линейных вибраций.

Постановка задачи. Требуется разработать альтернативный закон управления системой гироскопической стабилизации линии визирования в условиях воздействия на неё широкополосных возмущений. Особенностью исследуемой системы является наличие оптических элементов (призма и зеркало), связанных с осью стабилизации, которые увеличивают момент инерции управляемого объекта. Для получения закона управления рассмотрим сначала основные процессы в СКГС.

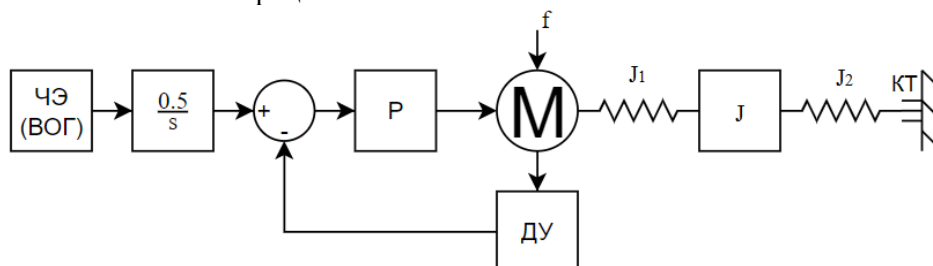


Рис. 1. Функциональная схема СКГС прибора

На рис. 1 ЧЭ – чувствительный элемент, Р – регулятор, f – внешние возмущения, J – момент инерции оптического блока, J_1 – момент инерции ротора моментного двигателя и ДУ, J_2 – момент инерции КТ.

Сигнал, пропорциональный угловой скорости качки, поступает с ВОГ, после чего интегрируется и делится пополам. Полученный угол сравнивается с сигналом с ДУ. Разность

двух углов представляет ошибку стабилизации, на основе которой регулятор вырабатывает управляющие воздействия. При разработке математической модели СКГС учитывалась нежёсткость крепления оптического модуля с МД и КТ. Структурная схема модели СКГС представлена на рис. 2.

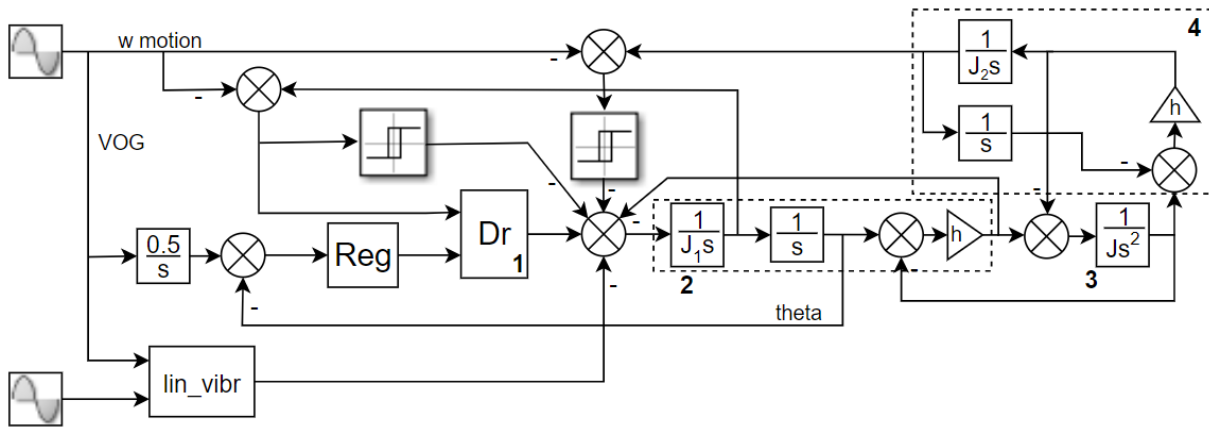


Рис. 2. Модель СКГС с замкнутой системой управления

Здесь “w motion” – угловая скорость качки, “theta” – сигнал с ДУ. Блок “Reg” - регулятор, структура которого разрабатывается. Подсистема 1 – упрощённая модель электромагнитных процессов привода с пропорциональными зависимостями ток-момент и скорость-ЭДС. Момент привода должен компенсировать моменты трения и момент небаланса, возникающий из-за несовпадения центра масс оптического блока и точки пересечения его осей инерции. В качестве модели трения берётся релейная модель, а в качестве модели небаланса – следующие выражения в вертикальной и горизонтальной плоскостях[3]:

$$M_{\theta} = M_{mp,max} \frac{l}{g} p^2 \theta \quad , \quad (1)$$

$$M_z = M_{mp,max} \left(1 + \frac{w}{g} \right) \quad , \quad (2)$$

где $M_{mp,max}$ - максимальный момент трения, l – смещение центра масс относительно центра подвеса, p – оператор дифференцирования, g – ускорение свободного падения, w – скорость линейных вибраций.

Эти выражения сведены в подсистему в виде блока “lin_vibr”. После компенсации моментов возмущения, сигнал полезного момента поступает в подсистему 2, которая описывает механические процессы движения ротора двигателя. На выходе системы управления - сигнал угла поворота оси стабилизатора, который измеряется датчиком угла. Далее этот сигнал поступает в подсистему 3 – блок TF2, которая описывает механические процессы движения оптического блока, где J – момент инерции оптического блока. Подсистема 4 описывает, аналогично подсистеме 2, упругость вала ротора КТ.

Выбор регулятора. Как уже отмечалось выше, на систему действуют широкополосные возмущения. В силу отсутствия иных датчиков, кроме датчика угла, управление осуществляется только по ошибке стабилизации. Значения постоянных параметров классического регулятора ограничены из-за опасности входа в резонансный режим, при этом для обеспечения быстродействия могут потребоваться большие коэффициенты передачи. В связи с этим для управления предлагается использовать регулятор релейного типа. Регуляторы такого типа обладают высоким быстродействием, а также являются не столь чувствительными к различным видам возмущений.

Устойчивость релейных систем управления в отсутствии внешних возмущений определяется с помощью критерия Меерова – релейная система заменяется бесконечным коэффициентом передачи [4]. Для линейного инерционного объекта с релейным управлением по ошибке можно записать

$$W_{Ov} = \frac{a_1 p + a_2 p^2 + a_3 p^3 + \dots + a_n p^n}{b_1 p + b_2 p^2 + b_3 p^3 + \dots + b_m p^m}, n < m, \quad (3)$$

$$\Phi = \frac{x(p)}{u(p)} = \frac{\beta W}{(1 + k_0 \beta W)}, \quad (4)$$

$$\lim_{\beta \rightarrow \infty} \Phi = \frac{1}{k_0}, \quad (5)$$

где $W_{Ov}(p)$ – передаточная функция объекта управления, Φ – передаточная функция замкнутой системы, k_0 – коэффициент передачи обратной связи, β – бесконечный коэффициент передачи, заменяющий релейное звено. При наличии возмущений устойчивость в целом не гарантируется. Высокочастотные помехи приводят к лишнему дребезгу релейного элемента, что может привести к раскачке системы. В связи с этим необходимо ввести предварительную коррекцию. В ходе синтеза регулятора была выбрана псевдолинейная коррекция [5].

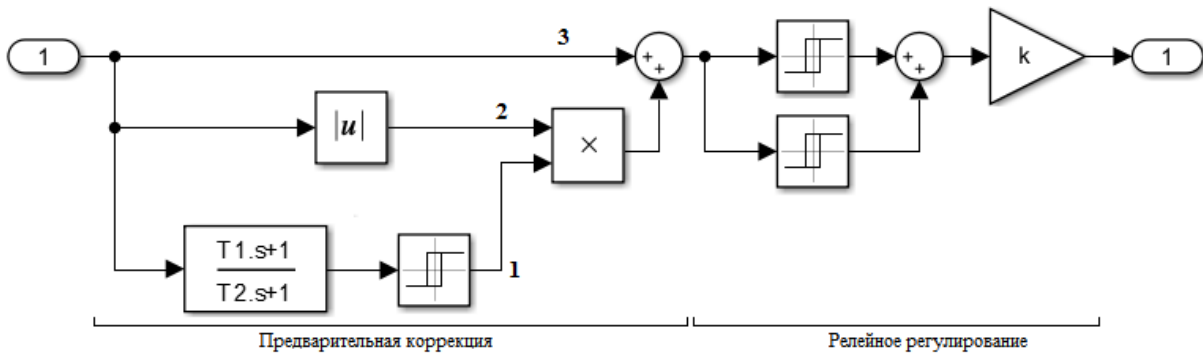


Рис. 4. Структура регулятора

Полная структура регулятора представлена на рисунке 4. По результатам моделирования выбрана система: фазовый канал с фазопережающим звеном (канал 1), пропорциональный амплитудный канал (канал 2), дополнительный пропорциональный канал (канал 3). Параметры T1 и T2 выбираются так, чтобы в диапазоне рабочих частот опережение по фазе было +90°. После псевдолинейного звена включено трёхпозиционное реле и коэффициент усиления, который выбирается эмпирически по результатам моделирования, но при этом не должен превышать единицу.

Моделирование. Для проверки работоспособности предложенного алгоритма проведено математическое моделирование при следующих параметрах системы: $T = 0.0014$ с, коэффициенты ЭДС и момента: $c_e = 0.446$ В*с/м, $c_m = 0.48$ Н*м/А, $J = 0.00193$ кг*м², $J_1 = J_2 = 0.00003$ кг*м², $M_c = 0.00008$ Н*м, $k = 0.06$. При этом возмущения формировались при следующих параметрах: частота качки – 0.7 Гц, амплитуда – 3 гр, частота линейных вибраций ν задавалась в диапазоне 40-150 Гц, при амплитуде 2g, смещение центра масс l в диапазоне 0.0001-0.01 м.

По результатам моделирования, максимальная амплитудная ошибка при различных параметрах возмущения из указанных диапазонов не превосходит 17.5 угл. сек. Таким образом, можно сделать вывод, что точность системы сохраняется в широких пределах изменения параметров.

Заключение. В работе рассмотрена задача синтеза СКГС линии визирования оптического прибора. Предложенный регулятор обеспечивает устойчивость СКГС линии визирования как при воздействии качки, так и при воздействии линейных вибраций. Также достоинством синтезированного регулятора являются небольшое число настраиваемых параметров. В дальнейших исследованиях планируется использовать более сложные модели привода и возмущающих воздействий, а также синтезировать более сложное и качественное управление.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ривкин С.С.** Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании – М: Наука, 1978
2. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования – М: Наука, 1975.
3. **Фабрикант Е.А.** Динамика следящего привода гироскопических стабилизаторов/ Е.А.Фабрикант, Л.Д.Журавлев – М: Машиностроение, 1984
4. **Нестеров С. А.** Адаптивные системы управления: Конспект лекций. СПб.: Факультет технической кибернетики СПбГПУ, 2005. — 90 с.
5. **Попов Е.П.** Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1988. 255 с.

I.R.Gogorev, A.A.Molochnikov (CSRI Electropribor, Saint-Petersburg). **Indirect gyroscopic stabilization system for the optical unit's sighting line.**

The problem of designing a control system of electric drive optical unit's sighting line is considered. There are accuracy requirements for stabilizer electric drive performance, and its stabilization is complicated by the presence of external disturbing influences. In work the model of the electric drive is considered, the control algorithm is offered, results of modeling of work of a control system at various parameters of disturbing influences are presented.

УДК 681.5.015

В. В. ВОРОБЬЕВ, К. Н. КАЛИНИЧЕВ, А. А. ШУРКОВА
(Тульский государственный университет, г. Тула)

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОТОЧНОЙ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рассмотрены вопросы использования метода интеллектуального управления при синтезе высокоточного следящего привода. Построен комплексный закон управления с переменной структурой на базе использования нечеткой логики, который в режимах переброса и слежения обеспечивает жесткие требования задания по времени срабатывания и ошибке слежения в условиях плавного переключения структур. Достоверность полученных результатов подтверждена компьютерным моделированием.

Введение. Актуальность развития прикладных методов проектирования высокоточных следящих систем (СС) обусловлена необходимостью обеспечения постоянно возрастающих требований к быстродействию, точности слежения, энергопотреблению, помехозащищенности и др. Факторами, которые затрудняют синтез управления, являются неполнота математического описания объекта, его высокий порядок, наличие существенных нелинейностей, изменение параметров в широких пределах, неточности измерений переменных, произвольный характер начальных условий, задающих и возмущающих воздействий и др.

На сегодняшний день решены многие практически важные вопросы синтеза СС, в том числе синтеза управления с элементами искусственного интеллекта [1]. Необходимо отметить, что на практике сложно синтезировать закон управления, удовлетворяющий более чем одному критерию качества системы. Вариантом решения этой проблемы является синтез с помощью обобщенного взвешенного критерия качества, который учитывает, например, требования по точности слежения, быстродействию и колебательности.

В работе для синтеза устройства управления предлагается использовать комплексный подход, который сочетает в себе достоинства «быстродействующего» и «точного» законов управления. Такой подход может способствовать повышению эффективности СС за счет сочетания в одном устройстве управления регуляторов с различной структурой. Например, в комплексном законе можно использовать релейный регулятор для достижения высокого быстродействия в режиме переброса, и линейный регулятор для достижения высокой точности в режиме слежения [2-4].

Сочетание нескольких способов управления возможно, например, в классе систем с переменной структурой (СПС) [2-4]. Однако такие системы не лишены недостатков. При переключении с одного регулятора на другой могут возникать нежелательные движения, например, близкие к периодическим колебаниям, скользящие режимы, не исключена потеря устойчивости [4]. Чтобы избежать нежелательных эффектов, функция переключения должна содержать как можно меньше разрывов, а в идеальном случае должна быть гладкой. Добиться гладкой формы поверхности управления и плавного переключения структур классическими методами сложно. Поэтому применение методов искусственного интеллекта, в частности, нечеткой логики, для этих целей является обоснованным.

Теоретическое исследование СПС затруднительно. В связи с этим выбор условий перехода системы с режима переброса на режим слежения и настройка устройства управления структурами целесообразно производить на основе экспериментальных данных, которые получают по результатам динамических испытаний СПС в виртуальном стенде.

Целью работы является формирование комплексного закона управления безредукторным моментным трехфазным двигателем серии AT Drive 115*50. Синтез закона управления, обеспечивающего выполнение жестких требований к качеству управления как в режиме переброса, так и в режиме слежения, осуществляется с использованием методов нечеткой логики.

Разработка алгоритма управления. Рассматриваемый электрический следящий привод (ЭСП) представляет собой сложную нелинейную систему, в которой применяются широтно-импульсная модуляция управления, а также квантования сигналов по времени и уровню. На рисунке 1 представлена функциональная схема устройства управления приводом, реализованного на базе трёх регуляторов: регулятор 1 реализует «быстродействующий» закон управления в режиме переброса; регулятор 2 реализует «точный» закон управления в режиме слежения; нечеткий регулятор (НР) реализует устойчивое и плавное переключение с «быстродействующего» закона управления на «точный».

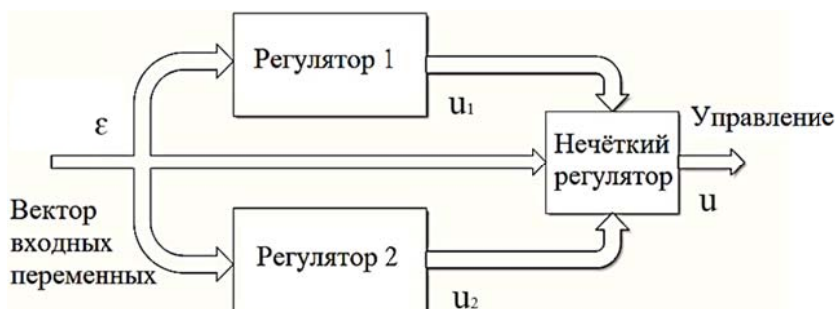


Рис. 1. Функциональная схема устройства управления

Предлагается реализовать «быстродействующий» и «точный» законы управления в классе цифровых линейных регуляторов (частные случаи ПИД-регулятора). При этом синтез регулятора 1 для «быстродействующего» управления и регулятора 2 для «точного» управления должны производиться на основе соответствующих требований к режимам переброса и слежения. Настройка коэффициентов регуляторов 1, 2 производилась по отдельности методом численной параметрической оптимизации с использованием инструментов пакета Signal Constraint системы Matlab.

Устройство управления (рис. 1) формирует результирующее управление в соответствии с выражением для взвешенной суммы сигналов с выходов регуляторов 1 и 2 вида

$$u = u_1 \cdot \alpha(\vec{\varepsilon}) + u_2 \cdot (1 - \alpha(\vec{\varepsilon})), \quad (1)$$

где: u – результирующее управление; u_1 – управление от регулятора 1; $\alpha(\vec{\varepsilon})$ – функция веса; $\vec{\varepsilon}$ – вектор входных переменных, компонентами которого являются модуль ошибки по положению и модуль скорости нагрузки; u_2 – управление от регулятора 2.

Из выражения (1) следует, что во время работы ЭСП задействованы одновременно оба регулятора 1 и 2, причем доля (вес) их участия в формировании результирующего управления объектом определяется нечеткой логической функцией $\alpha(\vec{\varepsilon})$, величина которой принимает значения из диапазона $[0..1]$. НР в алгоритме комплексного управления предназначен для регулирования в реальном времени степени влияния регуляторов 1 и 2 на результирующее управление. Синтез НР (формирование нечеткой функции $\alpha(\vec{\varepsilon})$) производился методами нечеткой логики с использованием пакета Fuzzy Logic системы Matlab [1].

Результаты моделирования. Результаты математического моделирования на ПК, которые подтверждают устойчивость ЭСП и плавность переключений структуры, представлены на рисунках 2, 3 (обозначено: синяя кривая – входной сигнал, красная – выходной).

В цифровом ЭСП синтезированная поверхность функции веса, как и другие функции, формирующие управление объектом, реализуется с помощью микроконтроллера.

Математическое моделирование ЭСП в системе Матлаб показало, что разработанный привод с комплексным законом управления характеризуется низкой чувствительностью к изменениям параметров объекта, таким как момент инерции нагрузки J_n и момент нагрузки M_n . Вид осциллограммы ошибки слежения за эквивалентным гармоническим входным сигналом при $J_n = 2 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и $M_n = 2 \text{ Н}\cdot\text{м}$ приведен на рисунке 4.

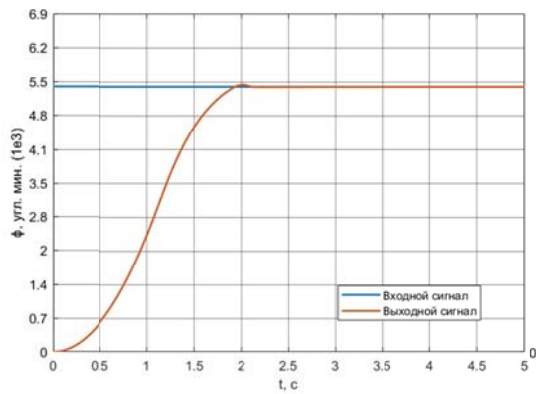


Рис. 2. График переходного процесса по углу поворота нагрузки при ступенчатом входном сигнале уровня 90° (5400 угл. мин)

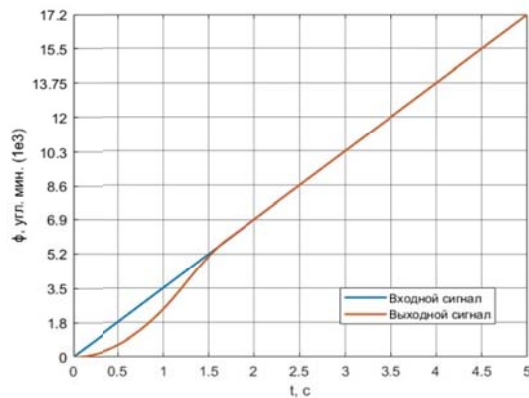


Рис. 3. График переходного процесса по углу поворота нагрузки при линейно-возрастающем входном сигнале со скоростью 3437 угл. мин/с

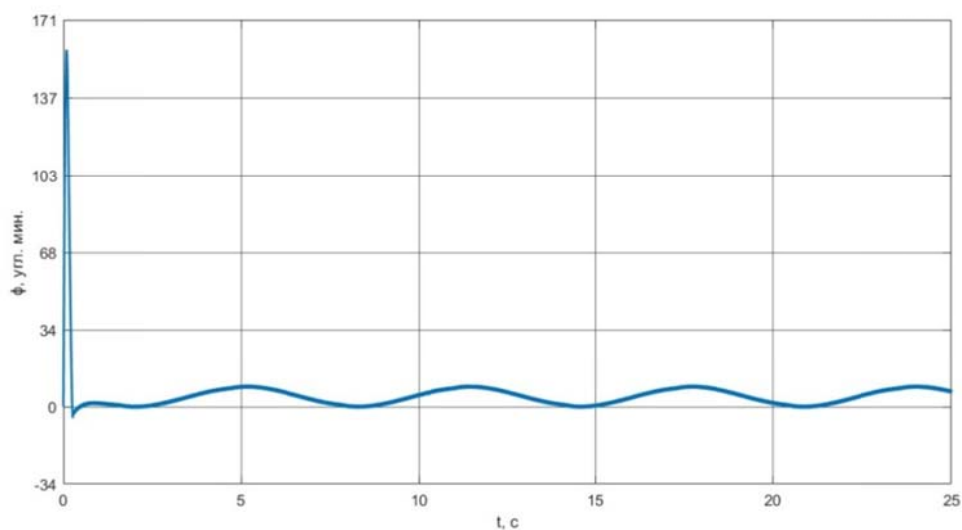


Рис. 4. График изменения во времени ошибки слежения

В таблице 1 для характерных значений момента инерции нагрузки и момента нагрузки даны экспериментальные оценки максимума модуля ошибки за время наблюдения в установившемся режиме слежения за эквивалентным гармоническим входным сигналом.

Таблица 1

Значение J_n , кг·м ²	Значение M_n , Н·м	Максимум модуля ошибки слежения, угл. мин
$J_{n1} = 2$	$M_{n1} = 2$	10,3
$J_{n2} = 5$	$M_{n2} = 5$	5,8
$J_{n3} = 8$	$M_{n3} = 10$	5,1
$J_{n4} = 10$	$M_{n4} = 15$	5,1
$J_{n5} = 12$	$M_{n5} = 20$	12,0

Из таблицы 1 следует, что оценки динамических ошибок ЭСП в широких диапазонах изменений момента инерции нагрузки и момента нагрузки соответствуют жестким требованиям, которые предъявляются ТЗ к современным силовым следящим приводам.

Практически важно, что границы диапазона мгновенной ошибки слежения ЭСП не превышают 12" в условиях изменений в широких пределах момента инерции нагрузки и

момента нагрузки. Для следящих силовых приводов, применяемых в современных управляющих комплексах, это является хорошим показателем.

Заключение. Построен комплексный закон управления с переменной структурой, основанный на использовании нечеткой логики. Комплексный закон предназначен для повышения эффективности управления силовым моментным электроприводом. Подтверждено, что привод отвечает высоким требованиям как в режиме переброса, так и в режиме слежения. Использование НР в комплексном законе управления позволило обеспечить устойчивость системы и плавное переключение структур при обеспечении жестких требований к быстродействию и точности слежения, причем в широких диапазонах изменений момента нагрузки и момента инерции нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник. / Под. ред. Н.Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 744 с.
2. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического управления: [Учебное издание] / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. — СПб: Профессия, 2004. – 752с.
3. Чемоданов Б. К. Следящие приводы: в 3 т., 2-е изд., доп. и перераб. / Б. К. Чемоданов [и др.] – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2003. – 880 с.: ил.
4. Руднев С. А., Есипов А. Н. Комплексное управление силовым следящим гидроприводом // Научно-техн. сборник «Системы автоматического управления и их элементы». – Тула, ТулГУ, 1996. – С. 83 - 86.

V.V.Vorobyov, K.N.Kalinichev, A.A.Shurkova (Tula State University, Tula). **Development of a high-precision tracking system with intelligent control**

The questions of using the method of intelligent control in the synthesis of an electric tracking drive with a variable structure are considered. A complex control law is constructed using fuzzy logic, which provides high quality both in the transfer mode and in the tracking mode with a small number of switchings. The reliability of the results obtained was confirmed by computer modeling.

СЕКЦИЯ 2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 681.51

А. В. МИЩЕНКО, С. С. ПОВАРОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПРИБОРА СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНЕЧНЫХ АВТОМАТОВ

В работе описывается метод разработки программного обеспечения с использованием конечных автоматов, имитирующего работу навигационного приёмника глобальной спутниковой системы. Разработанная программа осуществляет прием и передачу по сети вычисляемых навигационных параметров, позволяя тестировать электронно-картографические навигационные информационные системы (ЭКНИС), проверяя их соответствие требованиям сертификации Международной гидрографической организации части стандарта IEC 61162.

Введение. В связи с развитием техники и информационных технологий работа с приборами и программами постоянно усложняется, как следствие для повышения эффективности отладки и проверки работоспособности необходимо сформировать различные внешние параметры и условия их эксплуатации. Так для отладки проще использовать программные имитаторы, моделирующие реальную работу конкретного устройства. Такой симулятор не выйдет из строя по причине физического износа, поскольку может запускаться на независимом устройстве с поддерживаемой операционной системой. Более того, разработка программной модели обойдется дешевле, её можно расширять по функциональности и тиражировать в неограниченном количестве по сравнению с разработкой или закупкой физического устройства.

При разработке программного симулятора важно сохранить правильность реализованной логики взаимодействия аппаратных элементов имитируемого устройства [1-3]. Одним из вариантов реализации логики является использование конечных автоматов [3-4].

Доклад посвящен методу разработки программного обеспечения с использованием конечных автоматов. Предлагаемый метод рассмотрен на примере моделирования работы спутникового навигационного приёмника Furuno GP-39.

Разработка программного обеспечения с использованием конечных автоматов. Для минимизации ошибки во время проектирования программного обеспечения, необходимо составить предварительное описание его работы. Так в начале разработки необходимо сформировать явные состояния работы программы и описать конечный автомат поведения прибора. Поскольку устройство имеет заданные выраженные режимы работы и четкие условия перехода между ними, то такое описание будет наглядным и естественным. В отличие от обычного подхода, при котором создаются различные переменные и условные конструкции, использование конечных автоматов позволяет четко отделить логику поведения от ее реализации и точно описать характер и причины изменения в поведении программы в виде конечного множества состояний, что позволяет более эффективно проводить отладку и расширение функциональности программ.

Моделирование конечного автомата. Для разработки имитатора были использованы конечные автоматы, основанные на диаграмме состояний (Statecharts diagram) Харела [3]. Диаграмма состояний – это автомат, состоящий из конечного числа состояний, в которые может переходить автомат в зависимости от вызванного события. При этом автомат не обязан находиться только в одном состоянии в одно и то же время, и может содержать сложные составные и параллельные состояния. Принцип работы диаграмм состояний строится на реакции на события вхождения и выхода определенного состояния.

Такие конечные автоматы можно описать на языке разметки State Chart XML (SCXML) и использовать в программе, которая сможет интерпретировать SCXML-файл и транслировать его в код на языке программирования. Но диаграмму состояний в таком формате написать вручную достаточно трудоемко. Поэтому для создания SCXML-файлов был использован графический редактор Scxml Editor [5], который позволяет создавать диаграммы состояний в виде блоков прямоугольной формы с указанием условий перехода, подобно графическому описанию конечного автомата. На рис. 1 показана полученная диаграмма состояний.

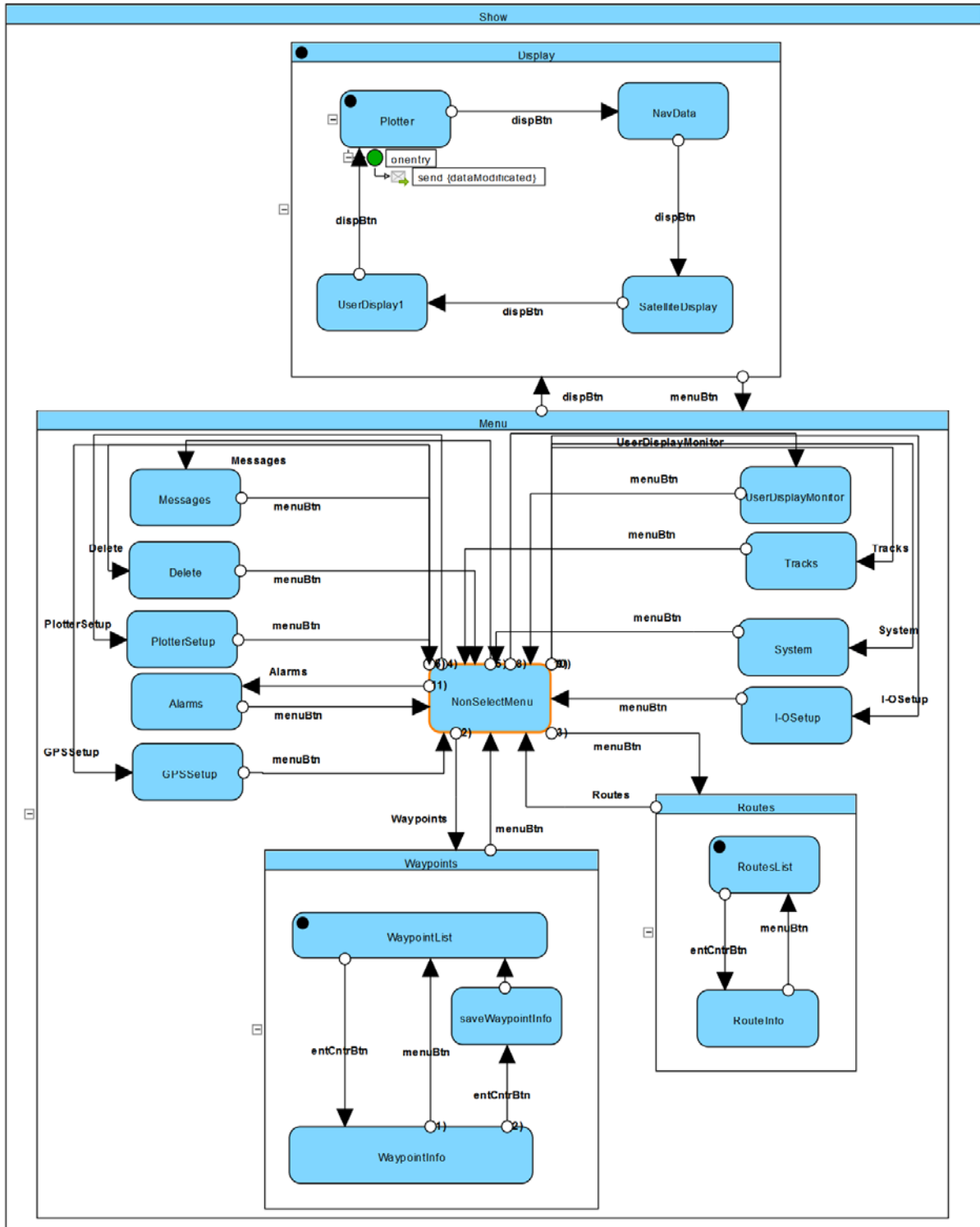


Рис. 1. Диаграмма состояний логики работы модели навигационного приёмника Furuno GP-39 в части «Display» и «Menu».

Полученный автомат задаёт состояния:

- Display: переключение экранов монитора устройства (при нажатии на кнопку «DISP»);
- Menu: переключение экрана меню (при нажатии «MENU»);
- MoveList: переключение с использованием стрелок навигации;
- EntCntr: выбор/подтверждение (при нажатии «ENT CNTR»);
- Signal: проверка работы антенны, приём и отсылка информации;
- состояния включения или отключения: управление работой устройства.

Применение конечного автомата. Для разработки программного обеспечения, имитирующего интерфейс прибора Furuno GP-39, была выбрана библиотека Qt на языке C++. Поскольку библиотека Qt используется в технологическом стеке разработки ЭКНИС, это позволяет запускать программу без установки дополнительного программного обеспечения и модифицировать саму программу в случае необходимости. Плюс библиотека имеет свой интерпретатор SCXML, который не только транслирует файлы SCXML в объекты класса QScxmlStateMachine на языке C++, но и предоставляет интерфейс для связывания переходов состояний с функциями интерфейса программы. На рис. 2 показан интерфейс разработанной программы.

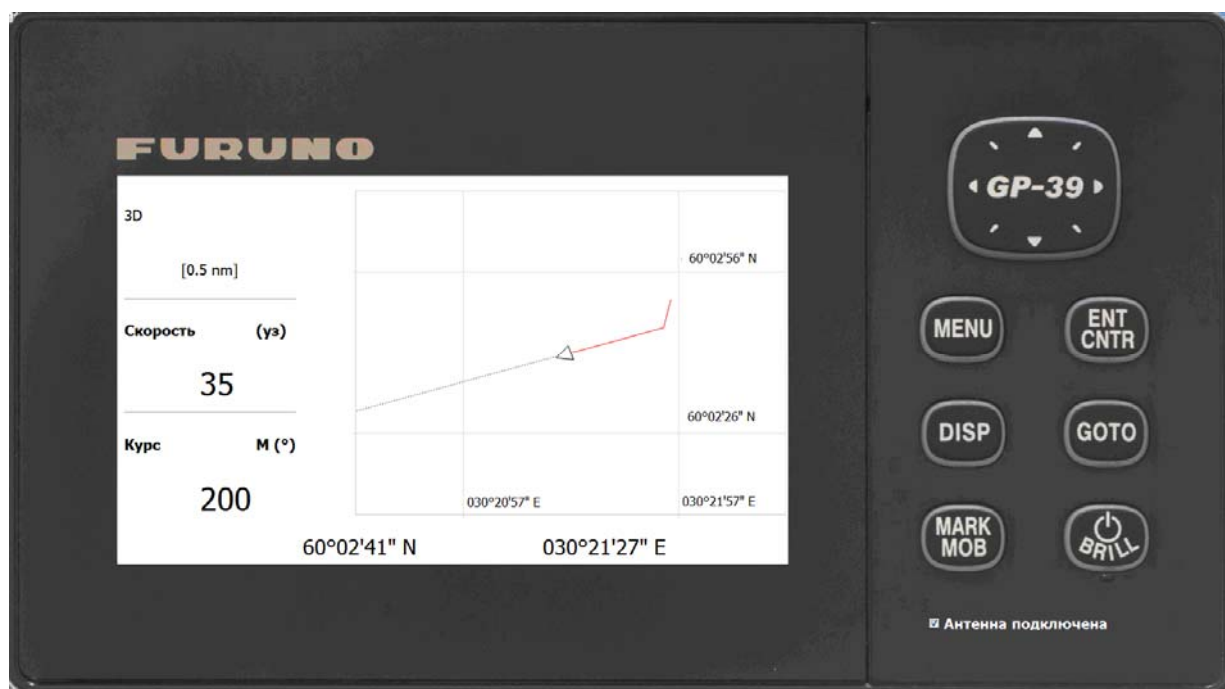


Рис. 2. Интерфейс разработанной программы, имитирующей работу устройства Furuno GP-39.

Данная программа получает и отправляет текстовые сообщения по сети в виде датаграмм согласно стандартам IEC 61162-1 [6] и IEC 61162-450 [7], позволяя обмениваться данными с другими программами и устройствами, в том числе проверяя правильность расшифровки сообщений в ЭКНИС.

Заключение. Рассмотрен метод разработки программного обеспечения с использованием конечных автоматов в виде диаграмм состояний на языке SCXML. Благодаря методу на основе конечных автоматов, успешно спроектировано программное обеспечение, имитирующее работу интерфейса устройства глобальной спутниковой навигации Furuno GP-39. Программа имитатора навигационного приёмника была проверена совместно с ЭКНИС и может дополняться по функциональности в зависимости от требований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лукоянов Е. В., Грузликов А. М.** Алгоритм синтеза иерархической модели распределенной вычислительной системы // В сборнике: Навигация и управление движением: Материалы XXII конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 17–20 марта 2020 года. Санкт-Петербург: «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. с. 339-341.
2. **Лукоянов Е. В., Грузликов А. М.** Синтез иерархической диагностической модели потоковой вычислительной системы реального времени // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2020. Т. 20. № 5. с. 677–682.
3. **Поликарпова Н. И., Шальто А. А.** Автоматное программирование. 2008. — 167 с.: ил.
4. **Серебряков В. А., Галочкин М. П., Гончар Д. Р., Фуругян М. Г.** Теория и реализация языков программирования М.: МЗ-Пресс, 2006 г. 2-е изд.
5. Scxml Editor 2.2. [Электронный ресурс]. URL: github.com/alexzhornyak/ScxmlEditor-Tutorial
6. IEC 61162–1 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Digital interfaces – Part 1: Single talker and multiple listeners.
7. IEC 61162–450 Maritime navigation and radiocommunication equipment and systems – Digital interfaces – Part 450: Multiple talkers and multiple listeners – Ethernet interconnection.

A.V. Mishchenko, S.S. Povarov (CSRI Electropribor, Saint-Petersburg). **Satellite navigation system device simulation using state machines**

The work describes the method of developing a software product using state machines, which simulates the work of the navigator of the global satellite system. The developed application receives and transmits calculated navigational parameters through the network, allowing testing electronic cartographic navigation information systems, checking their compliance with the requirements of the International Hydrographic Organization part of the standard IEC 61162.

УДК 621.396.

Е.Г. ЛИТУНЕНКО, Ю.М. СКОРОДУМОВ, М.В. ТОЛМАЧЕВА
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)Р.Л. КРЮЧКОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина))**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБМЕНОВ
В СЕТИ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ***Рассматривается проблема упорядочивания информационных обменов в сети автономных необитаемых подводных аппаратов. Предложены субоптимальные алгоритмы планирования последовательности информационных обменов.*

Введение. Проблема связи в сети автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) широко обсуждается в современной литературе в связи с необходимостью на практике проведения подводных работ различного назначения [1,2]. При этом необходимым условием успешности миссий является качественная связь между аппаратами, позволяющая координировать их действия. Проблема сетевого взаимодействия не является новой. В наземном варианте ее решения хорошо известны и достаточно эффективны, однако звукоподводная связь АНПА имеет существенные особенности, в частности, ограниченность ресурсов, подвижность аппаратов и низкая скорость передачи информации, заставляющие разработчиков проводить дополнительные исследования. В списке ограничиваемых ресурсов значимое место занимают энергоресурсы. Следствием этого фактора является, в том числе, стремление к использованию для передаваемых информационных сообщений кратчайших маршрутов, а также их оптимальное упорядочивание в рамках сеансов обмена. Настоящий доклад фокусируется на последней проблеме.

Постановка задачи. В докладе предполагается, что каждый узел (аппарат) сети с заданным периодом излучает сложившуюся к началу текущего сеанса последовательность сообщений (выходная очередь сообщений). Источниками для выходной очереди сообщений являются входная очередь сообщений, поступивших в узел в течение прошедшего периода, а также внутренние сообщения, сгенерированные в узле. Из входной очереди в выходную переносятся транслируемые данным узлом сообщения. Представляется, что упорядоченность выходной очереди сокращает время доставки сообщений и влияет на эффективность (энергоэффективность) связи. В качестве критерия эффективности будем использовать среднее по сообщениям время $\bar{\Delta}$ доставки сообщения. При этом под временем доставки Δ сообщения, находящегося на k -й позиции в очереди, будем понимать сумму времен ожидания $e_{[k]}^w$ в очереди и переноса $e_{[k]}^{(i,j)}$ сообщения от i -го узла источника к j -му узлу адресату. При этом, длительность переноса k -го в очереди сообщения (время от момента начала передачи сообщения до момента конца его приема) между i -м и j -м узлами определяется выражением

$$e_{[k]}^{(i,j)} = e_{[k]} + \frac{d(i,j)}{v} = e_{[k]} + e_{[k]}^{d(i,j)},$$

где $e_{[k]}$ - длительность сообщения на k -й позиции в очереди, $e_{[k]}^d = \frac{d_{i,j}}{v}$ время прохождения сигнала между i -м и j -м узлами, $d_{i,j}$ - расстояние между i -м и j -м узлами, v - скорость распространения звука в данной акватории.

Научный руководитель – профессор, д.т.н., г.н.с., Колесов Николай Викторович.

Проблема состоит в разработке алгоритмов наилучшего упорядочения (планирования) выходной очереди. Для этого в докладе предлагается идти по пути использования известных [3, 4] и разработки новых алгоритмов планирования.

Алгоритмы планирования сеансов обмена. Рассмотрим общую проблему планирования сеанса обмена, как набор частных случаев.

Алгоритмы планирования для неупорядоченных сообщений. Рассмотрим сначала случай, когда на множестве передаваемых сообщений отсутствует какая-либо предварительная упорядоченность. В качестве критерия используем оценку (верхнюю границу) $\hat{\Delta}_s$ для суммарного времени доставки всех сообщений. Алгоритм упорядочивания сообщений имеет следующий вид: величина $\hat{\Delta}_s$ в системе связи из n неупорядоченных сообщений минимальна, если сообщения упорядочены по неубыванию длительностей:

$$e_{[1]} \leq e_{[2]} \leq \dots \leq e_{[n_i]}$$

Пусть на множестве сообщений нужно задавать некоторые предпочтения. Тогда можно использовать в качестве критерия верхнюю границу $\hat{\Delta}_s^w$ суммарного взвешенного времени доставки сообщений

$$\hat{\Delta}_s^w = \sum_{k=1}^n w_{[k]} \hat{\Delta}_{[k]},$$

где w_k - вес сообщения, расположенного на k -й позиции в очереди.

В этом случае верхняя граница $\hat{\Delta}_s^w$ для суммарного взвешенного времени доставки неупорядоченных сообщений в системе связи минимальна, если выполняется

$$\frac{e_{[1]}}{w_1} \leq \frac{e_{[2]}}{w_2} \leq \dots \leq \frac{e_{[n_i]}}{w_{n_i}}.$$

Алгоритмы планирования для частично упорядоченных сообщений. Пусть планируемые для передачи сообщения частично упорядочены путем разбиения на p непересекающихся групп строгим упорядочением сообщений внутри них и размером n_i $i = \overline{1, p}$. Подобное упорядочение может потребоваться в силу разных дополнительных соображений, связанных с управлением передачей информации через сеть. Предполагается, что при составлении общего плана должен сохраняться зафиксированный в группе порядок передачи сообщений, а прерывания групп сообщений запрещены. Обозначим через e'_i суммарную длительность i -й группы сообщений

$$e'_i = \sum_{j=1}^{n_i} e_{i,j}, \quad j = \overline{1, n_i}.$$

Алгоритм упорядочивания сообщений описывается следующим образом: верхняя граница $\hat{\Delta}_s^w$ для суммарного времени доставки сообщений в системе связи с p строго упорядоченными группами при запрете прерываний групп минимально, если группы в плане упорядочены по неубыванию длительностей

$$e'_{[1]} \leq e'_{[2]} \leq \dots \leq e'_{[p]}.$$

Ситуация усложняется, когда в условиях требуется минимизировать среднюю по сообщениям верхнюю границу $\bar{\Delta}$ времени доставки. Тогда, если $n_{[k]}$ - размер группы, находящейся на k -й позиции в очереди, то алгоритм имеет вид: верхняя граница $\bar{\Delta}$ среднего времени доставки сообщений в системе связи с p строго упорядоченными группами при запрете прерываний групп минимально, если группы в плане упорядочены по неубыванию длительностей

$$\frac{e'_{[1]}}{n_{[1]}} \leq \frac{e'_{[2]}}{n_{[2]}} \leq \dots \leq \frac{e'_{[p]}}{n_{[p]}} .$$

Заключение. Предложены субоптимальные алгоритмы упорядочивания сообщений в сетях АНПА по критерию минимума оценки верхних границ суммарного и/или среднего времени доставки сообщений. В ходе дальнейших работ планируется создание имитационной модели для апробации предложенных алгоритмов на сетях различной конфигурации.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФ № 22-29-00339

ЛИТЕРАТУРА

1. **М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко и др.** Автономные подводные роботы: системы и технологии – М.: Наука, 2005. – 398 с.
2. **Henry Dol, Paolo Casari, Timo van der Zwan, and Roald Otne.** Software-Defined Underwater Acoustic Modems: Historical Review and the NILUS Approach// IEEE journal of oceanic engineering. 2016.
3. **Конвей Р.В., Максвелл В.Л., Миллер Л.В.** Теория расписаний. – М.: Наука, 1975. – 282 с.
4. **Грузликов А.М., Колесов Н.В., Скородумов Ю.М., Толмачева М.В.** Планирование заданий в распределенных системах реального времени // ТиСУ, № 2, 2017.

E.G. Litunenko, Iu. M. Skorodumov, M.V. Tolmacheva (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, Russia), R.L. Kryuchkov (CSRI Elektropribor, Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg). **Energy-efficient scheduling of information exchange in a network of autonomous underwater vehicles**

The problem of ordering information exchanges in the network of autonomous underwater vehicles is considered. Suboptimal algorithms for scheduling the sequence of information exchanges are proposed.

УДК 621.396.

Е.Г. ЛИТУНЕНКО, А.М. ГРУЗЛИКОВ, Ю.М. СКОРОДУМОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЙ СЕТИ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Рассмотрена концепция взаимодействия абонентов сети подводных аппаратов и результаты испытаний ее макета. Предложен алгоритм моделирования сети подводных аппаратов в случае наличия большего количества подводных аппаратов и возникновения необходимости маршрутизации сообщений с целью повышения энергоэффективности сети.

Введение. Автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА) широко применяются при работе в экстремальных условиях, что позволяет решить задачу сбора информации в интересах геологоразведочных, поисковых, океанографических и других исследований.

Одно из ограничений использования АНПА – фактор времени, например, в задачах поиска и обследования затонувших объектов, патрулирования и др. В таких случаях применяется мультиагентный подход, с обменом информацией между агентами для координации совместных действий. При построении мультиагентной системы с использованием в качестве агентов – АНПА [1, 2], информационное взаимодействие между аппаратами осуществляется с использованием средств звукоподводной связи (ЗПС). Особенности условий эксплуатации средств ЗПС являются зависимость коэффициента затухания гидроакустического сигнала от частоты, многолучевое распространение, обнаружение сигнала в условиях априорной неопределенности помехо-сигнальной обстановки [3]. Эти особенности приводят как к существенному ограничению скорости обмена (килобиты в секунду), так и к ограничению радиуса обмена информацией между аппаратами. Последнее создает необходимость планирования маршрута обмена с использованием узлов в качестве ретрансляторов, причем маршрут должен динамически меняться из-за изменения топологии сети АНПА. При этом, с учетом вышеуказанных ограничений, использование стандартных для надводных сетей протоколов является неэффективным [4–6].

Настоящий реферат посвящен вопросам организации сетевой связи и маршрутизации сообщений в сети АНПА. Ниже приведены разработанная концепция информационно-технического взаимодействия между абонентами сети, результаты макетирования и натурных испытаний, а также принципы построения модели, позволяющей реализовать и проверить алгоритмы планирования в сетях, состоящих из большого количества абонентов.

Концепция информационно-технического взаимодействия. Рассматриваемая подводная сеть включает в себя не только неподвижные и дрейфующие узлы, но и подвижные подводные аппараты, оснащенные приемными и излучающими гидроакустическими антеннами, и модемом для формирования и первичной обработки сигналов. Поскольку некоторые узлы сети могут независимо передвигаться в любых направлениях и, как следствие, часто разрывать и устанавливать соединения с ее участниками, они должны быть способны соединяться «на лету», образуя сеть, а также иметь возможность осуществлять ретрансляцию данных, предназначенных другим узлам. Для успешного функционирования сети абоненты должны динамически определять, какому узлу пересылать данные, что осуществляется на основании информации таблиц маршрутизации, формирующихся в ходе работы сети.

Для разделения сообщений, одновременно приходящих к абонентам, применяется пространственное разрешение, которое обеспечивается приемной гидроакустической антенной решеткой, реализующей прием сигналов со всех направлений. Однако такое разрешение ограничено количеством чувствительных элементов и их характеристиками направленности, поэтому планируется комбинировать метод пространственного разделения с частотным, когда в конкурирующих за канал передачи информации абонентах выделяют для обмена данными некоторые поддиапазоны в рабочем диапазоне частот. Следует также отметить, что режимы приема и из-

лучения сигнала в каждом узле разнесены во времени, и все узлы рассматриваемой сети синхронизированы и работают в системе единого времени. Таким образом, переключения между режимами приема и излучения производятся синхронно для всех абонентов.

Узлы сети осуществляют обмен информацией в соответствии с предварительно сформированной или задаваемой внешней системой управления (при ее наличии) программой. Она обмена определяет последовательность, информационное содержание и маршрут передачи сообщений. Внутри сети могут передаваться таблицы маршрутизации, навигационные пакеты данных, пользовательские сообщения и тестовые файлы.

В общем случае, предполагается использовать сеть, работа которой организована по принципу «каждый с каждым»: абоненты связываются друг с другом напрямую или с помощью ближайших ретрансляторов, центральный узел, обеспечивающий взаимодействие между всеми абонентами, отсутствует. Такая схема позволяет повысить надежность и отказоустойчивость системы, поскольку выход из строя одного устройства из состава сети значительным образом не повлияет на ее работоспособность. Кроме того, такая топология позволяет повысить и энергоэффективность системы, ведь одновременно могут взаимодействовать несколько разных подгрупп абонентов в сети и обмениваться различной информацией.

Маршрутизация в сети осуществляется за счет таблиц маршрутизации, построение которых динамически производится в узлах по результату информационного взаимодействия. Каждое принятое узлом сообщение (пакет данных) используется для актуализации его локальной таблицы маршрутизации.

В случае наличия прямого доступа к узлу-получателю, узел-отправитель формирует целевой пакет для передачи в режиме «точка-точка». В случае отсутствия прямого доступа к узлу-получателю и информации о маршруте передачи, узел-отправитель формирует целевой пакет для передачи в режиме широковещательной рассылки. Каждый узел, принявший широковещательный пакет, производит анализ полей заголовка пакета для определения дальнейшего маршрута его передачи и актуализации своей локальной таблицы маршрутизации.

Модель сети подводных аппаратов. Для оценки работы алгоритмов на сети, включающей в себя большое количество абонентов, необходимо создать имитационную модель. Кроме того, в большой сети появляется проблема очередей: один абонент может выступать в качестве ретранслятора для сообщений, поступающих одновременно от разных узлов. В таком случае, в основе построения энергоэффективного алгоритма информационного обмена между абонентами сети лежит задача упорядочивания очередей и планирования маршрутов передачи сообщений таким образом, чтобы минимизировать время нахождения сообщений в сети. Для оценки энергоэффективности решения этих задач, необходимо построить модель, руководствуясь следующими принципами:

1. В общем случае маршрут передачи сообщения состоит из последовательности шагов, на каждом из которых осуществляется трансляция сообщения через один из узлов. В простейшем случае маршрут одношаговый.
2. Для любого сообщения маршрут всегда существует (аппараты не расходятся слишком далеко друг от друга).
3. Время передачи сообщения на одном шаге маршрута существенно больше шага моделирования, но всегда меньше или равно длительности сеанса информационного обмена.
4. Поток сообщений каждого узла формируется как пуассоновский (ординарный, стационарный и без последействия) с интенсивностью λ_i .
5. В каждом узле реализуется алгоритм передачи и приема сообщений, включающий процедуру маршрутизации с формированием топологии сети и с предварительным упорядочиванием очереди выдаваемых сообщений.
6. Моделирование сети - псевдопараллельное, когда процесс моделирования разбивается на мелкие шаги, и состояние всех объектов сети на $(i+1)$ -м шаге рассчитывается на основе их состояния на i -м шаге.

Макетирование сети подводных аппаратов. В рамках более ранних работ разработан алгоритм информационно-технического взаимодействия между абонентами сети подводных аппаратов [7]. Он апробирован путем моделирования и макетирования. Разработанный макет

представляет собой три дрейфующих узла (буи) и один подвижный буксируемый подводный аппарат (БПА), выполняющий роль имитатора АНПА. Все объекты оснащены ненаправленными в горизонтальной плоскости излучающими гидроакустическими антеннами и приемными антенными решетками, обеспечивающими пространственное разделение каналов приема.

В ходе проведения натурных испытаний рассматривалось три конфигурации сети и соответствующие им режимы работы:

1. Три буя и БПА (рис. 1а) – ширококвещательная передача данных, связь «каждый с каждым».
2. Три буя (рис. 2б) – адресная передача данных, ретрансляция сообщений.
3. Три буя и БПА (рис. 1в) – адресная передача данных, ретрансляция сообщений.

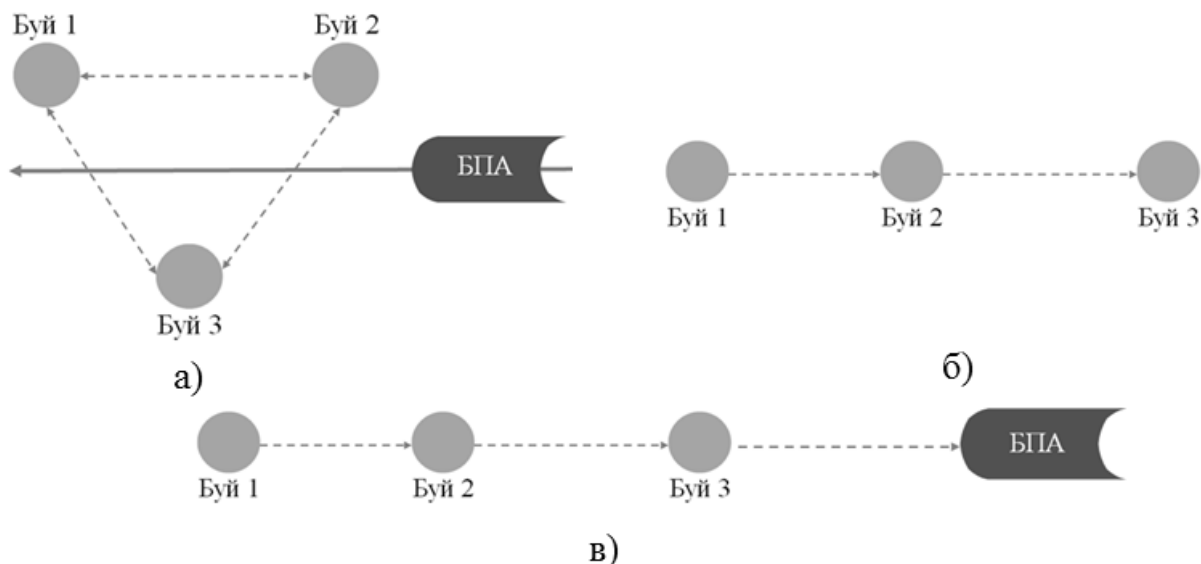


Рис. 1. Конфигурации сети при проведении натурных испытаний

При этом, в конфигурациях 1 и 3 состав сети и ее топология динамически изменялись. В результате испытаний подтверждено функционирование сети из трех дрейфующих буев и одного подвижного объекта при использовании разработанных алгоритмов, основанных на таблицах маршрутизации.

В ходе проведенной натурной отработки также произведена апробация разработанного макета в применении к решению навигационной задачи для подводного аппарата. В такой конфигурации сети дрейфующие узлы представляли собой гидроакустическую навигационную систему с длинной базой, с помощью которой БПА смог скорректировать значения собственных координат.

Заключение. Рассмотрена концепция взаимодействия абонентов сети подводных аппаратов и результаты испытаний ее макета. Предложен алгоритм моделирования сети подводных аппаратов в случае наличия большего количества подводных аппаратов и возникновения необходимости маршрутизации сообщений с целью повышения энергоэффективности сети. В рамках дальнейших исследований планируется расширение функционала имитационной модели сети подводных аппаратов в части алгоритмов планирования очереди сообщений и выбора оптимального маршрута передачи сообщений.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ № 22-29-00339

ЛИТЕРАТУРА

1. **Федосов В.П. и др.** Сети связи для подводных автономных роботизированных комплексов. Таганрог: ЮФУ, 2018. 178 с.
2. **Туфанов И.Е., Щербатюк А.Ф.** Некоторые результаты морских испытаний централизованной системы управления группой морских роботов // Управление большими системами. 2016. №59. С. 233–246.

3. **К. Г. Кебкал, А. И. Машошин, Н. В. Мороз** Пути решения проблем создания сетевой подводной связи и позиционирования. Гироскопия и навигация. Том 27, № 2 (105), 2019, с. 106-135.
4. **Sozer E. M., Stojanovic M., Proakis J. G.** Underwater acoustic networks //IEEE journal of oceanic engineering. – 2000. – Т. 25. – №. 1. – С. 72-83.
5. **Ayaz M. et al.** A survey on routing techniques in underwater wireless sensor networks //Journal of Network and Computer Applications. – 2011. – Т. 34. – №. 6. – С. 1908-1927.
6. **Domingo M. C.** An overview of the internet of underwater things //Journal of Network and Computer Applications. – 2012. – Т. 35. – №. 6. – С. 1879-1890.
7. **Литуненко Е. Г., Поляков Д. Ю., Крючков Р. Л.** Принципы взаимодействия абонентов гидроакустической сети //Навигация и управление движением. – 2021. – С. 321-323.

ЗУДК 681.51

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Описано моделирование системы управления автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА), которое позволяет отрабатывать алгоритмы управления, реализуемые в системе управления АНПА, а также взаимодействие систем АНПА в процессе выполнения миссии. Приведены результаты функционирования системы управления АНПА в процессе выполнения типовой миссии АНПА.

Введение. Автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) являются перспективным средством исследования и освоения Мирового океана [1–8].

Наиболее актуально применение АНПА в районах, покрытых льдом, а также на больших глубинах, недоступных для подводных лодок.

Особое место среди АНПА занимают аппараты тяжелого класса, которые могут взять на себя многие функции, традиционно возлагавшиеся на специализированные суда. Тяжелые АНПА могут эффективно использоваться также в военной сфере, поскольку их применение хорошо вписывается в концепцию сетецентрической войны на море, возобладавшую в мире в последние десятилетия [9–11].

Поскольку АНПА являются автономно действующими подводными роботами, их создание сопряжено с решением значительного количества научно-технических проблем. При этом одним из ключевых вопросов является создание эффективной системы управления, которая определяется способностью обеспечить точное выполнение предварительно загруженного маршрутного задания, представляющего собой разработанный человеком-оператором набор формализованных инструкций, привязанных ко времени и географическим координатам [12–18].

Вместе с тем имеется ряд негативных факторов, препятствующих выполнению маршрутного задания: неподвижные и подвижные объекты, не учтенные при построении маршрутного задания, скорость и направления течения в районе, возможные технические неисправности аппаратно-программных средств АНПА. Эти факторы, а также необходимость учитывать объем запасов электроэнергии, ограничения по скорости хода и глубине погружения, точность автономной навигации, дальность гидроакустической связи существенно затрудняют принятие эффективного решения, обеспечивающего достижение цели миссии.

Поскольку отработка алгоритмов, реализуемых системой управления АНПА, в реальных условиях затруднена, целесообразно их отрабатывать путём моделирования с использованием специального стенда, воспроизводящего условия выполнения реальной миссии.

Целью работы является моделирование системы управления АНПА с использованием стенда, имитирующего внешнюю обстановку выполнения миссии, входные сигналы антенн и датчиков, а также работу систем АНПА.

Описание моделирования системы управления. Для моделирования системы управления АНПА необходимо иметь:

- программную реализацию системы управления (которую принято называть программным комплексом управления [1]);
- программные модели всех систем АНПА;
- программные имитаторы внешней обстановки, включая имитаторы подвижных и неподвижных объектов, гидроакустических условий);

Научный руководитель д.т.н, проф., начальник НИЦ «ИСОО», Машошин Андрей Иванович.

- программные имитаторы сигналов на выходе гидроакустических антенн и различных датчиков;
- программные средства отображения в динамике внешних условий, траектории движения АНПА в трёхмерном подводном пространстве, работы диспетчера, функционирования каждой из систем АНПА.

Все перечисленные компоненты вошли в состав стенда моделирования, структура программного обеспечения (ПО) которого приведена на рис. 1. Каждый блок, независимо от того, какое ПО входит в его состав, имеет выход на отображение результатов моделирования.

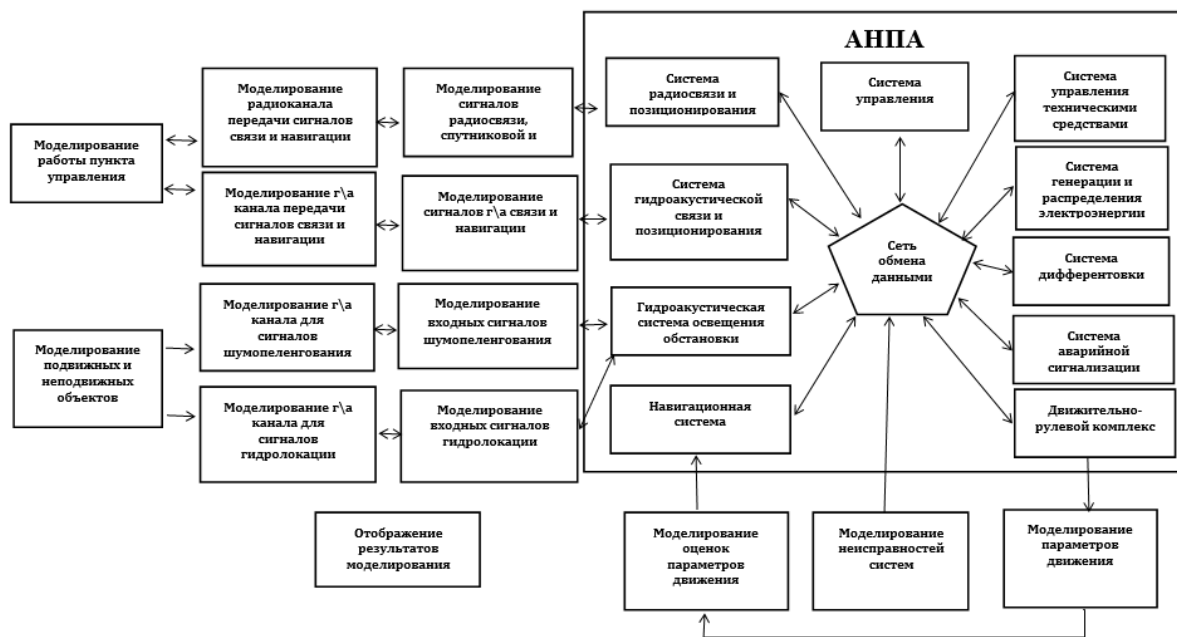


Рис. 1. Структура программного обеспечения стенда моделирования алгоритмов управления АНПА

Блоки, отвечающие за моделирование входных сигналов антенн и датчиков АНПА, имитируют:

- географические и гидроакустические условия в районе миссии АНПА;
- навигационно-гидрографические средства, установленные в районе (сигналы спутниковой и радио - навигационной систем, сигналы донных маяков-ответчиков, пассивные подводные ориентиры);
- подвижные подводные и надводные объекты;
- неподвижные препятствия (береговая черта, подводные горы);
- входные сигналы режимов гидролокации и шумопеленгования гидроакустической системы освещения обстановки;
- входные сигналы навигационных датчиков измерения курса, скорости, глубины АНПА и глубины под килём;
- входные сигналы систем радио- и гидроакустической связи;
- динамику расхода запаса электроэнергии;
- динамику выхода из строя технических средств АНПА.

Моделирование движения АНПА осуществляется следующим образом. Диспетчер в соответствии с маршрутным заданием и с учетом сложившейся обстановки выдает системе управления техническими средствами (СУТС) параметры движения АНПА, которые нужно установить. СУТС с использованием кинематической модели АНПА вырабатывает команды, которые передаются техническим системам АНПА для выполнения поступившего задания. Затем в соответствующем блоке моделируются параметры движения АНПА, которые устанавливает с учетом ограничений и возможных возникших неисправностей движительно-рулевой комплекс.

К ним в блоке моделирования оценок параметров движения добавляются систематические и случайные ошибки, характерные для навигационных приборов. Оценки параметров движения поступают в навигационную систему, выполняющую с их использованием штурманскую прокладку.

Для отработки основных алгоритмов системы управления АНПА с помощью стенда моделирования была задана актуальная миссия – обнаружение в районе затонувшего самолёта. Согласно маршрутному заданию, АНПА, выйдя из базы, должен дойти до назначенного района и найти там затонувший самолет, определить его координаты и сообщить их на пункт управления по спутниковому каналу связи, после чего вернуться на базу. Самолет предписано искать с помощью гидролокатора освещения обстановки во время движения по раскручивающейся спирали, начинающейся в точке предполагаемого нахождения самолёта. Каждые 24 часа аппарат должен определять свое место по сигналам спутниковой навигационной системы. В ходе плавания, кроме целевой задачи миссии, АНПА должен решать вспомогательные задачи, в частности контролировать запас электроэнергии и осуществлять обнаружение подвижных и неподвижных объектов с последующим расхождением с ними (обходом их).

Результаты моделирования. При комплексном моделировании всех систем АНПА, а также внешней обстановки и входных сигналов в рамках заданной миссии на стенде удалось проверить и отработать основные алгоритмы системы управления АНПА: движение в заданную точку, управление техническими средствами в задачи обеспечения безопасности плавания, управление техническими средствами в задаче проведения обсервации, управление техническими средствами в задаче поиска назначенного объекта, оперативный контроль и диагностика технических средств АНПА, контроль выполнения задач, предписанных в маршрутном задании, алгоритм принятия решений при возникновении внештатных ситуаций.

Заключение. В докладе приведено описание моделирования системы управления АНПА с использованием стенда, позволяющего отработать алгоритмы системы управления без значительных временных и материальных ресурсов.

Работа проводилась при поддержке гранта РФ (проект 22-29-00320)

ЛИТЕРАТУРА

1. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение /А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк [отв. ред. Л.В. Киселев]. Владивосток: Дальнаука. 2018. 368 с.
2. Инзарцев А.В. и др. Применение автономного необитаемого подводного аппарата для научных исследований в Арктике // Подводные исследования и робототехника. 2007. №2 (4). С. 5–14.
3. Боженков Ю.А. Использование автономных необитаемых подводных аппаратов для исследования Арктики и Антарктики // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. №1. С. 4–68.
4. Millar G., Mackay L., Maneuvering Under the Ice // Sea Technology, 2015, vol.56, no.4, pp. 35–38.
5. Гизитдинова М.Р., Кузьмицкий М.А. Мобильные подводные роботы в современной океанографии и гидрофизике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 3. №1. С. 4–13.
6. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век. Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011. 304 с.
7. Белоусов И. Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2013. №5. С. 79–88.
8. Кузьмицкий М.А., Гизитдинова М.Р. Мобильные подводные роботы в решении задач ВМФ: Современные технологии и перспективы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2011. Т. 4. №3. С. 37–48.
9. Sebrowski A.K., Garstka J.J., Network-centric warfare: its origins and future, U.S. Naval Institute Proceedings, 1998, №1.
10. Баулин В., Кондратьев А. Реализация концепции «сетевая война» в ВМС США // Зарубежное военное обозрение. 2009. №6. С. 61–67.
11. Буенок В.М. Организационный и научно-технический базис сетевых войн // Военный парад. 2010. №1. С. 14–17.
12. Борейко А.А., Инзарцев А.В., Машошин А.И., Павин А.М., Пашкевич И.В. Система управления АНПА большой автономности на базе мультиагентного подхода // Подводные исследования и робототехника. 2019. №2 (28). С. 23–31.
13. Rajan, K., et al. Remote agent: an autonomous control system for the new millennium, *Proc. of prestigious applications of intelligent systems, European conference on artificial intelligence (ECAI)*, Berlin, 2000.

14. Innocenti, B., A multi-agent architecture with distributed coordination for an autonomous robot. Ph.D. dissertation, Universitat de Girona, 2009.
15. Kim, T.W., Yuh, J., Development of a real-time control architecture for a semiautonomous underwater vehicle for intervention missions, Autonomous Systems Laboratory, Department of Mechanical Engineering, University of Hawaii, 2003, pp. 1521–1530.
16. Sutarto H., Budiyo A. Development of linear parameter varying control system for autonomous underwater vehicle, *Indian J. Geo-Marine Sci.*, 2011, vol. 40, pp. 275–286.
17. Sarhadi, P., Noei, A.R., Khosravi, A., Model reference adaptive autopilot with anti-windup compensator for an autonomous underwater vehicle: Design and hardware in the loop implementation results, *Appl. Ocean Res.*, 2017, vol. 62, pp. 27–36.
18. Geranmehr, B., Nekoo, S.R., Nonlinear suboptimal control of fully coupled non-affine six-DOF autonomous underwater vehicle using the state-dependent Riccati equation, *Ocean Eng.*, 2015, vol. 96, pp. 248–257.

V.S.Bykova (SRC Electropibor, JSC , Saint-Petersburg). **Simulation of the control system of an autonomous unmanned underwater.**

A simulation the control system of an autonomous uninhabited underwater vehicle (AUV) is described, which makes it possible to work out control algorithms implemented in the AUV control system, as well as the interaction of AUV systems during the mission. The results of the functioning of the AUV control system in the process of performing standard AUV missions are presented.

УДК 681.51

А. Е. ПАНАРИН

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург)

Д. А. МУХИН

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

МОБИЛЬНЫЙ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЙ ИМИТАТОР МОРСКИХ ЦЕЛЕЙ

В работе представлено описание мобильного гидроакустического имитатора морских целей, разрабатываемого на основе малогабаритного автономного обитаемого подводного аппарата и аппаратно-программных средств излучения, приема и обработки гидроакустических сигналов на основе оборудования, внесенного в Государственный реестр средств измерений. Рассматриваются принципы его построения, используемые технические решения и спектр решаемых задач.

Введение. В настоящее время все большее распространение получает применение автономных обитаемых подводных аппаратов (АНПА) в различных сферах научной и практической деятельности. АНПА с успехом применяются для выполнения поисковых и геологоразведочных работ, обследования объектов морской инфраструктуры, а также, для решения задач в интересах ВМФ РФ [1]. На сегодняшний день вопрос испытания вновь разрабатываемых гидроакустических систем и комплексов в условиях морских полигонов требует привлечения дополнительных сил и средств обеспечения (использования боевых надводных и подводных кораблей), что влечет за собой значительные временные и финансовые затраты. Использование мобильного гидроакустического имитатора морских целей (ГИМЦ) на основе АНПА позволит существенно сократить указанные издержки.

Доклад посвящен рассмотрению основных требований к построению мобильного ГИМЦ, описанию применяемых технических решений и спектра решаемых задач в обеспечение испытания гидроакустических систем.

Постановка задачи. Для решения задачи обеспечения испытаний, мобильный ГИМЦ должен обеспечивать выполнение ряда требований, а именно:

- имитация движения цели;
- имитация гидроакустического портрета цели (первичного / вторичного поля).

Указанные требования определяют перечень технических решений для построения мобильного ГИМЦ. Дополнительно, программно-аппаратные средства мобильного ГИМЦ должны обеспечивать удобство эксплуатации и высокую мобильность.

Применяемые технические решения. Разрабатываемый мобильный ГИМЦ может размещаться в качестве отсека полезной нагрузки в малогабаритном многоцелевом АНПА с диаметром прочного корпуса менее 250 мм. Например, на АНПА типа «РИФ», представленного на рисунке 1 [2].

АНПА построен по модульному принципу и содержит отсек полезной нагрузки для размещения требуемого оборудования. При максимальной глубине погружения не менее 500 м и длительным времени автономной работы, данный носитель обеспечивает имитацию объектов с различными характеристиками движения и их маневрирование по дистанции, глубине и пеленгу.

Аппаратно-программные средства (АПС) имитации гидроакустического портрета цели реализованы на основе оборудования, внесенного в Государственный реестр средств измерений и позволяющего производить излучение прием и обработку гидроакустических сигналов в

широком частотном диапазоне. В состав АПС ГИМЦ входят приемный и излучающий гидроакустические преобразователи, анализатор спектра звукового диапазона и вычислительный модуль с комплектом функционального программного обеспечения. ПО АПС ГИМЦ построен с использованием открытой архитектуры [3] и с использованием высокоуровневых средств планирования и диагностики [4-7].

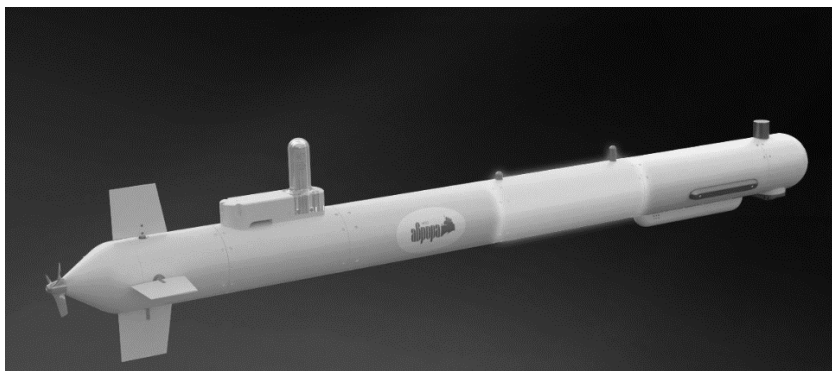


Рис. 1. Внешний вид АНПА типа «РИФ»

АПС ГИМЦ предназначены для решения следующих задач:

- имитация в реальном масштабе времени первичного шумового поля цели (шумоизлучение, обусловленное движением цели, работой ее основных механизмов и систем) с заданными спектральными характеристиками;
- имитация в реальном масштабе времени вторичного шумового поля (имитация эхосигналов, отраженных от цели);
- имитация в реальном масштабе времени работы активных гидроакустических средств цели;
- оценка текущей помехо-сигнальной обстановки в районе испытаний;
- воспроизведение записей шумового поля реальных объектов.

Программное обеспечение АПС ГИМЦ размещается на коммерческом вычислительном модуле общего назначения Jetson Nano производства компании Nvidia. Структура функционального программного обеспечения ГИМЦ представлена на рисунке 2.

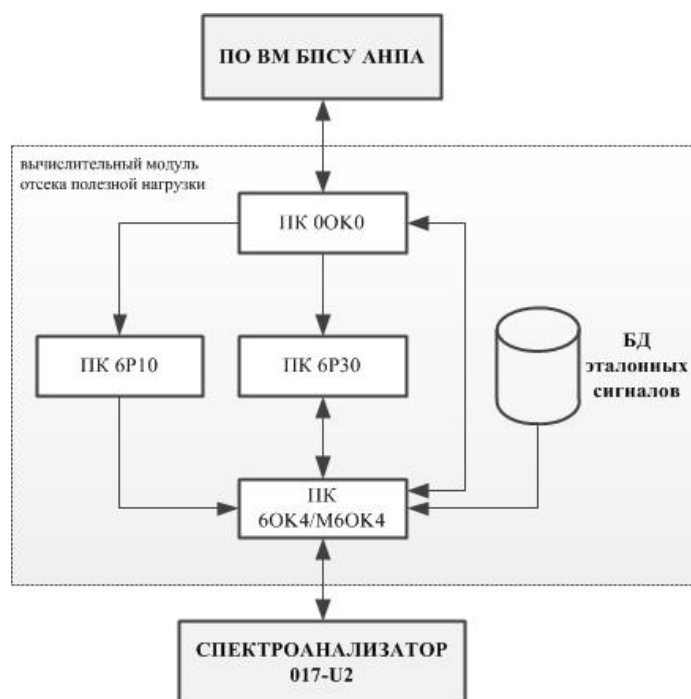


Рис. 2. Структура программного обеспечения мобильного ГИМЦ

Таким образом, сочетание АНПА в роли мобильного носителя и АПС ГИМЦ позволяет в полной мере имитировать поведение надводного или подводного объекта. Как следствие, мобильный ГИМЦ может успешно применяться для оценки тактико-технических характеристик испытываемых гидроакустических систем.

Заключение. Разрабатываемый мобильный гидроакустический имитатор морских целей является перспективным и высокоэффективным средством обеспечения испытаний существующих и вновь разрабатываемых гидроакустических систем и комплексов в интересах предприятий-изготовителей и генерального заказчика в лице ВМФ РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Инзарцев А.В., Кисилев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф.** Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток, 2018.
2. Области применения АНПА. <https://www.avrorasystems.com/ru/Data/Pressroom/Files/ANPAPRINT.pdf> (дата обращения: 01.02.2022).
3. **Крючков Р.Л.** Открытая архитектура для просмотра и анализа акустических данных, В сборнике: Навигация и управление движением. Материалы XXII конференции молодых ученых с международным участием. Санкт-Петербург, 2020, с. 333-335.
4. **Лукоянов Е.В., Грузликов А.М.** Алгоритм синтеза иерархической модели распределенной вычислительной системы / В сборнике: Навигация и управление движением: Материалы XXII конференции молодых ученых с международным участием, Санкт-Петербург, 17–20 марта 2020 года. Санкт-Петербург: «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020. с. 339-341.
5. **Скородумов Ю.М.** Смешанное планирование заданий в распределенных системах реального времени / Н.В. Колесов, Ю.М. Скородумов, А.М. Грузликов, М.В. Толмачева // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 5. с.29 - 34.
6. **Скородумов Ю.М.** Нестационарные модели в задачах диагностирования вычислительных систем реального времени / А.М. Грузликов, Н.В. Колесов, Ю.М. Скородумов, М.В. Толмачева // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления, 2016, № 6, с. 78 - 83.
7. **Лукоянов Е.В.** Диагностирование бортовых вычислительных и управляющих систем с использованием динамических моделей / Е.В. Лукоянов, А.М. Грузликов, Н.В. Колесов // В сборнике: Навигация и управление движением: сборник тезисов докладов Международного семинара, Самара, 28 сентября – 02 октября 2020 года. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2020, с. 122-125.

A.E. Panarin, (ETU “LETI” Saint-Petersburg Electrotechnical university, CSRI Electropribor, Saint-Petersburg), D.A. Mukhin (CSRI Electropribor, Saint-Petersburg). **Mobile hydroacoustic simulator of naval targets**

Report represents the description of mobile hydroacoustic simulator of naval targets, based on compact autonomous uninhabited underwater vehicle and hardware-software complex for signal emission, detection and processing. The application model, constructional principles, technical solutions and list of tasks to be solved are under consideration also.

УДК 629.5.073.4

Т. САМСОНОВА

(Санкт–Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»,
ООО «НавДК», Санкт-Петербург)**WI-FI УСТРОЙСТВО ТРАНСЛЯЦИИ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ДЛЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЙ**

Предложено устройство на основе микроконтроллера, позволяющее обеспечить сопряжение между судовым навигационным оборудованием и гидрометеорологическими веб-приложениями в реальном времени.

Описаны функциональные возможности устройства и результаты лабораторных испытаний изделия.

Введение. Для решения задач безопасности и повышения эффективности навигации судов в северных регионах России, в особенности на Северном Морском Пути, активно используются системы отображения электронных карт: векторных (с информацией о возрасте льда, его сплошности, дрейфе) и растровых (в виде космических снимков и снимков судовых радиолокационных систем). Такие карты подготавливаются в береговых центрах таких организаций как ФБГУ «ААНИИ», Polar View, СКАНЭКС, Атомфлот [1–3]. Ввиду быстрого устаревания ледовой информации остро стоит проблема её своевременной доставки до потребителей на судне для обеспечения принятия решений судоводителями с учетом изменений ледовой обстановки.

На современных судах, как правило, есть подключение к Интернету, однако стандартное конвенционное навигационное оборудование, как правило, не имеет к нему доступа, а установка нового оборудования – весьма сложная задача [4,5]. В то же время, подключение к Интернету можно обеспечить при помощи портативных устройств, таких как ноутбуки и планшеты, что не требует модернизации или замены сертифицированного навигационного оборудования, находящегося на судне. Следовательно, для передачи ледовой информации на судно можно использовать веб-приложения, работающие с серверами береговых центров. Передача актуальных навигационных параметров судна в веб-приложение существенно повышает информативность представляемых на судно ледовых и гидрометеорологических карт. Настоящий реферат посвящен описанию устройства сопряжения между судовым навигационным оборудованием и гидрометеорологическими веб-приложениями в реальном времени (представляющими метеорологические данные и данные о состоянии льда).

Структура и принцип работы устройства. Структура устройства приведена на рис. 1. Источником информации является транспондер автоматической идентификационной системы (АИС-транспондер), к которому подключены датчики курса и скорости, и который имеет встроенный приемник спутниковой навигационной системы, позволяющий получить координаты, путевой угол и путевую скорость. В соответствии со стандартом IEC 61162–2 [6] реализована полная оптическая развязка с навигационным оборудованием, обеспечивающая электрическую безопасность при работе устройства. Разработанное устройство снабжено повторителем NMEA-данных (National Marine Electronics Association – общепринятое наименование интерфейса морского навигационного оборудования, входит в IEC 61162–2) для ретрансляции всего информационного потока АИС, для сохранения возможности подключения любых других внешних устройств к транспондеру одновременно с разработанным модулем. При разработке учтена возможность подачи питания в диапазоне напряжений от 12 до 24 В (стандартное напряжение судовой сети).

При трансляции данных в формате NMEA в сети происходит передача всего потока, что значительно загружает канал передачи. Для обеспечения фильтрации и предварительной обработки потока данных использован мощный микроконтроллер ESP8266 с 32-разрядным процессором и возможностью Wi-Fi подключения [7]. Из потока различных NMEA-сообщений он вы-

деляет сообщения, несущие информацию о собственном судне – судне, на котором установлен АИС-транспондер.

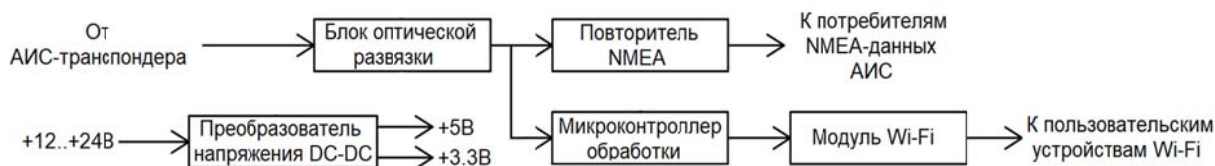


Рис. 1. Структура устройства

Как и любое устройство приема и обработки, разработанный модуль обеспечивает контроль достоверности приема в несколько этапов: контроль приема сообщений конкретного типа, контроль целостности принятых сообщений и контроль корректности дешифрованных из сообщения данных. Поскольку сообщения о собственном судне содержат в себе инкапсулированные 6-битные двоичные сообщения АИС, проводится также проверка двоичных данных. Эти двоичные сообщения декодируются с выделением значений курса, скорости, путевого угла и координат местоположения судна.

Основным инструментом синхронизации ретрансляции декодированных данных по UTC в веб-приложение являются программные запросы текущих даты и времени к серверу точного времени (при наличии доступа в Интернет). В качестве дополнительного инструмента может использоваться метка времени, также декодируемая из сообщений АИС.

Полученные в ходе обработки данные представляются в виде XML-текста (основной формат) или HTML-таблицы (технологический режим), которые легко читаются веб-приложениями. В веб-приложения данные посылаются по HTTP короткими сообщениями, в соответствии со стандартами IEEE 802.11 (Wi-Fi). Обновление данных происходит раз в минуту, что является достаточным в рассматриваемых условиях: при скорости порядка 6 узлов судно будет в минуту проходить примерно 180 метров, что сопоставимо с длиной судна.

На основании изложенного, можно сделать получаемые от берегового сервера изображения интерактивными, в первую очередь за счет индикации символа собственного судна и данных о маршруте. Передаваемая HTML-таблица корректно отображается на различных пользовательских устройствах, в том числе на планшетах и смартфонах.

Устройство за счет эффективной фильтрации обеспечивает значительное снижение объема данных, передаваемого в веб-приложения, разгружая их. Так при полной загрузке интерфейса, когда скорость передачи – 38400 бит/с, длина сообщения – 82 символа, один символ передается 11-ю битами, в секунду будет передаваться приблизительно 3,5 Кб данных. Следовательно, в минуту – примерно 210 Кб. Тогда как посылаемый XML-файл содержит порядка 590 байт (выигрыш более чем в 300 раз). Реальная загрузка интерфейса обычно гораздо меньше – порядка 6 Кб/мин, то есть выигрыш не менее, чем в 10 раз.

Результаты разработки. По результатам разработки изготовлен и протестирован в лабораторных условиях образец устройства. Испытания проводились совместно с имитатором АИС, источником питания +12...+24 В, роутером Wi-Fi и веб-сервером «dKart AIS WEB Ice» и подтвердили ожидаемое повышение информативности представления гидрометеорологической информации пользователю. Потребляемая устройством мощность не превышает 3 Вт. Подтверждена правильность выбора технических решений и корректность работы программно-математического обеспечения устройства.

Аналогичные преобразователи имеют ряд значительных недостатков: в них отсутствует фильтрация сообщений и выделение отдельных данных (сильно загружают веб-приложения обработкой потока), также они не обеспечивают передачу в форматах XML/HTML и значительно превышают разработанное устройство в стоимости.

Заключение. Разработано устройство, повышающее эффективность и безопасность морской навигации в условиях ледовой навигационной обстановки. В сравнении с аналогами, предло-

женное устройство позволяет снизить объем трафика и расширить круг пользователей. Упрощается подключение широкого круга веб-приложений.

Информационное обеспечение ледовой навигации в реальном времени возможно практически на любом пользовательском оборудовании.

Запланированы испытания электромагнитной совместимости модуля, разрабатывается программное обеспечение по конфигурированию Wi-Fi-подключения модуля на судне.

ЛИТЕРАТУРА

1. ФБГУ «ААНИИ» // Оперативные данные [Электронный ресурс]. URL: <https://www.aari.ru/data/realtime> (дата обращения: 20.01.2022).
2. Polar View // Data [Электронный ресурс]. URL: <https://polarview.org/sample-data/>
3. СКАНЭКС Лидер в сфере спутникового мониторинга // Данные [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scanex.ru/data/> (дата обращения: 19.01.2022)
4. Еремеева Ю. В., Чусова Т. О. Развитие спутниковой связи на судах //Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития. – 2019. – №. 1-1.
5. Якубайлик О. Э. Использование картографических ВЕБ-сервисов для информационного обеспечения задач регионального управления //Технические науки–от теории к практике. – 2013. – №. 27-1.
6. International Standard IEC 61162-1 Edition 4.0 2010-11 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.chenyupeng.com/upload/2020/3/IEC%2061162-1-2010-728ad3778103426ab0a9a64b6cc5e474.pdf> (дата обращения: 19.01.2022)
7. Wi-Fi & Bluetooth MCUs and IoT Solutions | Espressif Systems // Chipsets [Электронный ресурс]. URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp8266-technical_reference_en.pdf (дата обращения: 19.01.2022)

T. Samsonova (Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", NAVdCo, Saint Petersburg). **WI-FI device for broadcasting navigation parameters for hydrometeorological web-applications**

Paper contains description of a ship interface device based on a microcontroller. The device allows to interface between standard ship navigation equipment AIS and ice and hydrometeorological web applications in real time. Also, the paper gives overview of the device's functionality. Successful laboratory tests of the product sample have been carried out.

УДК 338.5

МЯСНИКОВ М.Р.

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

АВТОРСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ ПРОГРАММНЫХ ПРОДУКТОВ SCENERY

В работе рассматриваются вопросы оценки затрат на программное обеспечение, разрабатываемое в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах. Предлагается созданная автором модель оценки трудозатрат на разработку программного обеспечения в виде параметрической модели, описывается технология ее построения.

Введение. Одной из наиболее сложных задач при планировании научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) является оценка стоимости будущих работ. Постановление № 1465 от 02.12.2017 г. устанавливает три метода определения цены на продукцию, поставляемой по государственному оборонному заказу: метод анализа рыночных индикаторов, метод сравнимой цены и затратный метод [1]. Как правило, НИОКР подразумевают создание уникальной научно-технической продукции, которая не обращается на конкурентном рынке и не имеет аналогов, поэтому применение двух первых методов невозможно. Затратный метод ценообразования заключается в определении себестоимости, то есть состава затрат, и установлении согласованного уровня рентабельности [2].

Согласно п. 17 Постановления [1] для определения цены или отдельных затрат могут применяться экономико-математические модели. В проектном менеджменте известны экономико-математические модели в области оценки стоимости проектов по созданию программного обеспечения (ПО). Их также называют параметрическими, поскольку они основаны на использовании параметров – характеристик проекта и программного продукта, влияющих на конечные затраты. Они разрабатываются коммерческими и некоммерческими организациями на основе больших статистических исследований выполненных проектов по разработке ПО. Часть моделей поставляется в виде приложений в рамках программных пакетов по управлению проектами, другие доступны для общего пользования. Подавляющее большинство параметрических моделей разработано в США (SLIM, SEER-SEM, COCOMO, FPA, Use Case Points), несколько моделей создано в Европе (COSMIC, FISMA, NeSMA) [3–5]. В России общедоступна лишь модель из типовых норм времени на программирование задач для ЭВМ, которая разработана более 30 лет назад [3, 5]. Так или иначе, при выборе модели встает вопрос о ее применимости моделей для конкретной организации. Предметная область разработки, квалификация программистов и условия разработки будут оказывать существенное влияние на стоимость проектов по созданию программного обеспечения.

Доклад посвящен вопросу разработки экономико-математической модели для оценки трудозатрат по созданию ПО.

Экономико-математическая модель оценки трудозатрат. С практической точки зрения целесообразно разработать индивидуальную модель на основе статистических данных конкретной организации, разрабатывающей ПО. Кроме того, должна быть создана технология построения параметрической модели, на основе которой впоследствии может быть разработана любая локальная модель оценки трудозатрат (рис. 1).

Для этого, во-первых, нужно определить цель применения данной модели. Целью параметрической модели оценки является определение трудозатрат на разработку ПО для использования оценки в проектном менеджменте и договорных отношениях. Во-вторых, необходимо точно определить характеристики объекта оценки, на основе которого будет создана модель, и для оценки которого модель будет впоследствии применяться. Наиболее характерным типом разрабатываемого ПО (в НИОКР), являются программные средства обработки информации, функционирующие в масштабе реального времени. В-третьих, необходимо подобрать состав параметров, из которых будет состоять модель – по существу факторов затрат, влияющих на стоимость разработки. Для этого целесообразно проведение социологического исследования специалистов, непосредственно связанных с разработкой программного обеспечения. Участниками ис-

следования стали более 40 сотрудников различной специализации: программисты, системные архитекторы, научные сотрудники. Наиболее существенными факторами затрат были признаны (в порядке убывающей значимости): сложность ПО, квалификация исполнителей, новизна проекта, надежность функционирования, стабильность требований, размер программного обеспечения, объем документации (табл. 1).

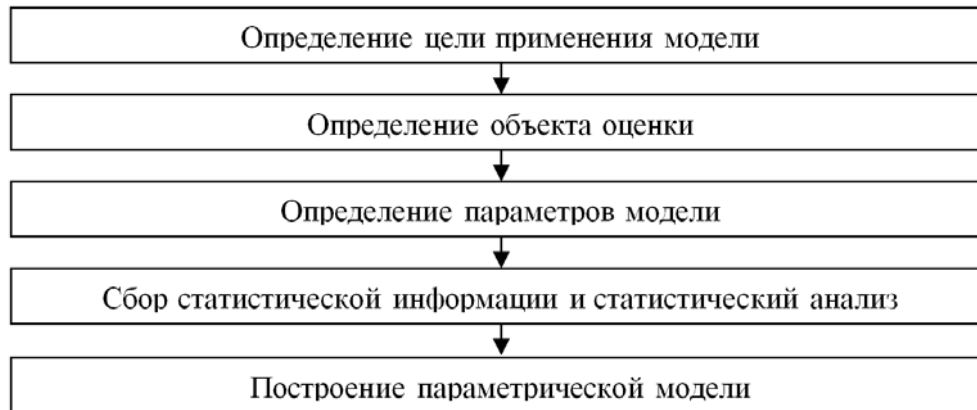


Рисунок 1. Технология разработки параметрической модели оценки стоимости ПО

Таблица 1.

Факторы, влияющие на стоимость разработки ПО

№	Наименование фактора	Удельный вес
1.	Сложность ПО (логическая и математическая обработка)	21,35%
2.	Интегрированный показатель квалификации качеств исполнителей	18,75%
3.	Новизна проекта	17,36%
4.	Надежность функционирования программного обеспечения	12,85%
5.	Стабильность требований	10,59%
6.	Размер программного обеспечения	9,55%
7.	Объем и качество документации	9,55%
8.	Итого	100,00%

Несмотря на то, что размер не является самым существенным фактором по мнению опрошенных специалистов, работа с любой параметрической моделью начинается с оценки физического показателя. Таким образом, разрабатываемой модели может быть присвоено имя SCENERY – Size, Complexity, Experience, NEwness, Reliability, documentation supplY, по имени составляющих модель параметров. Далее необходимо исследовать количественную зависимость между выбранными факторами и итоговым показателем трудозатрат по разработке ПО. Для этого был осуществлен поиск и подбор текстов программ, соответствующих объекту оценки. Размер выборки составил 95 элементов. Для ее статистической обработки было использовано приложение SourceMonitor™ [6], позволившее измерить основные характеристики ПО: количество строк исходного кода, количество операторов, определений, функций. С помощью корреляционного анализа было установлено, что наиболее сильная корреляция наблюдается между трудозатратами и показателем функций программ. Наконец, конечной задачей стало непосредственное построение параметрической модели и оценка ее достоверности. Для этой цели был использован программный продукт STATISTICA™ Автоматизированные Нейронные Сети [7]. Полученная модель сохранена в виде файла STATISTICA™ и может быть конвертирована в программы на языках C, C++, C#, Java.

Заключение. В результате проведенного исследования построена экономико-математическая модель, позволяющая оценить трудозатраты на основе параметров размера, сложности, надежности ПО, квалификации исполнителей, новизна проекта, стабильности требований и объема документации. Полученная модель может быть использована для прогнозной оценки стоимости продукта в целях менеджмента проектов или договорной работы. Выходные данные модели могут быть использованы для прогнозирования длительности разработки и ко-

личества необходимых специалистов. Также создана технология построения индивидуальной модели с учетом локальных условий организации и исторических данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 02.12.2017 № 1465 «О государственном регулировании цен на продукцию, поставляемую по государственному оборонному заказу, а также о внесении изменений и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации»
2. **Пузыня Н.Ю.** Государственное регулирование цен. – СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2012. – 85с.
3. **Липаев В.В.** Проектирование и производство сложных заказных программных продуктов – Высшая школа экономики – М.: СИНТЕГ, 2011. – 408 с.
4. **Макконнелл С.** Сколько стоит программный проект / пер. с англ. – М.: «Русская Редакция»: СПб.: Питер, 2007. – 297 с.
5. **Глазова М.А.** Моделирование стоимости разработки проектов в ИТ-компаниях: автореф. дис. ... канд. эк. наук. М. – 2008. 24 с.
6. Официальный сайт SourceMonitor: сайт. –URL: <https://www.derpual.net/SourceMonitor> (дата обращения 28.01.2022 г.). – Текст: электронный.
7. Официальный сайт Statistica: сайт. –URL: <https://www.statistica.com/en> (дата обращения 28.01.2022 г.). – Текст: электронный.

M.R.Myasnikov (Concern CSRI Elektropribor, JSC). **Software cost estimation model scenery**

The article discusses the costs estimation of software developed in R&D. The author proposes a model for estimating labor costs for software development in the form of a parametric model and describes the technology of its construction.

УДК 621.376.9

КОЗЛОВ А.С., ТУЛАЕВ А.Т., КОСТЫГОВ Д.В., БЕЛЯЕВ Я.В.
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

РАЗРАБОТКА КАСКАДНОГО СИГМА-ДЕЛЬТА АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Рассматривается процесс разработки аналого-цифрового преобразователя на основе сигма-дельта модуляции. Процесс разработки включает проведение моделирования на системном уровне, разработку схемотехнического решения для аналоговой части, разработку поведенческой модели цифровой части с последующим синтезом цифровой схемы, а также разработку топологии всей схемы.

Введение. В настоящее время наиболее широко применяется обработка сигналов цифровыми методами, поскольку процесс синтеза цифровых схем является в значительной степени автоматизированным. Такие схемы легко масштабируются, а также являются более устойчивыми к различным видам шума, температуре, разбросу параметров технологии и изменениям напряжения питания. Для обработки аналоговых сигналов необходимо промежуточное звено, которым является аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Рост рынка микроэлектромеханических систем диктует тренд на АЦП, имеющие высокую разрешающую способность для сигналов с частотой, не превышающей десятки кГц. Таким требованиям удовлетворяют АЦП на основе сигма-дельта модуляции [1].

Сигма-дельта АЦП состоит из аналоговой части (сигма-дельта модулятор) и цифровой (фильтр-дециматор). Задача модулятора состоит в том, чтобы преобразовать низкочастотный аналоговый сигнал в последовательность нулей и единиц, следующих на передискретизованной частоте. Плотность нулей и единиц в этой последовательности определяется уровнем входного сигнала. Цифровой фильтр подавляет шум квантования, вытесненный модулятором в область высоких частот, понижает частоту цифрового кода, а также преобразует его из последовательного в параллельный. Эффективная разрядность сигма-дельта АЦП в значительной степени определяется характеристиками модулятора. Повысить эффективную разрядность можно с помощью применения многоуровневого квантователя или повышения коэффициента передискретизации, однако наиболее эффективными методами являются увеличение порядка модулятора и использование многокаскадных структур (MASH – Multistage Noise-Shaping). Поскольку модуляторы с порядком выше второго могут оказываться неустойчивыми, для реализации выбран MASH 2-2 сигма-дельта модулятор. Пометка «2-2» обозначает количество каскадов и порядок модулятора в каждом из них (в приведенном примере – два каскада с модуляторами второго порядка).

В работе рассматривается процесс разработки интегральной схемы (ИС) сигма-дельта АЦП с использованием технологической библиотеки XN018 фабрики микроэлектронного производства X-FAB.

Разработка системной модели. Системная модель сигма-дельта модулятора представлена на рис. 1: каждый каскад представляет собой сигма-дельта модулятор второго порядка с дополнительными функциональными блоками, учитывающими неидеальность операционного транскондуктивного усилителя в составе интегратора. Модель учитывает конечный коэффициент усиления, конечную полосу усиления и конечную скорость нарастания сигнала. Коэффициенты передачи интеграторов, а также коэффициенты цифровой схемы подавления шума квантования выбраны в соответствии с [2].

Далее, системная модель дополнена цифровыми фильтрами-дециматорами. Анализ литературы показал [3-6], что оптимальной структурой является каскадная реализация децимирующего фильтра в 64 раза, с последующей децимацией в 2 раза при помощи полуполосного КИХ-фильтра. В качестве выходного фильтра выбран КИХ-фильтр нижних частот 36 порядка, с коррекцией полосы пропускания. Требования к фильтрам сформированы исходя из результатов моделирования системной модели MASH-модулятора. Для разработанной модели проведе-

но моделирование, подтвердившее эффективность принятых технических решений при реализации цифровых фильтров.

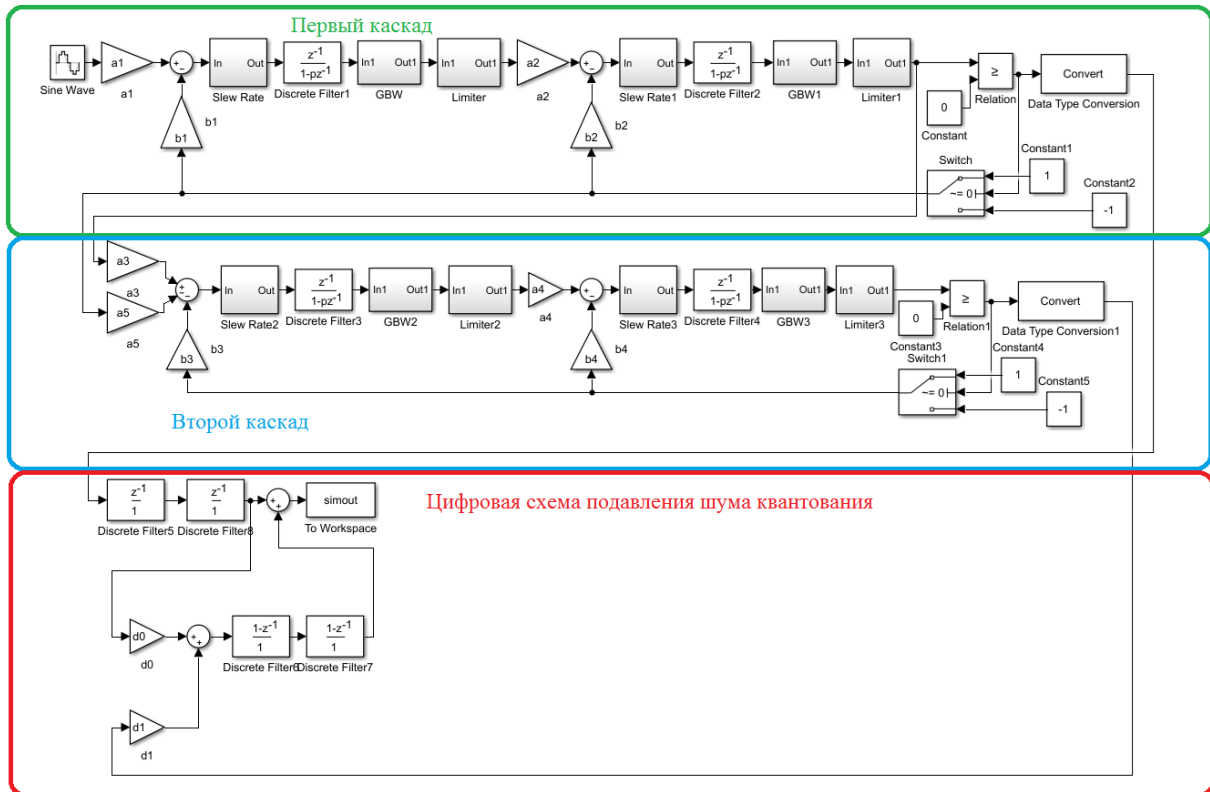


Рис. 1. Системная модель сигма-дельта модулятора

Разработка схмотехнического решения для аналоговой части. Разработка схмотехнического решения производилась с помощью системы автоматизированного проектирования Virtuoso от компании Cadence. Соответствие характеристик разработанных блоков ожидаемым подтверждено с помощью моделирования. Кроме того, получен спектр выходного сигнала схемы каскадного сигма-дельта модулятора. Отношение сигнал/шум и нелинейные искажения (SNDR) составило 97 дБ. Поскольку характеристики блоков электроники могут отклоняться от номинальных под воздействием температуры и разброса технологических параметров, проведено моделирование с учетом этих факторов. Библиотеки компании X-FAB позволяют провести моделирование с учетом технологического разброса параметров. Наибольшие отклонения параметров от номинальных значений называются углами. Результаты, приведенные в таблице 1, подтверждают, что разработанное схмотехническое решение обеспечивает более 15 эффективных бит при любых углах.

Таблица 1

Значение SNDR при различных условиях

Тип угла	Температура, °C		
	-60	27	125
tm	101.9	95.43	93.78
wo	97.85	95.3	95.31
wp	101.4	98.52	92.28
ws	98.43	96.86	92.48
wz	99.79	93.66	92.73

Результаты работы. Моделирование полной схемы проводилось в два этапа: в Cadence Virtuoso выполнялось моделирование аналоговой части, после чего выходной однобитный код на передискретизованной частоте экспортировался в MATLAB, где с помощью Simulink обрабатывался цифровым фильтром-дециматором. Спектры до и после цифровой фильтрации представлены на рис. 2. Заключительным этапом работы является разработка топологии ИС. Площадь всей схемы составила 1.98 мм².

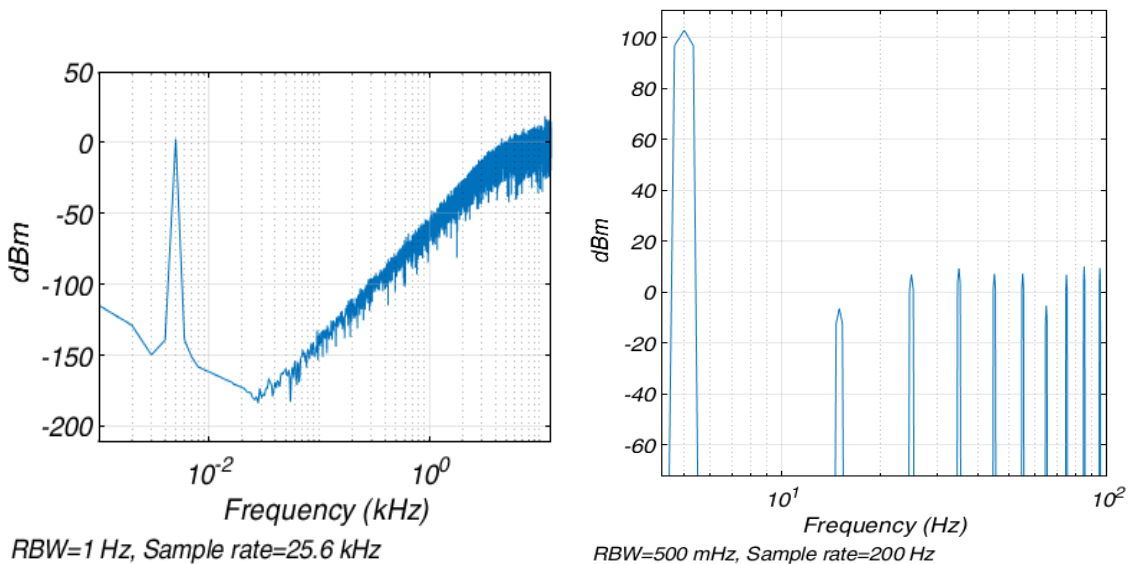


Рис. 2. Спектр сигнала до (слева) и после (справа) цифровой фильтрации

Заключение. В результате работы спроектирован MASH 2-2 сигма-дельта АЦП. Разработка включала в себя моделирование на системном уровне, проектирование аналоговой части на схемотехническом уровне, описание на поведенческом уровне цифровой части, а также разработку топологии полной схемы. Моделирование подтвердило, что разработанное решение способно обеспечить эффективную разрядность не менее 15 бит для сигналов с частотой не более 20 кГц.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Коротков А.С., Теленков М.В.** Аналого-цифровые преобразователи на основе дельта-сигма модуляторов. Ж. Зарубежная радиоэлектроника — 2002, № 12. — С. 53 – 72.
2. **Medeiro F. et al.** Fourth-order cascade SC $\Sigma\Delta$ modulators: a comparative study. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications. – 1998. – Т. 45. – №. 10. – С. 1041-1051.
3. **Koppula R.M.R., Balagopa S., Saxena V.** Efficient Design and Synthesis of Decimation Filters for Wideband Delta-Sigma ADCs. 2011 IEEE International SOC Conference. – IEEE, 2011. – С. 380-385.
4. **Hurrah N. N. et al.** Oversampled Sigma Delta ADC Decimation Filter: Design Techniques, Challenges, Tradeoffs and Optimization. 2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering & Computational Sciences (RAECS). – IEEE, 2015. – С. 1-6.
5. **Kozlov A. S., Pilipko M. M.** A Second-order Sigma-delta Modulator with a Hybrid Topology in 180nm CMOS //2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – IEEE, 2020. – С. 144-146.
6. **Lin Y. S., Chang S. J., Wei C. L.** A Noise-shaping SAR Assisted MASH 2-1 Sigma-Delta Modulator //2020 International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT). – IEEE, 2020. – С. 1-4.

Kozlov A.S., Tulaev A.T., Kostygov D.V., Belyaev Y.V. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg). **Design of cascaded sigma-delta analog-to-digital converter**

The paper describes the design of analog-to-digital converter based on sigma-delta modulation. The design flow consists of system-level simulation, design of the schematic of analog part, design of behavioral model of digital part with subsequent synthesis of the digital circuit, layout of the complete circuit.

УДК 681.51

К.А. НАСЕТКИН
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ РАДИАЦИОННО-СТОЙКОЙ АППАРАТУРЫ

Работа посвящена обоснованию необходимости комплексного подхода к созданию радиационно-стойкой аппаратуры навигационного назначения. Рассматривается актуальность темы, показывается ее значимость. Рассматривается 3 уровня возможного парирования радиационных эффектов, как каждый уровень в отдельности, так и их совместное применение. Представлены практические результаты применения предлагаемого подхода.

Введение. Одним из важных направлений навигационного приборостроения является создание резервированных радиационно-стойких вычислительных систем на отечественной элементной базе. Такие системы востребованы в изделиях как морской, так наземной и воздушно-космической тематики. Основным потребителем такой продукции является космическое ракетостроение, которое на данный момент сильно зависит от импортной электронной компонентной базы [1]. Для достижения наибольшей защищенности от радиационных эффектов необходимо применение принципов повышения стойкости на всех уровнях проектирования, от топологии кристалла, до разработки специализированного программного обеспечения.

Цель работы состоит в построении резервированной радиационно-стойкой вычислительной системы на отечественной элементной базе как универсальной платформой с возможностью модульного расширения под необходимые требования.

Влияние радиационных эффектов на электронные компоненты. Парлируемые радиационные эффекты в общем виде можно разделить на 2 большие группы: постепенная деградация и одиночные события. Постепенная деградация связана с накоплением заряда на ловушках, генерируемых в объеме окисла и на поверхности раздела кремний-диэлектрик. Деградация носит характер постепенного старения, т.е. эти эффекты незаметны при относительно коротких сроках существования микросхемы, либо в начале ее эксплуатации в космосе. Большинство таких отказов является параметрическими отказами. Такие эффекты более-менее предсказуемы и возможен их расчет.

Одиночные события вызываются одиночными высокоэнергетическими ионизирующими частицами. Их воздействие носит случайный характер, связанный с попаданием отдельных частиц в чувствительные микрообъемы элементов памяти, что вызывает переключение логического состояния и потерю информации. Их можно разделить на обратимые и необратимые. Обратимые переключения (сбои) имеют место в запоминающих устройствах статической и динамической памяти и представляют собой обратимое переключение ячейки из одного состояния в другое без потери работоспособности ячейки [2]. Гораздо более опасными являются одиночные события, приводящие к необратимым разрушающим последствиям.

Парирование радиационных эффектов. Рассмотрим уровни парирования радиационных эффектов.

Первый уровень – полупроводниковые структуры микросхемы. Автором совместно с коллегами из ННГУ им. Лобачевского была предложена компактная модель короткоканальной структуры «кремний на изоляторе» с учетом накопления заряда в диэлектрических слоях при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений. Разработанная модель эквивалентна традиционной на схемотехническом уровне, однако имеет ряд преимуществ с точки зрения физического моделирования радиационных эффектов [3, 4]. Предложенную модель можно использовать для неразрушающей отбраковки готовых цифровых микросхем высокой степени интеграции, оценивая уровень, при котором будет происходить параметрический отказ при воздействии низкоинтенсивных проникающих излучений. Работа была рекомендована к внедрению на базе филиала ФГУП РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю.Е. Седакова».

Второй уровень – схемотехника устройства. Одним из методов, реализующих защиту от постепенной деградации, является схема автокомпенсации напряжения подложки [5]. При воздействии ионизирующего излучения происходит постепенное накопление заряда в диэлектрике, что приводит к нарушению условий эквипотенциальности и нарушению работы схемы [6, 7]. При накоплении зарядом на ловушках, генерируемых в объеме окисла и на поверхности раздела кремний-диэлектрик происходит постепенное смещение рабочей точки транзистора, что приводит к тому, что через канал начинает протекать паразитный ток. Блок автосмещения отслеживает эти изменения и компенсирует их, изменяя напряжение на подложке. Подобные сложные схемы возможно моделировать только в рамках схемотехнического анализа, для чего необходимы компактные модели структур выполненных по технологии КНИ («кремний на изоляторе»), учитывающих воздействие ионизирующего излучения, которые были получены на предыдущем этапе. Также для отдельных микросхем возможно увеличение стойкости за счет применения токоограничивающих резисторов.

Третий уровень – алгоритмический и системный. Если проблемы с постепенной деградацией в значительной степени парируются на предыдущих уровнях, то одиночные события необходимо парировать на этом уровне. Здесь применяется как защита данных кодом Хемминга с корректировкой одиночных ошибок и детектированием двойных, так и резервирование системы. Также на этом уровне возможна дополнительная корректировка блока автосмещения.

Построения универсальной платформы. В основе построения универсальной платформы лежит принцип резервирования центрального вычислителя с постоянной поддержкой непротиворечивости информации. Система представляет собой 3 процессора, каждый связан с двумя другими по высокоскоростному интерфейсу. Есть несколько вариантов построения резервирования системы, рассмотрим наиболее важные для конкретного применения – инерциальной навигационной системы.

В основе первого варианта лежит принцип полного дублирования систем. В качестве входной информации используются данные с 3 наборов идентичных датчиков. Такой вариант дает наибольшую защиту от сбоев и отказов, но требует больше места в корпусе изделия, так как дублируются системы датчиков. Также у него меньше вычислительная способность, потому что одна и та же задача решается 3 раза параллельно.

В основе второго варианта лежит принцип распараллеливания вычислений с мажоритарной системой управления. У системы один входной поток информации, который тем не менее приходит на все процессоры. В случае отказа любого из процессоров происходит переопределение ведущего процессора и распараллеливание вычислений на оставшихся двух. Таким образом, отказ процессора ведет к снижению вычислительной мощности, но не приводит к отказу системы. Такой вариант дает меньшую защиту от сбоев, но имеет меньший размер и позволяет обеспечить втрое большую производительность.

На основе вышеперечисленных принципов был создана резервированная радиационно-стойкая вычислительная система на полностью отечественной элементной базе, которая является универсальной платформой с возможностью модульного расширения под необходимые требования. Она позволяет реализовать оба варианта резервирования в зависимости от потребностей и задач заказчика в одном конструктивном решении.

Заключение. Применение комплексного подхода к проектированию подобной аппаратуры позволяет значительно увеличить надежность системы. В работе показано, что увеличение эффективности алгоритмов требует перехода на более низкий уровень, что делает проблему комплексной.

Результатом работы стало построение резервированной радиационно-стойкой вычислительной системы на полностью отечественной элементной базе. Платформа предоставляет достаточные вычислительные ресурсы для решения широкого спектра задач, как в конфигурации параллельных вычислений, так и в конфигурации повышенной надежности. На данный момент реализуются различные государственные программы, где предлагаемая универсальная платформа будет востребована и применима.

ЛИТЕРАТУРА

1. Названа доля зарубежной электроники в ГЛОНАСС [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lenta.ru/news/2020/03/17/glonass/> (дата обращения 10.01.2022).
2. **Пузанов А.С., Венедиктов М.М., Оболенский С.В., Козлов В.А.** Расчетно-экспериментальное моделирование обратимых сбоев ячеек статической памяти субмикронных микросхем при воздействии потоков нейтронов // Физика и техника полупроводников. 2019. Т. 53. № 9. С. 1250-1256.
3. **Насеткин К.А., Муравьев М.С., Алимурзов Г.М., Пузанов А.С., Забавичев И.Ю., Потехин А.А.** Моделирование характеристик субмикронных структур «кремний на изоляторе» с учетом радиационных эффектов // Научно-технический вестник Поволжья, 2019, №7, С.127-130.
4. **Насеткин К.А., Пузанов А.С.** Реакция микросхем с цепью автокомпенсации токов утечки на воздействие низкоинтенсивных проникающих излучений // В кн.: Труды XXII научной конференции по радиофизике (г. Нижний Новгород, 15-29 мая 2018 г.). – Нижний Новгород, 2018, С.66-68.
5. **Лушников А.С., Мещанов В.Д., Рыбалко Е.С., Шепелин Н.А.** КМОП КНИ интегральная микросхема с повышенной радиационной стойкостью / Патент РФ 2545325 кл. H01L27/10.
6. **Зебрев Г.И.** Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции // М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 148 с.
7. **Никифоров А.Ю.** Моделирование эффектов воздействия импульсного ионизирующего излучения в интегральных преобразователях информации на кремниевых и карбидкремниевых структурах // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Москва: МИФИ, 2003. – 369 с.

К.А. Nasetkin (CSRI Electropribor, Saint-Petersburg). Complex approach to creation of radiation-resistant equipment

The work is devoted to the substantiation of the need for a complex approach to the creation of radiation-resistant equipment for navigation purposes. The relevance of the topic is considered, its significance is shown. Three levels of possible parrying of radiation effects are considered, both each level separately and their combined application. The practical results of this approach are presented.

П.А. КОНОВАЛОВ, И.Ю. ШИРОКОЛОБОВ
(Институт проблем машиностроения РАН, Санкт-Петербург)

УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ СТЕНД ДЛЯ АПРОБАЦИИ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ КОНСТРУКТОРА ТРИК

На базе конструктора ТРИК разработан роботизированный стенд для апробации мультиагентных протоколов. Стенд позволит разрабатывать и проводить эксперименты децентрализованных и распределённых протоколов управления.

Введение. В последние годы управление мобильными формациями превратилось в довольно зрелую дисциплину [1, 2], характеризуемую неуклонным ростом интереса к парадигме децентрализованного и распределённого управления, а также к проблемам, связанным с сенсорными и коммуникационными ограничениями. Этот тренд мотивирован текущими и перспективными практическими потребностями. Примерами задач этой дисциплины служат: мониторинг или распределённая обработка протяжённых объектов, мониторинг опасной среды, автоматическое разминирование, очистка корпуса крупногабаритных кораблей и многое другое. Всё это побудило авторов на создание физического стенда который позволит разрабатывать и проводить эксперименты децентрализованных и распределённых протоколов управления. Таким образом, предлагаемый доклад посвящён созданию и тестированию учебно-исследовательского стенда для апробации мультиагентных робототехнических систем. Стоит подчеркнуть, что стенд собран на базе конструктора ТРИК [3], который был разработан и выпускается в России компанией КиберТех. Именно использование конструктора ТРИК для упомянутых задач придаёт представляемой работе оригинальность, так как больше нигде в мире аналогичных стендов нет.

Постановка задачи. Задача состоит в том, чтобы собрать и проверить работоспособность стенда для апробации алгоритмов мультиагентных робототехнических систем, состоящий из нескольких подобных роботов, оснащённых лидарами, ультразвуковыми и инфракрасными датчиками измерения расстояния. Для проверки работоспособности стенда было принято решение реализовать на его базе несколько известных алгоритмов, а именно:

1. алгоритм навигации bug2 [4];
2. круиз контроль;
3. распределённый протокол автономного саморазвёртывания группы мобильных роботов в коридоре [5-7].

Сборка стенда. Сборка производилась с использованием роботизированного конструктора ТРИК. Каждый робот состоит из двух однонаправленных колёс, которые независимо приводятся в движение двумя моторами, и одного сферического колеса (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид робота

Всего было собрано 5 роботов. Роботы не оснащены средствами для передачи информации друг другу по сети, то есть получают информацию друг о друге только с помощью датчиков расстояния и лидаров. На каждом роботе исполняется одинаковый программный код написанный на языке программирования Python [8].

Реализация алгоритмов проверки работоспособности стенда. Алгоритм *bug2*. Алгоритмы семейства *bug* используют ограниченное количество информации о сцене, а именно: информацию о местонахождении цели относительно робота и локальные знания об окружении робота. Особенность алгоритма *bug2* заключается в использовании опорной линии которая соединяет начальную точку движения робота с целью. Для реализации этого алгоритма были поставлены следующие подзадачи:

- 1) реализовать алгоритм определения нахождения робота на опорной линии, основанный на одометрии;
- 2) реализовать алгоритм объезда препятствия роботом;
- 3) соединить алгоритмы из первых двух пунктов в алгоритм *bug2*.

Круиз контроль. Круиз контроль предназначен для поддержания безопасной дистанции при езде группы роботов друг за другом по коридору. В его основе лежит П-регулятор, в котором в качестве управляемой величины выступает скорость вращения колёс робота, а ошибка – разница между расстоянием до ближайшего объекта перед роботом минус значение безопасной дистанции. Стоит отметить, что это один из самых простых мультиагентных протоколов, поэтому он был выбран для тестирования стенда.

Протокол прочесывания коридоров. Протокол начинает работу при произвольной расстановке роботов в пределах некоторой достаточно узкой полосы коридора. Каждый робот знает относительные координаты окружающих его объектов, то есть других роботов и стен. В пределах некоторого конечного радиуса видимости также роботам известно направление коридора и целевая скорость движения вдоль коридора. Никакой другой информацией роботы не обладают. Роботы не оснащены средствами для передачи информации друг другу по сети. Задача состоит в обеспечении равномерного распределения группы вдоль отрезка, перпендикулярного стенкам коридора, и их последующего движения строем вдоль коридора с одинаковой скоростью (рис. 2). Примеры протоколов решающих представленную задачу подробно описаны в работах [5-7]. На рисунке ниже представлен пример работы одного из таких протоколов.

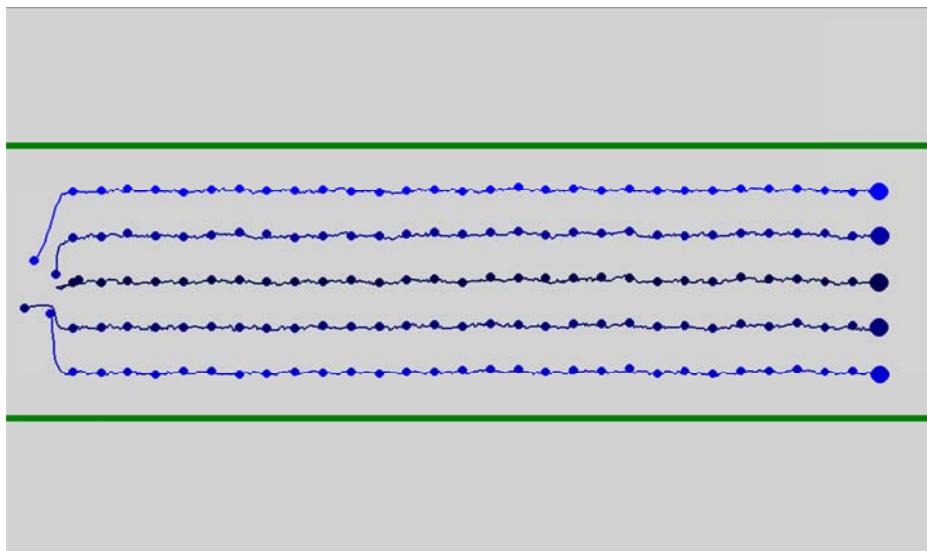


Рис. 2. Пример работы протокола прочесывания коридора пятью роботами сгенерированный в симуляторе. На рисунке зелёными линиями обозначены границы коридора. В градациях синего изображены траектории каждого робота. Каждая “горошина” на траектории показывает позицию робота, фиксируемую с интервалом в 400 мс.

Заключение. В ходе выполнения работы успешно собран роботизированный стенд для апробации мультиагентных протоколов. Для проверки работоспособности стенда на нем был реализован алгоритм круиз контроля и навигации, а также предложен распределённый протокол автономного саморазвёртывания группы мобильных роботов в коридоре. Проверка показала работоспособность стенда для апробации алгоритмов мультиагентных робототехнических систем. Дальнейшая работа со стендом, в ближайшей перспективе, подразумевает реализацию алгоритма bug2, состоящего из алгоритма навигации на основе одометрии и алгоритма объезда препятствий, и реализацию протокола прочесывания коридора.

Работа выполнена в ИПМаш РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2021-573.

ЛИТЕРАТУРА

1. **W. Ren and Y. Cao.** Distributed coordination of multi-agent networks: emergent problems, models, and issues. Springer-Verlag, London, 2010
2. **Kwang-Kyo Oh, Myoung-Chul Park, Hyo-Sung Ahn.** A survey of multi-agent formation control. Automatica, Volume 53, 2015, Pages 424-440, ISSN 0005-1098, <https://doi.org/10.1016/j.automata.2014.10.022>
3. <https://trikset.com/>, дата обращения: 30.04.2022
4. **K.N. McGuire, G.C.H.E. de Croon, K. Tuyls.** A comparative study of bug algorithms for robot navigation. Robotics and Autonomous Systems, Volume 121, 2019, 103261, ISSN 0921-8890, <https://doi.org/10.1016/j.robot.2019.103261>
5. **A. S. Matveev & P. A. Kononov** (2021) Distributed reactive motion control for dense cooperative sweep coverage of corridor environments by swarms of non-holonomic robots, International Journal of Control, <https://doi.org/10.1080/00207179.2021.2005258>
6. **A. S. Matveev and P. A. Kononov.** Decentralized reactive navigation for densest sweep coverage of corridor environments by swarms of non-holonomic robots. 29th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2021, pp. 1108-1113, <https://doi.org/10.1109/MED51440.2021.9480298>
7. **A. S. Matveev and P. A. Kononov.** Decentralized reactive control of robotic teams for cooperative sweep coverage of corridor-like environments. European Control Conference (ECC), 2021, pp. 1144-1149, 10.23919/ECC54610.2021.9655153
8. <https://www.python.org/>, дата обращения: 30.04.2022

P.A. Kononov (SPBU, Saint Petersburg), I.U. Shirokolobov (SPBU, Saint Petersburg). **Training and research stand for testing multi-agent robotic systems based on TRIK kit**

Robotic stand based on TRIK kit for testing multi-agent protocols was developed. The stand allow developing and experimenting with decentralized and distributed control protocols.

УДК 681.51

А. В. РЫБАЛКО

(Санкт-Петербургский государственный университет, Институт проблем машиностроения РАН,
Санкт-Петербург)**УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ РОБОТА ТРИК С ПОМОЩЬЮ ОДОМЕТРИИ**

Рассмотрена задача управления перемещением робота ТРИК, на основе решения задачи определения его координат. В качестве метода навигации была выбрана одометрия с использованием показаний энкодеров. Задача решена для 2D-моделирования. Для реального робота описаны возникающие проблемы и предложены пути их решения.

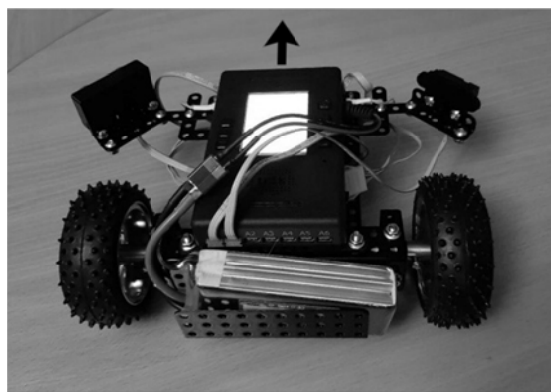
Введение. Известно, что основной проблемой всех существующих в настоящее время мобильных аппаратов, перемещающихся самостоятельно, без управления со стороны человека, остается навигация [1]. Казалось бы, задача навигации решена с появлением и распространением спутниковых систем навигации (ГНСС), но к сожалению, они не всегда удовлетворяют важному требованию: разность между действительным положением робота и его расчётными координатами не может превышать его габаритных. Существует ряд способов решения этой проблемы: использование радиомаяков, машинного зрения, инерциальных навигационных систем на основе гироскопов и акселерометров [2, 3]. Но среди множества подходов простейшим является одометрия на основе показаний энкодеров, установленных на колёсах робота, который был выбран в настоящей работе для решения задачи управления перемещением робота ТРИК [4].

Постановка задачи. В работе используется робот, собранный из кибернетического конструктора ТРИК, в состав которого входит два активных (с энкодерами) и одно пассивное колесо. Требуется, чтобы робот проехал на плоскости в произвольном направлении и вернулся в точку старта.

Вычисление координат робота на основе показаний энкодеров. Пусть положение робота на плоскости задаётся трёхмерным вектором (X, Y, A) , где X – абсцисса робота, Y – ордината робота, A – угол между осью абсцисс и вектором направления движения робота. При этом для каждого нового запуска программы, решающей поставленную задачу, будет заново определяться расположение осей координат: если условно вписать робота в квадрат так, что передняя часть робота будет соответствовать верхней стороне квадрата, то нулевая точка будет в левой нижней вершине квадрата, ось X будет направлена от нулевой точки к верхней левой вершине, а ось Y – направлена влево, перпендикулярно оси абсцисс. Таким образом начальное положение робота определяется вектором $(0, 0, 0)$.

Пусть (X_n, Y_n, A_n) – координаты робота в n -й момент времени. Тогда вычисление координат будет производиться по следующим формулам [5]:

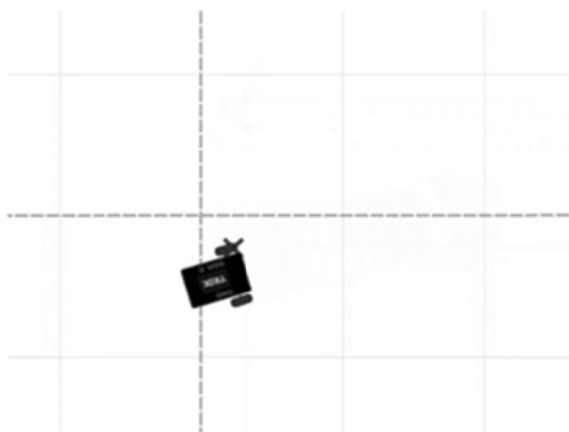
$$\begin{aligned} X_{n+1} &= X_n + 2\left(\frac{dL}{dR} + \frac{D}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{dL - dR}{2D}\right) \cdot \cos\left(A_n + \frac{dL - dR}{2D}\right), \\ Y_{n+1} &= Y_n + 2\left(\frac{dL}{dR} + \frac{D}{2}\right) \cdot \sin\left(\frac{dL - dR}{2D}\right) \cdot \sin\left(A_n + \frac{dL - dR}{2D}\right), \\ A_{n+1} &= A_n + \frac{dL - dR}{D}, \end{aligned} \quad (1)$$



решается
одометрии.

где dL – угол поворота левого колеса вокруг его оси вращения за такт времени, dR – угол поворота правого колеса вокруг его оси вращения за такт времени, а D – длина стороны квадрата, в который условно вписан робот. Значения dL и dR измеряются энкодерами.

Решение задачи. По формулам (1), используя показания энкодеров, вычисляются координаты робота на каждом такте. Сначала робот произвольно отъезжает от начальной точки на метр, а после он совершает поворот на требуемый угол для обеспечения движения в точку старта по прямолинейной траектории. Закончив вращение, робот движется прямо до тех пор, пока не попадает в начальную точку.



Этот алгоритм прекрасно работает в 2D-моделировании, что ясно из Рис. 2: на нём показано положение робота после завершения алгоритма. Крест под правым колесом обозначает точку старта, то есть робот возвращается в исходное положение. Но на реальном роботе возникает ряд сложностей, связанных с накоплением погрешностей определения координат, которые неизбежно возникают в естественных условиях. В работе было опробовано несколько способов решения этой проблемы. Во-первых, в зависимости от стадии выполнения задачи было предложено менять длительность такта решения задачи. Во-вторых, время вращения робота погрешности определения координат растут особенно

быстро, но при этом координаты X_n , Y_n практически не меняются, так как робот вращается на месте, поэтому разумнее в таком случае увеличить длительность такта и считать новые значения координат реже. При приближении значения угла отклонения направления робота от оси абсцисс A_n к значению требуемого угла целесообразно как можно чаще считать координаты, чтобы не проскочить заданную допустимой точностью окрестность требуемого угла. В первом случае вместо изначально взятых 50 миллисекунд, длительность такта задавалась в 200, 400 и 500 миллисекунд, а во втором – 7 миллисекунд. Это позволило несколько уменьшить погрешности определения координат, но при этом критическим остается случай уменьшения длительности такта, так как проблема быстрого роста ошибки определения координат по формулам (1) не была решена. Во-вторых, было опробовано изменение скорости вращения робота в зависимости от разности заданного значения угла A от рассчитанного. В начальной фазе вращения робота скорость может быть большая, но по мере приближения к заданному углу поворота скорость должна уменьшаться, чтобы не «пропустить» нужный угол. Фактически во время выполнения алгоритма скорость робота менялась в диапазоне от 35 м/с до 5 м/с. Третий путь уменьшения погрешности заключается в обнулении значений вектора координат после окончания роботом операции разворота и возвращение в точку старта по прямолинейной траектории на расстояние эквивалентное заданному изначально при старте.

Заключение. В работе показано, что одометрия на основе показаний энкодеров позволяет определять координаты мобильного робота ТРИК для решения задачи его управления на плоскости, однако в реальных условиях этот метод не обеспечивает требуемую точность. В дальнейшем проблему быстрого роста погрешности определения координат можно решить используя показания гироскопа, уже встроенного в контроллер робота ТРИК, что позволит с более высокой точностью определять направление устройства.

Работа выполнена в ИПМаш РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2021-573.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Власов С. М., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В.** Бесконтактные средства локальной ориентации роботов. Санкт-Петербург: Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО, 2017. С. 5-17.
2. **Матвеев В. В., Распопов В.Я.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 114 с.
3. **Denis Chikurtev, Nayden Chivarov, Stefan Chivarov, Ava Chikurteva.** Mobile robot localization and navigation using LIDAR and indoor GPS. *IFAC-PapersOnLine*. 2021. Volume 54, Issue 13, P. 351-356.
4. <https://trikset.com/>
5. **Pileun Kim, Jingdao Chen, Yong K. Cho.** Autonomous Mobile Robot Localization and Mapping for Unknown Construction Environments. *ASCE Construction Research Congress*. 2018. P. 5.

A. V. Rybalko, (SPbSU, IPME RAS, Saint Petersburg). **Displacement control of the TRIK robot using odometry**

This paper considers the problem of displacement control of the TRIK robot for which the robot needs to determine its coordinates in space. Odometry, based on encoder readings, was chosen as the navigation method. The problem was solved for a 2D simulation. For a real robot, the paper describes the emerging problems and puts forward suggestions for their solution.

УДК 681.51

А. Р. САГАТДИНОВ

(Санкт-Петербургский государственный университет, ИПМаш РАН, Санкт-Петербург)

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЫ КРУИЗ-КОНТРОЛЯ ДЛЯ РОБОТА ТРИК

Рассматривается задача создания круиз-контроля для группы роботов. Проанализирован ряд алгоритмов управления роботами и предложена простейшая реализация системы круиз-контроля для группы роботов ТРИК. для движения единой цепью.

Введение. Круиз контроль - это система, позволяющая роботам двигаться согласно определенному маршруту без помощи постороннего оператора, ориентируясь лишь на наличие препятствий и на других роботов группы [1]. Выбор темы обусловлен ее перспективностью: количество роботов в нашей повседневной жизни увеличивается, а спектр выполняемых ими задач становится все шире. В ближайшее время появятся полностью беспилотное такси и дроны разведчики, которым не требуется оператор. Однако при создании круиз-контроля для такого рода объектов требуется разработка системы навигации и прокладки маршрутов. В этой связи настоящая работа посвящена изучению существующих алгоритмов управления [2, 3] для создания своей системы круиз-контроля для нескольких роботов.

Постановка задачи. Рассмотрим возможность создания на базе специализированного конструктора от компании ТРИК трех мобильных роботов-тележек (Рис. 1), их калибровки и программирования, а также расчета наилучшего места для крепления датчиков [4, 5]. Роботов надо запустить в помещении так, чтобы первый двигался по прямой, а остальные следом за ним. Их главная задача, меняя свою скорость, держаться от ведущего на фиксированном расстоянии. Таким образом, нужно получить цепь из роботов, движущихся с одинаковой скоростью.



Рис. 1. Общий вид робота ТРИК

Описание алгоритма управления. Начнем с описания алгоритма управления для первого робота, главная задача которого заключается в движении по прямой с постоянной скоростью.

Для этого зададим двигателям одинаковые скорости вращения. Очевидно, что из-за различных погрешностей управления робот может изменить свое направление, поэтому для определения угла поворота каждого колеса воспользуемся энкодерами. Зная данные от каждого датчика и изменяя скорости вращения двигателей по отдельности, можно добиться синхронизации колес в следствии чего объект управления будет двигаться прямо.

Опишем теперь алгоритм управления последующими роботами, оснащенными системой круиз-контроля. Как и для первого робота, начнем с того, что зададим движение по прямой, при этом скорость мы установим максимальной. Далее воспользуемся ультразвуковым (УЗ) датчиком расстояния (Рис 2), который установлен в переднюю часть робота. Теперь алгоритм будет постоянно считывать расстояние до лидера (если УЗ датчик не видит перед собой предметов, то он возвращает максимальную дальность) и сравнивать его с заданной длиной дистанции между роботами. Скорость движения каждого робота вычисляется по формуле:

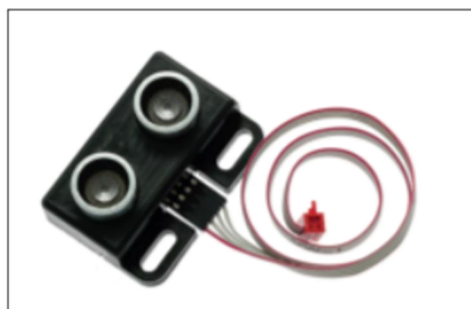


Рис. 2. Ультразвуковой датчик расстояния

$$V = v_0 + Q(S - D_{goal}),$$

где v_0 – начальная скорость, S – показания УЗ датчика расстояния, D_{goal} – целевая дистанция, Q – коэффициент, влияющий на быстроту изменения скорости объекта управления.

Также алгоритм использует условие, что если робот будет слишком близко к препятствию, то он просто останавливается.

Существующий подход обладает недостатком, если первый робот будет менять направление движения, то объект управления просто потеряет его из виду, и система круиз-контроля перестанет работать. Для решения этой проблемы используем два датчика расстояния и поставим их под некоторым углом относительно друг друга (Рис. 3). Теперь при смене направления ведущего, один из датчиков зафиксирует этот момент, после чего можно синхронизировать движения роботов используя следующие формулы:

$$V_{left} = v_0 - P(D_r - D_l) + Q \left(\frac{D_r - D_l}{2} - D_{goal} \right),$$

$$V_{right} = v_0 + P(D_r - D_l) + Q \left(\frac{D_r - D_l}{2} - D_{goal} \right),$$

где V_{left} , V_{right} – скорости левого и правого мотора соответственно, v_0 – начальная скорость, D_r – показания левого датчика расстояния, D_l – показания правого датчика расстояния, D_{goal} – целевая дистанция, P, Q – коэффициенты влияющие на быстроту изменения скорости и угла поворота объекта управления.

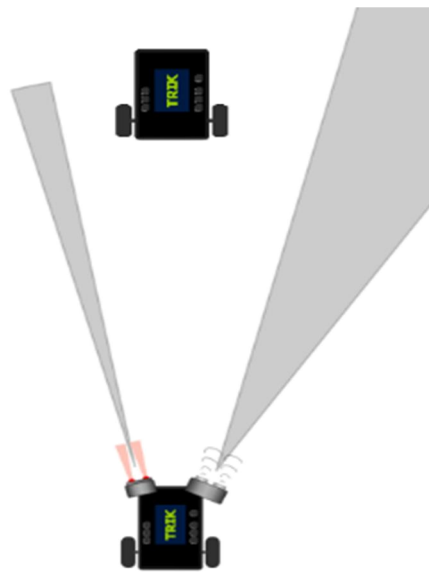


Рис. 3. Расположение датчиков на роботе ТРИК

Заключение. В работе разработан алгоритм работы системы круиз контроля. Проведен ряд экспериментов, по результатам которых при запуске роботов в одну линию в разные промежутки времени, они размещаются на одинаковом расстоянии друг от друга и начинают двигаться с одной скоростью. Проведенные эксперименты показали работоспособность разработанного алгоритма работы системы круиз-контроля.

Работа выполнена в ИПМаш РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2021-573.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Vahidi, A and Eskandarian, A**, Research advances in intelligent collision avoidance and adaptive cruise control, 2003, doi: 10.1109/TITS.2003.821292.
2. Design and experimental evaluation of cooperative adaptive cruise control / Ploeg Jeroen, Scheepers Bart T. M., Nunen Ellen Van, and Wouw Nathan Van De. — 2011.
3. P. A. Ioannou and C. C. Chien, "Autonomous intelligent cruise control," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 42, no. 4, pp. 657-672, Nov. 1993, doi: 10.1109/25.260745.
4. Робототехнический конструктор ТРИК <https://trikset.com/> (дата обращения 29.04.2022)
5. Software Trik Studio, <https://trikset.com/products/trik-studio> (дата обращения 29.04.2022)

A.R. Sagatdinov, (SPbSU, IPME RAS, Saint Petersburg). **Implementation of the simplest cruise control system for TRIK robot.**

The problem of creating a cruise control for a group of robots is considered. A number of robot control algorithms are analyzed and the simplest implementation of a cruise control system for a group of TRIK robots is proposed for movement in a single chain.

УДК 681.51

М.Ю. ЛАВРУХИН, Т.И.АМИРХАНОВ
(СПбГУ, ИПМаш РАН, г.Санкт-Петербург)

РЕАЛИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОБХОДА ПРЕПЯТСТВИЯ НА РОБОТЕ ТРИК

Представлены результаты реализации мобильного робота с системой управления, позволяющей роботу самостоятельно находить и объезжать препятствия на фиксированном расстоянии от них. Реализация выполнена средствами робототехнического конструктора ТРИК.

Введение. В современном мире большое значение имеют технологии, связанные с автономным движением машин или роботов. Спектр применения таких конструкций крайне широк. Примерами можно считать роботов доставщиков, работавших для доставки продуктов во время COVID – 19 [1], или же поисково-спасательные роботы [2]. Очевидно, что в ближайшем будущем подобные технологии станут крайне востребованы, в этой связи наличие возможности проектирования роботов позволит подготовить специалистов, способных создавать подобные приложения в будущем и совершенствовать уже имеющиеся технологии. В ИПМаш РАН была поставлена задачи реализации алгоритма обхода препятствия и его тестирования на модели робота ТРИК [3].

Постановка задачи. Требуется создать модель робота (Рис. 1) на основе кибернетического конструктора ТРИК [4] с использованием двух активных (с энкодерами) и одного пассивного колеса (Рис. 1). Далее необходимо разработать программное обеспечение, позволяющее роботу производить обход неподвижного выпуклого препятствия. К конструкции и алгоритму управления задаются следующие требования: робот должен сначала двигаться равномерно вперёд, оценивая окружающую обстановку с целью поиска препятствий, в случае их обнаружения он должен их объезжать на фиксированном расстоянии.

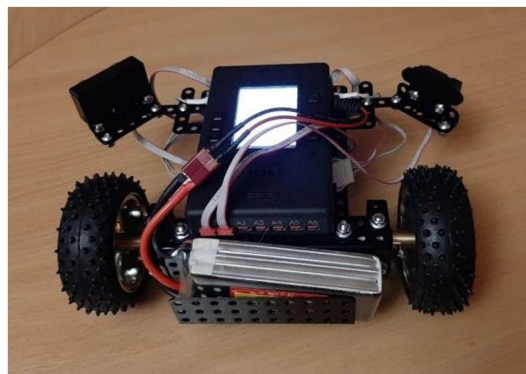


Рис 1. Робот ТРИК, для которого в работе решается задача обхода препятствия (в текущей конфигурации УЗ датчик находится спереди, а не с левого борта).

Алгоритм движения до препятствия. Алгоритм начинается с прямолинейного движения робота вперёд путем программной установки одинаковой скорости вращения осей двигателей левого и правого колеса. Процесс продолжается до тех пор, пока по показаниям УЗ датчика, расположенного на передней части робота, на фиксированном (заранее заданном) расстоянии не будет обнаружено препятствие. В случае отсутствия препятствия показания УЗ датчика соответствуют значению максимального расстояния доступного для измерения. При обнаружении препятствия на фиксированном расстоянии, запускается алгоритм его обхода.

Алгоритм обхода препятствия. Как только робот достигает фиксированного расстояния до препятствия, производится разворот вокруг оси, перпендикулярной платформе робота, а именно влево по ходу движения. Разворот выполняется для того, чтобы ИК датчик расстояния, находящийся на правой стороне робота справа, был повернут к препятствию. Критерием окончания разворота можно считать момент, когда ИК датчик начинает показывать заданное в программе расстояние до препятствия. Считается, что поскольку робот (Рис 2) имеет правильную квадратную форму, то рассчитанные расстояния на основании измерений УЗ и ИК датчиков примерно равны. Однако, измерения ИК и УЗ датчиков содержат погрешности, а также в силу асимметричности робота, измеренная дистанция УЗ-датчиком до препятствия перед поворотом

и измеренная дистанция ИК-датчиком после поворота отличаются. Поэтому в программе учитывается постоянная составляющая погрешности определения дистанции до препятствия разными датчиками. После завершения поворота, пользуясь измеренными значениями расстояния ИК датчика совершается обход препятствия. Учитывая опыт работы с реальными роботами, для обхода препятствия реализован алгоритм на основе П-регулятора [5], так как оказалось, что использование ПИД-регулятора является избыточным усложнением и замедлением алгоритма для учебной задачи.

П-регулятор и его использование. П-регулятор обеспечивает выработку сигнала управления объектом, таким образом, чтобы противодействовать отклонению наблюдаемой в текущий

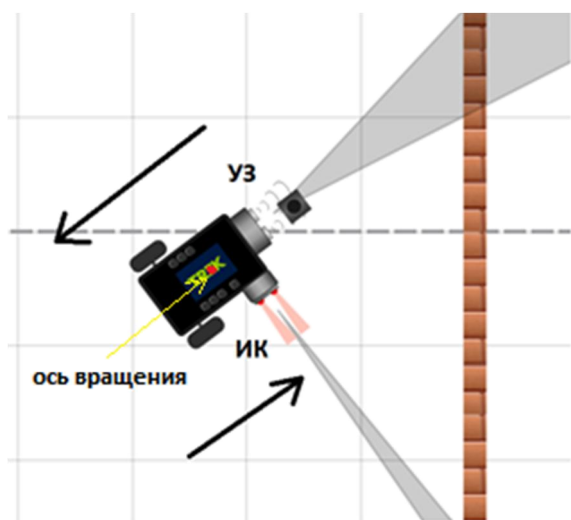


Рис2. Процесс разворота робота вокруг своей оси.

момент времени регулируемой величины от заданного значения. Рассмотрим, как П-регулятор применительно к рассматриваемому роботу. Регулируемая величина в данном случае - это расстояние от робота до препятствия (в процессе непараллельного движения она увеличивается и уменьшается соответственно). В случае параллельного движения препятствию ИК датчик показывает заданное расстояние, и робот будет двигаться прямо вдоль границы объезжаемого объекта.

При реализации рассматриваемого робота П-регулятор может быть записан как [2]:

$$mr = (y_{next} + k(Dgoal - distIK)),$$

$$ml = (y_{next} - k(Dgoal - distIK)),$$

где mr и ml - скорости, подаваемые на левый и правый мотор соответственно, y_{next} - базовая скорость робота (является одинаковой для обоих моторов и выбирается достаточно большой, чтобы робот быстро находил нужное препятствие), k - коэффициент, позволяющий контролировать “резкость движения робота” (выбирается таким образом, чтобы движение робота являлось плавными, при наличии геометрических особенностей объезжаемого препятствия), $Dgoal$ - заданная дистанция до препятствия, которую робот должен соблюдать (выбирается достаточно большой, чтобы тормозной путь не привёл к столкновению робота с препятствием но не более чем радиус действия датчика отвечающего за обнаружение препятствия), $distIK$ - дистанция по данным с ИК датчика. Таким образом, робот будет постоянно держать заданную дистанцию, избегая наездов на препятствия, а также контролировать “плавность” движения.

Заключение. В работе предложена модель робота и алгоритм его управления на основе П-регулятора, позволяющие роботу находить и объезжать препятствия на фиксированном расстоянии от них. В будущем планируется дополнить модель робота вторым ИК датчиком для возможности обхода препятствий с любой стороны, а также для усовершенствования системы управления с целью получения возможности самостоятельного выбора роботом наилучшего направления и алгоритма обхода препятствий.

Работа выполнена в ИПМаш РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-15-2021-573.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pani, A.; Mishra, S.; Goliias, M. ; Figliozzi, M.** “Evaluating public acceptance of autonomous delivery robots during COVID-19 pandemic”, 2021-01-13, DEC 2020, DOI 10.1016/j.trd.2020.102600
2. **Davids, A.,**”Urban search and rescue robots: From tragedy to technology”, MAR-APR 2002, DOI 10.1109/MIS.2002.999224

3. Робототехнический конструктор ТРИК <https://trikset.com/> (дата обращения 26.04.2022)
4. Software Trik Studio, <https://trikset.com/products/trik-studio>
5. **Карпов В. Э., Платонова М. В.** Система навигации мобильного робота // Информационные средства и технологии: тр. 18-й Междунар. науч.-техн. конф. Москва, 19-21 октября. – 2010. – С. 56.

M.U. Lavrukhin, T.I. Amirkhanov (SPbSU, IPME RAS, Saint Petersburg). **Implementation of the obstacles bypassing system on the TRIK robot**

The results of the implementation of a mobile robot with a control system that allows the robot to independently find and bypass obstacles at a fixed distance from them are presented. The implementation was carried out by means of the TRIK robotic designer.

СЕКЦИЯ 3. ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРИБОРОВ НАВИГАЦИИ

УДК 535.015

А. В. СМИРНОВА, С. В. ВАРЖЕЛЬ, В. Е. СТРИГАЛЕВ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ СТАБИЛИЗАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ФАЗОВОГО МОДУЛЯТОРА ПУТЕМ ПОДАВЛЕНИЯ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

В работе исследовано влияние пироэлектрического эффекта на волноводные свойства в интегрально-оптических модуляторах на основе соединения $Ti:LiNbO_3$. Выявлено, что за счет возникающего поля при нагреве или охлаждении модулятора наблюдается паразитный сдвиг фазы сигнала. Представлены результаты экспериментальных работ по подавлению пироэлектрического эффекта и стабилизации оптических характеристик модуляторов.

Введение. Кристалл ниобата лития (НЛ) является сегнетоэлектриком и обладает рядом оптических и электрооптических свойств [1]. Благодаря своей структуре данный материал получил как широкое применение в интегральной оптике, так и популярность среди научных исследований. Однако, несмотря на неоспоримые преимущества использования НЛ в качестве интегрально-оптических модуляторов, кристалл обладает рядом недостатков в применении. В частности, сегнетоэлектрические свойства кристалла приводят к проявлению спонтанной поляризации и пироэлектрическому (ПЭ) эффекту [2–4], это, в свою очередь, приводит к дрейфу фазы светового сигнала в электрооптических модуляторах на НЛ. Для высокоточных приборов и датчиков возникающие паразитные эффекты могут привести к сбоям и ошибкам в работе. Такая проблема может оказаться весьма серьезным препятствием для конструирования высокочувствительных интерферометрических схем, где требуется обеспечение стабильности фазы.

Целью работы являлось исследование возможности снижения влияния пироэлектрического эффекта на волновые свойства в интегрально-оптических модуляторах на основе ниобата лития. Для достижения цели необходимо решение следующих задач: а) измерение пироэлектрического сдвига фазы в образце интегрально - оптического модулятора; б) исследование методов подавления пироэлектрического эффекта и стабилизации оптических характеристик модуляторов и выбор наиболее оптимального метода.

Измерение пироэлектрического сдвига фазы в образце интегрально - оптического модулятора. На начальном этапе экспериментально-исследовательских работ проводилось измерение пироэлектрического сдвига фазы в образце интегрально-оптического фазового модулятора, у которого волновод изготовлен методом диффузии титана в кристалле НЛ X-среза и электродами для обеспечения фазовой модуляции. Для регистрации сдвига фазы был собран волоконно-оптический интерферометр Маха-Цендера (ИМЦ) (рис.1).

В одном плече устанавливался испытуемый образец, а во втором аналогичный фазовый модулятор для управления фазой сигнала. В качестве источника излучения использовался высокостабильный одночастотный волоконный лазер на длине волны 1550 нм. Фотодетектор подключался к системе DAQ на основе National Instruments cDAQ-9188, позволяющей одновременно считывать сигнал модуляции и фотодетектора, а дополнительный модуль NI 9211 регистрировал сигнал температуры от термопары. Для регулирования процесса нагрева и охлаждения образец закреплялся на элементе Пельтье через термопрокладку. Рядом с образцом на термопрокладке размещался горячий спай термопары, обеспечивающей точное измерение температуры прокладки. Для минимизации ошибок при регистрации фазы из-за температурных флуктуаций вся оптическая часть интерферометра помещалась в термобокс, который имеет два изолированных отдела. В первый помещались два разветвителя, разъемы и модулятор. А во

второй отдел помещался образец на элементе Пельтье, имеющий термоинтерфейс с оптическим столом для обеспечения возможности стабилизации температуры. В процессе эксперимента нагрев образцов происходил от комнатной температуры порядка 20°C, до температуры соответствующей напряжению, подаваемому на элемент Пельтье (не выше 40°C).

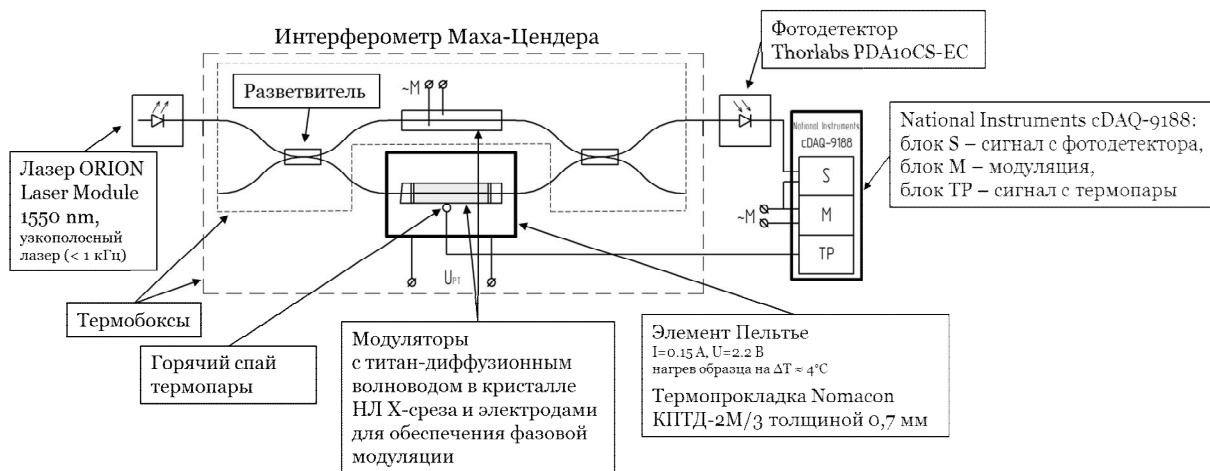


Рис. 1. Схема волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера.

Исследование методов подавления пьезоэлектрического эффекта и стабилизации оптических характеристик модуляторов. После нагрева образцов были исследованы поверхности НЛ, на которых имеются проводящие золотые электроды. На краях этих электродов происходит скопление свободных зарядов и перераспределение силовых линий электрического поля за счет пьезоэлектрического эффекта. Таким образом, в области краев электродов будет формироваться высокий уровень напряженности электрического поля.

Традиционным методом подавления влияния пьезоэлектрического эффекта для интегрально-оптических модуляторов на основе НЛ является нанесение токопроводящей композиции на полярные грани кристалла с последующим их объединением в электрическую цепь для беспрепятственной миграции тока на электроды [5]. В работе были проведены экспериментально-исследовательские работы по нанесению токопроводящего компаунда несколькими способами, которые представлены в таблице 1.

Таблица 1

Конфигурация нанесения компаунда		Схема (вид сверху)	
Начальный образец (W_{PY})			
Нанесение компаунда на боковины:	вдоль всей длины кристалла ($W_{PY} SC1$)		 (вид сбоку)
	только в районе электродов ($W_{PY} SC2$)		

На основе экспериментальных данных по сдвигу фазы при изменении температуры рассчитаны кривые ПЭ эффекта (рис. 2). Установлено, что для снижения паразитного ПЭ эффекта необходимо наносить компаунд на всю длину кристалла, в том числе и на ту часть, где нет электродов. Это позволит уменьшить время релаксации и быстрее стабилизировать фазу сигнала.

Однако, один из наиболее эффективных способов по подавлению ПЭ эффекта был получен путем повышения проводимости образца в процессе отжига. Для этого образец выдерживался в среде азота с водородом на протяжении 1 часа при температуре не более 400°C. На рис. 2 представлены кривые ПЭ эффекта, в том числе и для образца после отжига ($W_{PY\text{отжиг}}$). Время релаксации после отжига в сравнении с остальными экспериментами, сократилось в 3 раза за счет повышения проводимости образца.

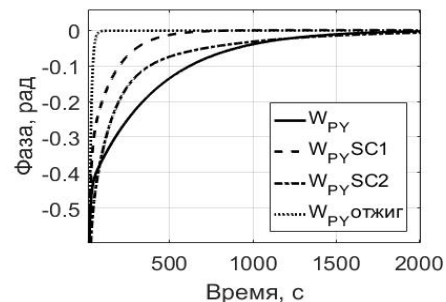


Рис. 2. Кривые пироэлектрического эффекта для образцов с различными модификациями по его подавлению

Заключение. Показана возможность снижения влияния пироэлектрического эффекта на волновые свойства в интегрально-оптических модуляторах на основе ниобата лития. Произведено измерение пироэлектрического сдвига фазы в образце интегрально - оптического модулятора с помощью волоконно-оптического интерферометра Маха-Цендера. Исследованы методы подавления пироэлектрического эффекта и стабилизации оптических характеристик модуляторов в том числе, способы уменьшения времени релаксации за счет нанесения токопроводящего компаунда на боковины модулятора. Приведена оценка эффективности подавления пироэлектрического эффекта за счет восстановительного отжига образца модулятора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **А.В. Яценко, С.М. Кострицкий.** Исследование влияния постоянного электрического поля на диэлектрические свойства LiNbO_3 // Физика твердого тела. 2020. Т.90. №4. С.647-651.
2. **Lefevre H.C.** The fiber-optic gyroscope. 2nd ed.: Artech House, 2014. 391 p.
3. **Сосунов А.В.** Стабильность интегрально-оптических схем на основе $\text{H}_x\text{Li}_{1-x}\text{NbO}_3$ – волноводов в зависимости от состояния приповерхностного слоя кристалла ниобата лития // Дис. канд. тех. наук. Перм. гос. нац. иссл. ун-т, Пермь. 2021. 115 с.
4. **Popescu S.T., Petris A., Vlad V.I.** Interferometric measurement of the pyroelectric coefficient in lithium niobate // Journal of Applied Physics. 2013. V. 113. N 4. P. 43101. doi: 10.1063/1.4788696.
5. **Bulmer C.H., Burns W.K., Hiser S.C.** Pyroelectric effects in LiNbO_3 channel-waveguide devices // Appl. Phys. Lett. 48(16), 1036-1038 (1986).

A.V. Smirnova, S.V. Varzhel, V.E. Strigalev (ITMO University, Saint-Petersburg). **Methods of suppressing the pyroelectric effect to stabilize the optical parameters in a phase modulator**

The article researches the influence of the pyroelectric effect on the waveguide properties in integral-optical modulators based on Ti:LiNbO_3 compound. It is found that a parasitic phase shift of the signal is observed due to the arising field during heating or cooling of the modulator. The results of experiments on suppression of the pyroelectric effect and stabilization of the optical characteristics of the modulators are presented.

УДК 681.51

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

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПОЛОГИИ ВСТРЕЧНО-ШТЫРЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ КОЛЬЦЕВОГО ВОЛНОВОГО РЕЗОНАТОРА НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Работа посвящена влиянию изменения конструкции встречно-штыревого преобразователя на амплитудно-частотную характеристику и полосу пропускания разрабатываемого чувствительного элемента кольцевого волнового резонатора на поверхностных акустических волнах. В работе рассмотрены различные конструкции встречно-штыревого преобразователя и оценивается влияние изменений конструкции на характеристики чувствительного элемента.

Введение. В последние годы все больше внимания уделяется датчикам на поверхностных акустических волнах (ПАВ), поскольку характеристики микроэлектромеханических систем (МЭМС) на ПАВ могут по некоторым параметрам превосходить их аналоги, и такие датчики могут быть конкурентоспособными на мировом рынке. Датчики на ПАВ в своей конструкции не имеют торсионов, а чувствительный элемент жестко закреплен в корпусе датчика, что позволяет ему выдерживать более высокие внешние воздействия по сравнению с классическими МЭМС. Можно строить датчики на ПАВ, чувствительные к малым постоянным сигналам [1], а также датчики угловых перемещений на объемных акустических волнах [2], под воздействием которых изменяется поляризация волн.

В настоящее время акселерометры на ПАВ создаются небольшим числом фирм [3], а датчики на ПАВ наиболее широко используются в качестве систем для анализа пара и газа [4], контроля температуры [5] и определения давления [6].

В предыдущей работе [7] авторами рассматривались частотные характеристики и способы закрепления чувствительных элементов в виде волнового кольцевого резонатора на ПАВ в корпусе из различных материалов, а также влияние внешних факторов на чувствительные элементы.

Целью работы являлось: а) определение наиболее эффективной геометрии встречно-штыревого преобразователя (ВШП) чувствительного элемента кольцевого волнового резонатора на ПАВ для получения малых боковых мод и полосы пропускания, что позволит улучшить детектирование сигнала при влиянии ускорения на чувствительный элемент; б) проверка сохранения работоспособности работы прибора при возникновении дефектов литографии в конструкции посредством частичной фрагментации конструкции ВШП посредством компьютерного моделирования.

Результаты работы позволят усовершенствовать ранее предложенную конструкцию микроэлектромеханического акселерометра на ПАВ на основе мембранного чувствительного элемента [7, 8, 9].

Определение оптимальной геометрии штырей (электродов) встречно-штыревого преобразователя. Общий вид мембранного чувствительного элемента кольцевого волнового резонатора на поверхностных акустических волнах представлен на рис. 1. Он состоит из двух ВШП в форме кольца (2) и консоли из пьезоэлектрического материала (1), расположенной между преобразователями. Вся конструкция ограничена по глубине и по радиусу демпфирующей средой для подавления паразитных отражений волн от внешних границ. Консоль закрепляется в корпусе (4) через демпфирующий материал (3) для распределения нагрузки по всей консоли [7].

Научный руководитель к.т.н., доцент Шевченко Сергей Юрьевич

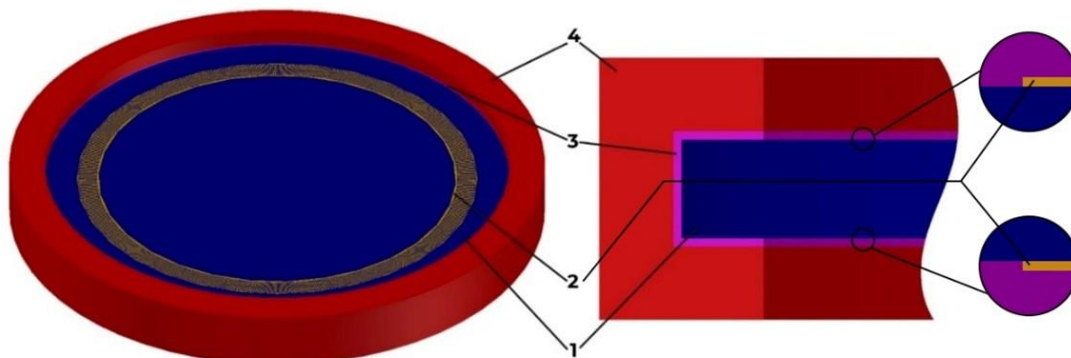


Рис. 1. Мембранный чувствительный элемент: 1 - консоль; 2 - встречно-штыревые преобразователи; 3 - демпфирующий материал; 4 - корпус.

Электрод является частью конструкции ВШП и представлен на рис. 2. В первой части экспериментально-исследовательских работ определялась оптимальная геометрия штырей. Изначально конструкция предполагала конусообразные электроды ВШП, которые на протяжении всей апертуры от внешнего края ВШП до внутреннего позволяли сохранять ширину штыря относительно длины волны как $\lambda/4$. В работе также были предложены прямоугольные электроды, которые на протяжении всей апертуры имели ширину 4,8 мкм ($\lambda/4$), что позволяло сохранить шаг в $\lambda/4$ на внешней части ВШП, а к внутренней части ВШП межэлектродное расстояние сокращалось.

По результатам моделирования можно сказать, что прямоугольная геометрия электродов позволила получить увеличение реальной составляющей комплексной проводимости ($\text{real } Y_{11}$) на 11%, полосу пропускания сократить на 37% до 107 кГц, и превышение основной моды над второй в 5 раз.

Частичная фрагментация встречно-штыревого преобразователя. Вторая часть работы была посвящена анализу влияния частичной фрагментации ВШП на характеристики чувствительного элемента с прямоугольной геометрией, которая может возникать при литографии компонентов чувствительного элемента, а также за счет несовершенства технологического процесса изготовления кольцевого ВШП [10]. Согласно теории ПАВ, при отсутствии общей шины возникают условия для автогенерации волны в последующих участках ВШП.

В работе было предложено семь видов ВШП с частичной фрагментацией: три из них имели общую шину, четыре – не имели. Анализируя результаты моделирования можно сделать вывод о том, что частичная фрагментация ухудшает характеристики чувствительного элемента: значения реальной составляющей комплексной проводимости и отношение первой моды ко второй уменьшались пропорционально количеству отсутствующих штырей. Некоторые предложенные конструкции показали равенство мод. Конструкции ВШП с наличием общей шины показали лучшие результаты по отношению к конструкциям без общей шины, из чего можно сделать вывод о том, что общая шина позволяет сохранить ПАВ в апертуре ВШП.

Заключение. В результате экспериментально-исследовательских работ по тестированию различных конструкций установлено, что наиболее эффективной геометрией встречно-штыревого преобразователя чувствительного элемента кольцевого волнового резонатора на поверхностных акустических волнах является конструкция с прямоугольными электродами.

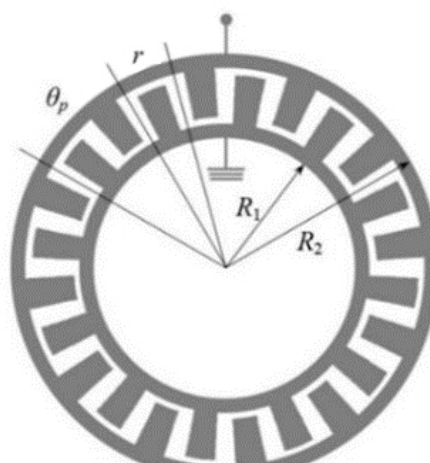


Рис. 2. Встречно-штыревой преобразователь: R_1 – внутренний радиус ВШП; R_2 – внешний радиус ВШП; r – штырь (электрод); θ_p – период ВШП.

Также для создания чувствительного элемента микромеханического акселерометра на ПАВ могут использоваться конусообразные электроды ВШП.

Установлено, что сужение периодов в сторону внутренней части конструкции ВШП улучшает частотные характеристики микромеханического акселерометра на поверхностных акустических волнах, а именно позволяет увеличить отношение максимальных значений первой моды ко второй и уменьшить полосу пропускания.

Проведена оценка возможности сохранения работоспособности кольцевого волнового резонатора при возникновении дефектов литографии в конструкции, посредством проведения частичной фрагментации ВШП с удалением не более одной пары ВШП на 10 и более периодов. При этом установлено, что частичная фрагментация ВШП должна быть равномерной. При увеличении числа исключенных электродов геометрия кольцевого резонатора нарушается, и волна выходит из заданного геометрией положения.

Наличие общей шины позволяет удерживать поверхностную акустическую волну внутри структуры ВШП.

Работа проводилась при поддержке гранта РНФ/ЛИИС-115

ЛИТЕРАТУРА

1. **Gupalov V., Kukaev A., Shevchenko S., Shalymov E., Venediktov V.** Physical principles of a piezo accelerometer sensitive to a nearly constant signal. *Sensors* 2020, 18, 3258.
2. **Durukan Y., Shevelko M., Peregudov A., Popkova E., Shevchenko S.** The effect of a rotating medium on bulk acoustic wave polarization: From theoretical considerations to perspective angular motion sensor design. *Sensors* 2020, 20, 2487.
3. **PCB > Products > Product Finder.** URL: <https://www.pcb.com/products/product-finder?tx=15> (дата посещения: 28 января 2022).
4. **Constantinoiu I., Viespe C.** Development of Pd/TiO₂ Porous Layers by Pulsed Laser Deposition for Surface Acoustic Wave H₂ Gas Sensor. *Nanomaterials* 2020, 10, 760.
5. **Li X., Wang W., Fan S., Yin Y., Jia Y., Liang Y., Liu M.** Optimization of SAW Devices with LGS/Pt Structure for Sensing Temperature. *Sensors* 2020, 20, 2441.
6. **Tang Z., Wu W., Gao J., Yang P., Luo J., Fu C.** Water Pressure Monitoring Using a Temperature-Compensated WP-SAW Pressure Sensor. In *Proceedings of the IEEE 18th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, Warwick, UK, 20 July 2020; pp. 354–357.
7. **Shevchenko S.Y., Mikhailenko D.A., Markelov M.A.** Comparison of AlN vs. SiO₂/LiNbO₃ Membranes as Sensitive Elements for the SAW-Based Acceleration Measurement: Overcoming the Anisotropy Effects. *Sensors* 2020, 20, 464.
8. **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.
9. **Lukyanov D., Shevchenko S., Kukaev A., Filippova E., Safronov D.** Microaccelerometer based on surface acoustic waves. In *Proceedings of the 2014 Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications*, Beijing, China, 30 October 2014; pp. 18–21.
10. **Bagdasaryan A., Sinitsyna T., Mashinin O., Ivanov P., Egorov R.** SAW frequency selection devices in modern communication systems, radar and telecommunications. *Electronics: Science, technology, business*; Russia, 2013, № 8; pp. 128–136

D.A. Mikhailenko (Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg)

Optimization of the topology of the interdigital transducer of a ring wave resonator on surface acoustic waves

The work is devoted to the effect of changing the design of a ring resonator on surface acoustic waves on the amplitude-frequency characteristic and bandwidth of the developed sensitive element of a ring wave resonator on surface acoustic waves. The paper considers various designs of the interdigital transducer and evaluates the impact of design changes on the characteristics of the sensing element.

УДК 534.232, 534.286.2

И. С. ПЕСТЕРЕВ, А. К. БАТАНОВ, А. В. ГАРИНКОВ, А. А. КУЗЬМИН
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО
ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩЕГО ЭКРАНА**

Рассмотрены основные виды и условия применения традиционных звукоотражающих экранирующих материалов. Сделан вывод о перспективности разработки звукопоглощающих экранов, устойчивых к воздействию высоких гидростатических давлений. Приведено описание технологии изготовления функционально-градиентного звукопоглощающего материала и результаты измерения его характеристик.

Введение. В современной гидроакустике эффективность работы и достижение необходимых направленных свойств различных преобразователей и антенн традиционно обеспечивается за счет использования пассивных звукоизолирующих конструкций или акустических экранов [1, 2]. Значительный интерес в этой области представляет задача эффективного экранирования конформных антенн большой площади, покрывающих носовую часть подводного носителя и повторяющих ее форму. Актуальность задачи экранирования таких антенн связана с существенным влиянием отражения звука экраном антенны на скрытность носителя по вторичному гидроакустическому полю при его поиске методом активной гидролокации. Применительно к разработке гидроакустических средств автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), выполняющих наиболее глубоководные обзорно-поисковые работы, задача экранирования антенн дополнительно усложняется повышенными требованиями устойчивости к гидростатическому давлению.

Цель работы заключалась в разработке широкополосного экрана из звукопоглощающего материала, обеспечивающего решение задачи эффективного экранирования конформных антенн большой площади применительно к разработке гидроакустических антенн АНПА.

Виды звукоизолирующих материалов. Большинство применяющихся в гидроакустике экранирующих материалов [1] можно разделить на акустически жесткие, имеющие $\rho c \gg (\rho c)_в$, и акустически мягкие с $\rho c \ll (\rho c)_в$ (где ρ – плотность материала и c – скорость звука в нем, $(\rho c)_в$ – волновое сопротивление воды). Применение акустически жестких экранов в виде металлических пластин из-за сравнительно большой их массы оправдано только в высокочастотном диапазоне и при высоких гидростатических давлениях. Наиболее распространены экраны из пористых резин (используются на рабочих глубинах до 200 м), слоев резины с цилиндрическими воздухозаполненными каналами, или РЦК (до 400 м) и пенополиуретанов (до 1000 м), в той или иной степени обладающие свойствами акустически мягкого материала.

Несмотря на то, что вышеперечисленные материалы успешно применяются для звукоизоляции чувствительных элементов антенн, с точки зрения обеспечения скрытности носителя по вторичному полю непригодны ввиду высоких значений коэффициента отражения звука, который составляет, в среднем, от 0,5 до 0,9 в рабочем диапазоне частот [2]. Кроме того, использование широко распространенных акустически мягких экранов в составе многоэлементной антенны приводит к уменьшению ее максимального сектора обзора по причине сужения характеристик направленности отдельных преобразователей антенны [3]. Этим недостатком лишены звукопоглощающие экраны с низким звукоотражением, которое достигается за счет согласования входного импеданса ρc экрана с волновым сопротивлением воды $(\rho c)_в$.

Разработка и применение звукопоглощающего экрана. Акустическое согласование экрана с рабочей средой и сохранение его экранирующих свойств могут быть одновременно реализованы за счет функционально-градиентной структуры, экранирующие свойства которой плавно усиливаются с глубиной проникновения звуковой волны [4]. Согласованным входным

импедансом $\rho c \approx (\rho c)_в$ обладают некоторые марки резин и полиуретанов, применяемых в морском приборостроении и стойких к воздействию соответствующих внешних химических и климатических воздействий. Экранирующие свойства полимерного материала обеспечиваются добавлением воздушных включений, однако применение газонасыщенных структур без дополнительного механического усиления, как показано выше, ограничено рабочими глубинами до 200 м. При изготовлении экранов, устойчивых к высоким гидростатическим давлениям, применяются два основных метода получения газонасыщенной структуры – за счет заполнения полостей в слое резины прочным пористым материалом с высоким воздухоудержанием [5, 6] и путем добавления в полимерный материал полых воздухонаполненных стеклянных сфер различного диаметра [7, 8]. Второй метод является более технологичным при производстве и при установке экрана на корпус носителя со сложным профилем, однако известные конструкции экранов, изготовленных данным методом, не обладают градиентом экранирующих свойств.

Решение задачи изготовления функционально-градиентного и технологичного композитного экрана было получено способом, описанным в работе [9]. Смесь полых стеклянных микросфер и полиуретана, который имеет $\rho c \approx (\rho c)_в$, размещается в цилиндрическом барабане центрифуги и при ее вращении распределяется по барабану в виде пластины. Центробежные силы, действующие на смесь, разделяют ее на фракции: более тяжелый полиуретан занимает периферийное расположение (по внешней поверхности формируемой пластины), а микросферы, как более легкая фракция, перемещаются к внутренней поверхности пластины. Таким образом, на внешней поверхности пластины образуется сплошной массив полиуретана, акустически согласованного с рабочей средой, а на внутренней формируется звукопоглощающий слой, образованный стеклянными микросферами и полиуретановым связующим.

Пластины звукопоглощающего материала, полученные по разработанной технологии с использованием эластомера Сурэл-7 в качестве связующего ($\rho c \approx 1,3(\rho c)_в$) и стеклянных микросфер марки МС-ВП диаметром 20-120 мкм (массовая доля в смеси 10–12 %), имеют толщину 9 мм. Для образца акустического экрана, изготовленного параллельным набором пластин со структурой «эластомер – микросферы», или ЭМС-экрана, на рис. 1 показаны частотные зависимости коэффициента отражения звука в воде при гидростатических давлениях 1 МПа (~100 м глубины) и 3 МПа (~300 м глубины), в сравнении с аналогичными характеристиками экрана с РЦК. Представленные результаты демонстрируют заметное снижение звукоотражения при переходе от экрана с РЦК к ЭМС-экрану (в 2 раза в полосе частот 800–8000 Гц), что с учетом примерно равных коэффициентов прохождения звука говорит об определяющем влиянии эффекта звукопоглощения на характеристики ЭМС-экрана.

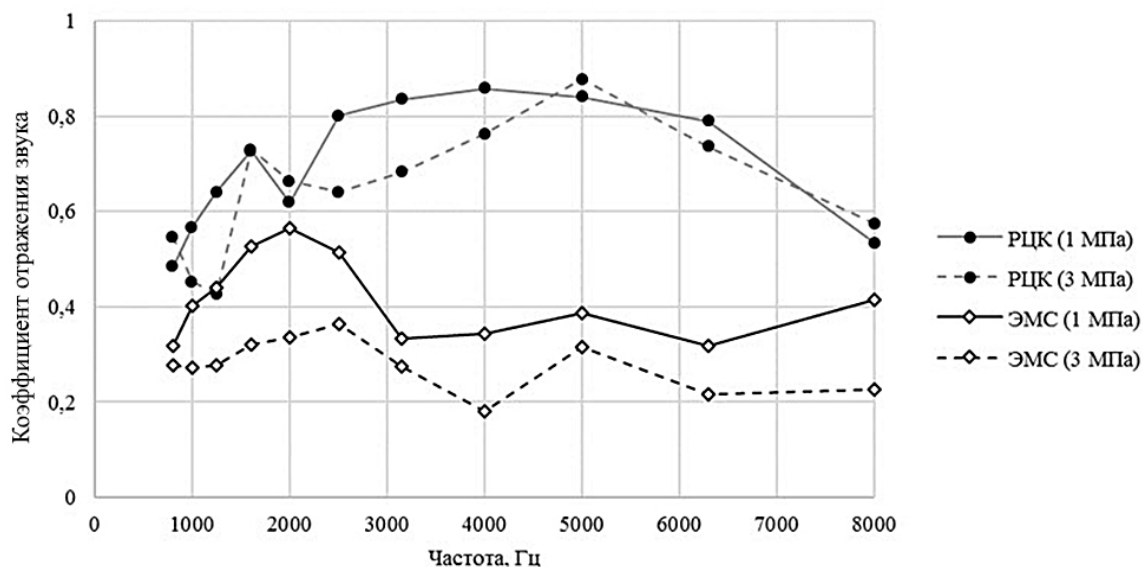


Рис. 1 – Частотные зависимости коэффициента отражения звука для экрана с РЦК и ЭМС-экрана при воздействии гидростатических давлений 1 МПа и 3 МПа

Заключение. В результате экспериментально-исследовательских работ был разработан высокоэффективный звукопоглощающий материал, который может быть использован для изготовления экранов гидроакустических антенн АНПА с практически любым геометрическим профилем в широком диапазоне частот и гидростатических давлений. Приведены технологические особенности изготовления звукопоглощающего материала со структурой «эластомер-микросферы» для создания широкополосного ЭМС-экрана для эффективного экранирования конформных антенн большой площади. Исследованы свойства полученных ЭМС-экранов при различных гидростатических давлениях. Установлено заметное снижение звукоотражения и улучшение звукопоглощающих свойств разработанных ЭМС-экранов по сравнению с РЦК-экранами.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В.** Корабельная гидроакустическая техника: Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004. 410 с.
2. **Глазанов В.Е., Михайлов А.В.** Экранирование гидроакустических преобразователей. СПб.: Элмор, 2004. 256 с.
3. **Песоцкий А.В., Смаришев М.Д.** Сопоставительная оценка эффективности приемных антенн, состоящих из комбинированных приемников, в свободном поле и вблизи плоского экрана. *Акустический журнал*. 1989. Том 35, вып. 3. С. 495–498.
4. **Болнокин В. Е., Сторожев В. И., Минь Хай Зыонг.** Модель плоского многослойного гидроакустического экрана с анизотропными функционально-градиентными компонентами. *Вестник ВГУ, серия: Системный анализ и информационные технологии*. 2016. № 1. С. 21–27.
5. Патент **RU 2431891 C2** МПК G10K 11/168. Пластина гидроакустического покрытия. Оpubл. 20.10.2011.
6. Полезная модель **RU 151353 U1** МПК C08L 75/00. Эластичная композитная пластина. Оpubл. 10.04.2015.
7. Патент **US 4079162** МПК E04B 1/99. Soundproof structure. Оpubл. 14.03.1978.
8. Патент **US 7263028 B2** МПК G10K 11/16. Composite acoustic attenuation materials. Оpubл. 28.08.2007.
9. **Батанов К.А., Чайка Д.М., Гаринков А.В.** Способ изготовления звукопоглощающего экрана для гидроакустических антенн. *Труды XIV Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики»*. СПб, 2018. С. 176–178.

I.S. Pesterev, A.K. Batanov, A.V. Garinkov, A.A. Kuzmin (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint-Petersburg). **Development and application of broadband hydroacoustic sound-absorbing shield**

The main types and conditions for the use of traditional sound-reflecting shielding materials are considered. A conclusion about the prospects of development sound-absorbing shields, that are resistant to high hydrostatic pressures, is made. A description of the technology for manufacturing a functionally graded sound-absorbing material and the results of measuring its characteristics are presented.

УДК 535-45

Е.Э. КАЛУГИН, А.Б. МУХТУБАЕВ, И.К. МЕШКОВСКИЙ
(Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ СТЕКЛОПРИПОЕМ НА ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ЭКСТИНКЦИИ В ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЯЮЩЕМ ОПТИЧЕСКОМ ВОЛОКНЕ

В работе рассмотрено влияние герметизации стеклоприпоем пары оптических двулучепреломляющих волокон на величину коэффициента поляризационной экстинкции. Предложен вариант с размещением в области герметизации нерабочих волокон для создания симметрии наведенных механических напряжений. Выполнено экспериментальное исследование влияния наведенных механических напряжений на величину коэффициента поляризационной экстинкции.

Введение. Потребность формирования герметичного ввода оптического волокна в корпус оптоэлектронных устройств продолжает расти в связи с повышающимися требованиями отраслей промышленности, использующих оптоэлектронные устройства, к производительности и надежности этих устройств в целом. Ввод оптического излучения в волновод оптоэлектронных устройств, например, интегральной оптической схемы (ИОС), требует сверхточного метода позиционирования оптического волокна, т.к. сдвиг или растяжение волокна может привести к потерям мощности оптического излучения в области стыковки волокна с волноводом ИОС. Оптические свойства электрооптических кристаллов, на которых формируют ИОС, меняются в зависимости от прикладываемого электрического напряжения, наличия водяных паров в окружающей среде, изменения температуры и газового состава окружающей атмосферы [1-3]. Поэтому требования надежности исключают использование эпоксидной смолы в качестве фиксирующего волокно адгезива из-за ползучести материала, выделения газов и предрасположенности к деградации со временем. Метод с металлизацией голого волокна и последующей впайкой металлическим припоем в металлическую трубку не только дорог, но и также приводит к проблемам с надежностью. Из-за различия коэффициента термического расширения (КТР) кварца и металлов, в используемых припоях, при изменении температуры возникают наведенные механические напряжения, которые влияют на оптические свойства оптических волокон [4].

Работа посвящена исследованию влияния герметизации стеклоприпоем пары двулучепреломляющих оптических волокон на оптические свойства этих волокон.

Особенности двулучепреломляющих оптических волокон и постановка задачи. Оптические волокна с сохранением поляризации часто используются при разработке различных волоконно-оптических датчиков. В таких волокнах состояние поляризации оптического излучения сохраняется за счет создания асимметрии в структуре волокна, что создает анизотропию и формирует двулучепреломление. Такие волокна называют двулучепреломляющими (ДЛП).

При возникновении внешних механических воздействий происходит перераспределение напряжений в структуре волокна, что в свою очередь приводит к изменению двулучепреломления и к перекачке оптической мощности из основной поляризационной моды в ортогональную. Точечные места перекачки оптической мощности в ДЛП волокнах описываются коэффициентом поляризационной экстинкции PER (polarization extinction ratio, измеряется в децибелах, дБ). Он определяется по выражению (1) [5-8]:

$$PER = \frac{P_{\perp}}{P_{\parallel}}, \quad (1)$$

где: P_{\perp} – оптическая мощность, перекачавшаяся в ортогональное состояние поляризации; P_{\parallel} – оптическая мощность основного состояния поляризации.

ДЛП волокна используются в качестве чувствительных элементов в интерференционных волоконно-оптических датчиках, например, в волоконно-оптическом гироскопе (ВОГ). Локальные точки связи поляризационных мод приводят к ошибке сигнала ВОГ. В работе [9] показано, что максимальное значение сдвига фазы Саньяка в ВОГ зависит от величины коэффициента поляризационной экстинкции в волноводе ИОС и в ДЛП волокне контура:

$$\Delta\Phi_e = 2 \cdot \arctan \left(\frac{PER_1}{1 - PER_1} \cdot \tan \alpha \right), \quad (2)$$

где: $\Delta\Phi_e$ - максимальное значение сдвига фазы Саньяка, PER_1 - PER волновода ИОС, α – угол рассогласования между поляризационными осями в ДЛП волокне, который имитировал локальную связь поляризационных мод, согласно формуле:

$$PER(\alpha) = 10 \lg \left(\frac{\sin(2\alpha)^2}{\left(\sqrt{1 - \sin(2\alpha)^2} + 1\right)^2} \right), \quad (3)$$

Делать отдельные гермовыводы зачастую не позволяют допустимые габариты устройства, поэтому возникает необходимость формирования гермовывода для пары ДЛП волокон с каждой из сторон.

Целью работы являлся выбор оптимального метода герметизации двулучепреломляющих оптических волокон стеклоприпоем с определением влияния коэффициента поляризационной экстинкции на свойства волокон. Для этого необходимо решение следующих задач: сравнение симметричной и асимметричной структур, получаемых различными методами герметизации стеклоприпоем ДЛП волокон с оценкой влияния метода герметизации на величину коэффициента поляризационной экстинкции и определение воздействия наведенных механических напряжений на коэффициент поляризационной экстинкции.

Методика герметизации волокна и исследование свойств волокон. Для тестирования метода герметизации оптического волокна в пропускной трубке из ковара (сплав 29НК) был разработан индукционный нагреватель, который разогревал трубку, а та в свою очередь плавил преформу стеклоприпоя. Для проведения исследования использовались круглые преформы стеклоприпоя, подходящие для герметизации двух-четырёх волокон. Температура плавления преформ стеклоприпоя составляла $+(300-400)^\circ\text{C}$. Материалы данных компонентов выбирались как наиболее близкие по КТР к плавленому кварцу, из которого изготавливаются оптические волокна: КТР кварца равен $1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, КТР ковара - $3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, а стеклоприпоя - $2,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. В используемом нагревателе индуктор состоял из одного витка медного провода, намотанного на ферритовый тороидальный сердечник с зазором, внутрь которого помещается коваровая трубка для нагрева. Мощность нагрева регулировалась входным напряжением схемы. В ходе работы было подготовлено 4 образца. Первый образец герметизировался по первому методу - с помощью двух отрезков волокна с созданием симметричной структуры. Другие три образца герметизировались по второму методу - в процессе герметизации использовались четыре одинаковых волокна: два рабочих и два заполняющих для создания изометрии механических напряжений. При этом структура становилась асимметричной. Для анализа величины PER в исследуемых образцах использовалась методика широкополосной интерферометрии со сканирующим интерферометром Майкельсона. С помощью данной методики можно добиться высокой точности в определении места локального преобразования в оптическом тракте, а по амплитуде - дать оценку величине PER [10]. Также было проведено исследование зависимости PER от температуры коваровой трубки. Для этого использовался элемент Пельтье. Исследование состояло из трех этапов: нагрев от комнатной температуры до $+70^\circ\text{C}$, остывание до комнатной температуры и охлаждение до -15°C .

Результаты исследований показали, что механическое сжатие с разной величиной и в различных областях ДЛП волокна по-разному влияет на изменение величины PER [11, 12].

Применяя данный метод герметизации ДЛП волокон можно получить минимальное влияние PER на сигнал гироскопа, связанный с возникновением перекачки оптического излучения из основной поляризационной моды в дополнительную. Так, например, величина PER, равная -50 дБ при -12°C в образце №2, приведет к сдвигу фазы Саньяка на $0,077 \cdot 10^{-3}$ рад, а PER, равная -18 дБ при 0°C в образце №3, приведет к сдвигу на $0,22 \cdot 10^{-3}$ рад согласно формулам (1) и (2). В обоих случаях это малые величины, которые не повлияют на качество сигнала гироскопа [9]. Проведенный в работе эксперимент доказывает, что создание изометрии структуры в области герметизации с помощью добавления не рабочих волокон позволяет уменьшить температурную зависимость коэффициента поляризационной экстинкции с 0,082 дБ/°C до 0,035 дБ/°C в температурном диапазоне от -15°C до +70°C.

Заключение. Исследовано влияние герметизации стеклоприоем пары оптических двулучепреломляющих волокон, осуществлённой двумя разными методами, на величину коэффициента поляризационной экстинкции. Выбран оптимальный метод герметизации волокон, который включает в себя создание ассиметричной структуры с добавлением в область герметизации дополнительных нерабочих волокон с целью создания анизотропии наведенных механических напряжений, возникающий в ходе герметизации. Произведена оценка влияния метода герметизации и воздействия наведенных механических напряжений на величину коэффициента поляризационной экстинкции. Экспериментально доказано, что метод герметизации с ассиметричной структуры позволяет получить меньшее влияние коэффициента поляризационной экстинкции на сигнал гироскопа и уменьшить температурную зависимость коэффициента поляризационной экстинкции более чем в два раза по сравнению с методом герметизации с созданием симметричной структуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Патент США, №8070368, **John Moody, Robert Morris**. Hermetically packaged LiNbO₃ optical circuit with oxidizing fill gas.
2. Патент ЕС, №3270107, 2018.11.14, **Nancy E. Iwamoto, Steven J. Sanders, Timothy J. Gallagher, Stephen Yates, Austin Taranta, Jason C. Grooms, Kara L. Warrenford**. Stabilizing gas in an optical gyro based on an inorganic waveguide.
3. Патент ВБ, №2306690, 1997.05.7, **Alan Donaldson, Steven John Freer**. Lithium niobate devices.
4. **Mark Shaw, Robert Galeotti, Giacomo Coppo**. "Method of Fixing an Optical Fibre in a Laser Package," Electronic Components and Technology Conference, 2001.
5. **Lefevre, H.**, Fiber-optic gyroscopes // Artech house. – 1993.
6. **Kaminow I.P.** Polarization-maintaining fibers, Applied Scientific Research V. 41. N 3–4. 1984, P. 257–270.
7. **Люкумович Л.Б.** Поляризационные эффекты в волоконных интерферометрах на основе двулучепреломляющих световодов ... д.ф.-м.н.: защищена 16.10.08; утв. 08.09.08 – СПб., 2008. – 333 с.
8. **Marcuse D.**, Coupled-mode theory for anisotropic optical waveguides// Bell syst. Tech. J., vol. 54, pp. 985-995, 1975.
9. **Мухтубаев А.Б.** Влияние поляризационных преобразований на сдвиг фазы Саньяка в волоконно-оптическом гироскопе: дис... канд. тех. наук. СПб., 2020. 199 с.
10. **Аксарин С.М.** Исследование поляризационных методов и технологий согласования волоконно-оптических и интегрально-оптических волноводов: диссертация к. ф.-м. н.: защищена 06.11.14; утв. 09.07.14 – СПб., 2014, 116 с.
11. **Mukhtubayev A.B., Aksarin S.M., Strigalev V.E.** Polarization extinction ratio of the polarization crosstalk caused by point pressure force in the polarization-maintaining fiber // Optical Fiber Technology - 2017, Vol. 38, pp. 119-122.
12. **Y. Namihira, M. Kudo, and Y. Mushiaka**. Effect of mechanical stress on the transmission characteristics of optical fibers // Trans. Inst. Electron. Commun. Eng. Japan. – 1977. – V. 60-C. – С. 107-115.

K.E. Kalugin, A.B. Mukhtubayev, I.K. Meshkovskiy (ITMO university, Saint-Petersburg). **Polarization extinction ratio in polarization maintaining fibers sealed with glass solder**

The paper considers the effect of sealing with glass solder a pair of optical polarization maintaining fibers with an elliptical stress cladding on the value of the polarization extinction ratio. A variant with the placement of non-working fibers in the sealing area to create the symmetry of induced mechanical stresses is proposed. An experimental study of the contribution of induced mechanical stresses on the value of the polarization extinction ratio has been performed. The effect of temperature on the coefficient of polarization extinction in the place of sealing of optical polarization maintaining fibers has been evaluated.

УДК 681.51

Н. С. КАРАНИН, О. С. ЮЛЬМЕТОВА
 (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЪЕМНОЙ СТРУКТУРЫ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО СЛОЯ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Рассмотрен процесс глубокого реактивно-ионного травления кремния для формирования объемной структуры чувствительного слоя микромеханического акселерометра. Предложен модернизированный Bosch-процесс глубокого реактивно-ионного травления для изготовления структуры чувствительного слоя с заданными геометрическими параметрами. Приведены результаты экспериментальных работ по выбору режима процесса. Показан профиль травления, полученный на сканирующем электронном микроскопе.

Введение. Развитие технологии изготовления различных микроэлектромеханических систем позволило разработать и создать класс микромеханических навигационных приборов [1], которые представлены системами из гироскопов и акселерометров [2, 3] с различными конструктивными вариантами исполнения. Микромеханические приборы навигации обладают рядом существенных преимуществ перед другими приборами в своем точностном классе [1]. Микромеханический акселерометр является многослойной структурой, в которой наиболее важным является изготовление чувствительного слоя с заданными геометрическими параметрами, влияющими на характеристики прибора.

Целью работы являлось формирование чувствительного слоя микромеханического акселерометра методом модернизированного процесса глубокого реактивно-ионного травления кремния. Для достижения цели было необходимо выбрать оптимальный процесс травления, позволяющий получить требуемую структуру, определить режим процесса и исследовать профиль травления чувствительного слоя микромеханического акселерометра.

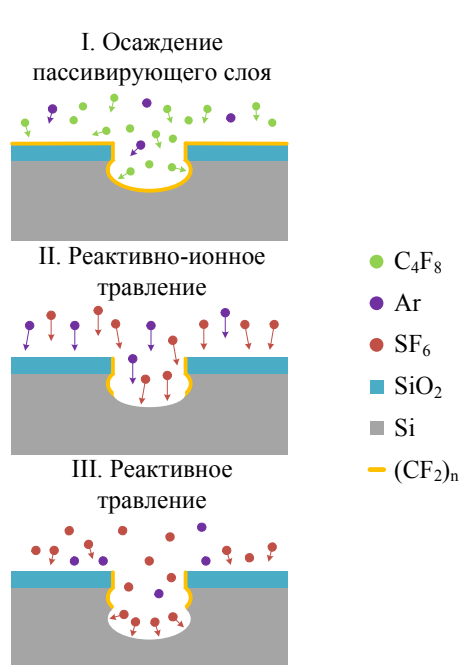


Рис. 1. Схема Bosch-процесса глубокого реактивно-ионного травления

Особенности процессов глубокого реактивно-ионного травления и выбор оптимального процесса.

Глубокое реактивно-ионное травление является одной из основных технологий удаления материала с поверхности обрабатываемой подложки для формирования структуры с необходимыми геометрическими параметрами. Глубокое реактивно-ионное травление представлено Bosch [4] и криогенным [5] процессами. Криогенный процесс связан с охлаждением подложек до низких температур с последующим изотропным травлением материала. Его основным недостатком является механическое повреждение масок на подложках при воздействии криогенных температур. Bosch-процесс является циклическим и состоит из нескольких стадий (рис. 1). Первой стадией является осаждение пассивирующего слоя на всю поверхность подложки. Пассивирующий слой является химически инертным при травлении во фторсодержащей среде. Второй стадией является реактивно-ионное травление, при котором за счет ионной бомбардировки удаляется пассивирующий слой со всех горизонтальных поверхностей, что позволяет анизотропно травить кремний.

Третья стадия – реактивное травление кремния без ионной бомбардировки.

Основными параметрами Bosch-процесса являются: давление внутри вакуумной камеры, мощность источника индуктивно-связанной плазмы (ИИСП), напряжение смещения, продолжительность шага в цикле, температура нагрева подложкодержателя, количество циклов и расход газов. Технологические параметры процесса влияют на такие характеристики глубокого реактивно-ионного травления, как селективность, скорость травления, вертикальность стенок и др. Скорость травления является одной из важнейших характеристик процесса, которая зависит как от скоростей химической реакции и распыления обрабатываемой подложки, так и от скорости массопереноса реагентов и продуктов реакций. Обычно скорость массопереноса значительно выше скоростей химической реакции и распыления, поэтому лимитирующим фактором скорости травления являются процессы, происходящие на поверхности обрабатываемого материала. Но при травлении отверстий с высоким аспектным соотношением (15:1 и выше) скорость массопереноса уменьшается по мере увеличения глубины травления. Лимитирующим фактором процесса становится скорость массопереноса. Таким образом, по мере увеличения глубины отверстий уменьшается их диаметр, что приводит к отклонению геометрических параметров чувствительного слоя от заданных величин. Для компенсации данного эффекта необходимо изменять технологические параметры во время процесса.

Выбор процесса глубокого реактивно-ионного травления, оптимального режима и исследование профиля чувствительного слоя.

В стандартном Bosch-процессе параметры являются фиксированными на протяжении всего процесса травления, вследствие чего для создания чувствительного слоя микромеханического акселерометра в рамках работ был выбран модернизированный Bosch-процесс, где параметры задаются линейно-изменяющимися [6], что позволяет получить вертикальность стенок на относительно большой глубине травления (порядка 60 мкм).

В качестве заготовок использовались кремниевые пластины с толщиной термического оксида кремния 2 мкм. На заготовках была выполнена фотолитография с рисунком чувствительного слоя для последующего предварительного реактивно-ионного травления оксида кремния для формирования оксидной маски. В таблице 1 приведены основные параметры процесса глубокого реактивно-ионного травления чувствительного слоя.

Таблица 1

Параметры глубокого реактивно-ионного травления модифицированным Bosch-процессом

Параметр	Стадия		
	Осаждение	Реактивно-ионное травление	Реактивное травление
Продолжительность, с	1	1 → 5	1
Давление, мТорр	30	35	20
Поток C ₄ F ₈ , см ³ /мин	150	-	-
Поток Ar, см ³ /мин	30	30	30
Поток SF ₆ , см ³ /мин	-	150	50
Мощность ИИСП, кВт	1,5	1,5	1,3
Напряжение смещения, В	10	400	10

С увеличением глубины скорость травления уменьшается, поэтому необходимо увеличивать продолжительность процесса от цикла к циклу. На рис. 2 представлено изображение профиля травления чувствительного слоя микромеханического акселерометра, который был получен на сканирующем электронном микроскопе, D1 - D11 – линейные размеры различных элементов профиля чувствительного слоя. Данный результат был получен линейным увеличением продолжительности стадии реактивно-ионного травления от 1 до 3 секунд в течение всего процесса.

Заключение. Рассмотрены различные методы глубокого реактивно-ионного травления и их особенности. Для формирования чувствительного слоя микромеханического акселерометра был выбран модифицированный Bosch-процесс. Приведены результаты экспериментально-исследовательских работ по определению режима процесса. Сформирован чувствительный слой микромеханического акселерометра на глубину 60 мкм с вертикальными стенками. Исследован профиль травления чувствительного слоя на сканирующем электронном микроскопе.

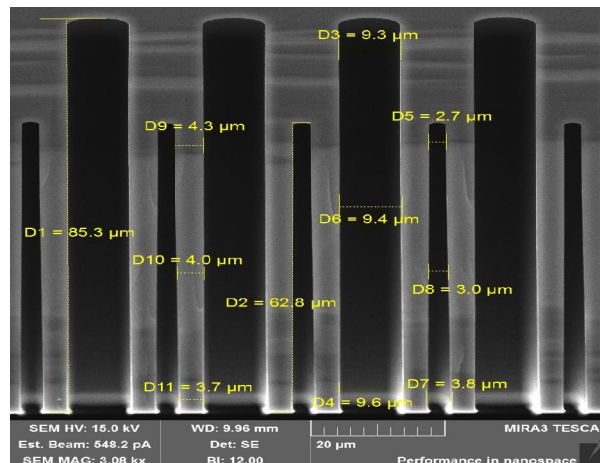


Рис. 2. Изображение профиля травления на сканирующем электронном микроскопе

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.В.** Перспективы развития гироскопии. Гироскопия и навигация, 2020. С. 310.
2. **Tkalich V.L., Labkovskaia R.I., Pirozhnikova O.I., Kalinkina M.E., Kozlov A.S.** Analysis of Errors in Micromechanical Devices. *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, 2018. P. 272-276.
3. **Liu Y., Chen L.** Application of accelerometers in vibration test of high voltage circuit breaker. *2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, 2015. PP. 1488-1491.
4. **Alper S.E., Aydemir A., Akin T.** Stepped-etching for preserving critical dimensions in through-wafer deep reactive ion etching of thick silicon. *TRANSDUCERS 2009 - 2009 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference*, 2009. P. 1110-1113.
5. **Miao H., Chen L., Mirzaeimoghri M., Kasica R., Wen H.** Cryogenic Etching of High Aspect Ratio 400-nm Pitch Silicon Gratings. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2016. P. 963-967.
6. **Tang Y., Sandoughsaz A., Owen K. J., Najafi K.** Ultra Deep Reactive Ion Etching of High Aspect-Ratio and Thick Silicon Using a Ramped-Parameter Process. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2018. P. 686-697.

N.S. Karanin, O. S. Yulmetova (Concern CSRI Electropribor, JSC, Saint-Petersburg)

Formation of the volume structure of the sensitive layer of a micromechanical accelerometer

The process of deep reactive-ion etching of silicon with the aim of forming a volume structure of the sensitive layer of a micromechanical accelerometer is considered. A modified Bosch-process of deep reactive-ion etching is proposed during manufacture the structure of a sensitive layer with specified geometric parameters. The results of experimental work of choosing the process mode and image of etching profile obtained with a scanning electron microscope are presented.

УДК 681.51

Г. М. ШУБИН, Д. В. САФРОНОВ
(СПБГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИЙ НАВИГАЦИОННЫХ СЕНСОРОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ ПРИ ПОМОЩИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Обсуждаются возможности изготовления чувствительных элементов микромеханических датчиков на поверхностных акустических волнах при помощи волоконного иттербиевого лазера. Проведена оценка геометрических и спектральных параметров полученных структур. Исследована принципиальная возможность использования ультрафиолетовых лазеров для создания датчиков на поверхностных акустических волнах.

Введение. На сегодняшний день микроэлектромеханические системы (МЭМС) применяются в очень широком спектре областей, начиная от космической промышленности и робототехники и заканчивая бытовой техникой и смартфонами. В то же время возрастают требования к измерительным и навигационным сенсорам (датчикам), особенно в таких ответственных областях, как медицина, оборонная промышленность, космическая промышленность и др. Наличие подвижных элементов: инерционных масс, упругих подвесов (торсионов) является значительным недостатком микромеханических датчиков, что в свою очередь накладывает ограничения на применение их в высокочастотных подвижных объектах. Такого недостатка лишены датчики на поверхностных акустических волнах (ПАВ) [1].

Существует ряд перспективных концепций такого рода датчиков, однако, топологии чувствительных элементов датчиков на ПАВ имеют достаточно сложную структуру, что, в свою очередь, затрудняет аналитическую оценку их точностных характеристик. Изготовление опытных образцов производится методом фотолитографии, являющимся нерентабельным в условиях единичного производства [2]. Подобная проблема решается внедрением метода лазерного формирования топологий чувствительных элементов датчиков, который имеет ряд преимуществ, таких как: сравнительно низкая стоимость, более быстрое нанесение структуры, возможность легко менять конфигурацию чувствительного элемента, а также возможность корректировать готовую структуру [3].

Целью работы являлась разработка метода формирования структур микромеханических датчиков на ПАВ с помощью лазерной абляции волоконным иттербиевым лазером, оценка геометрических параметров структур и спектральных характеристик датчиков, а также исследование возможности улучшения геометрии и спектральных характеристик структур при использовании ультрафиолетового лазера в качестве альтернативы волоконному лазеру.

Использование лазерного излучения для формирования топологий навигационных датчиков. Крайне важной задачей является повышение качества поверхностных структур чувствительных элементов навигационных датчиков на ПАВ. С помощью метода лазерной абляции на лазерной установке «МиниМаркер 2» было изготовлено несколько образцов чувствительных элементов датчиков. В качестве заготовок использовались подложки из пьезокварца с медным напылением толщиной 5 мкм. Далее производилась их обработка волоконным иттербиевым лазером с длиной волны 1,064 мкм. Параметры лазерной обработки подбирались с учетом их математических зависимостей от свойств материалов.

Мощность лазера для частного случая с прозрачной подложкой и длительностью импульса менее 100 мкс в конечном счёте рассчитывалась по выражению (1) и составила 10 Вт.

$$P = \frac{\rho \cdot C \cdot h \cdot T \cdot S}{A \cdot t}, \quad (1)$$

где: P – мощность лазера, T – температура пленки; ρ – плотность материала; C – теплоемкость; A – поглощательная способность; h – толщина пленки; t – длительность воздействия, S – площадь пятна лазерного луча.

Длительность импульса лазерной обработки рассчитывалась по выражению (2) и составила 14 нс. Частота следования импульса ν выбиралась с учетом длительности импульса и составила 20 кГц.

$$\tau = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{\rho_1 \cdot C_1}{\rho_2 \cdot C_2} \right)^2 \cdot \frac{h^2}{a^2}, \quad (2)$$

где: τ – длительность импульса лазерного излучения, ρ_1, ρ_2 – плотности материалов пленки и подложки; C_1, C_2 – теплоемкости материалов пленки и подложки, a – коэффициент температуропроводности.

Скорость лазерной обработки рассчитывалась по выражению (3):

$$\nu = \frac{2R - b}{\tau + t_n}, \quad (3)$$

где: ν – скорость лазерной обработки, R – радиус пятна лазерного луча, t_n – время пауз между импульсами, b – линейная величина перекрытия импульсов, зависящая от R и неровностей ширины элементов структуры.

Проводилось исследование геометрических параметров образцов методом лазерной абляции волоконным лазером при работе с толстыми пленочными покрытиями (порядка 5 мкм). Полученные образцы имеют расхождения геометрических размеров, что, в свою очередь, вызвано перераспределением тепла по поверхности образцов в процессе обработки, из-за чего ширина электродов встречно-штыревых преобразователей в структуре чувствительных элементов датчиков получилась меньше, чем расстояние между ними. Величина данных отклонений составляет порядка 5-8%, что является допустимым по техническим требованиям. Также из-за недостаточной адгезии покрытия к подложке на некоторых участках в процессе обработки произошло отслоение некоторых элементов структуры. Это позволяет предположить, что при толщине напыления в 5 мкм создание структуры ЧЭ на длинах волн менее 200-240 мкм является затруднительным из-за недостаточной воспроизводимости результатов. Переход к более тонким покрытиям < 5 мкм позволит повысить адгезию пленки и нивелировать связанные с ней дефекты структуры.

Также проводилось исследование спектральных характеристик образцов. Для образца №1 были получены следующие характеристики: длина волны $\lambda = 120$ мкм; частота $f = 29,86$ МГц; потери 40,268 дБ. Для образца №2: $\lambda = 240$ мкм; $f = 13,89$ МГц; потери 42,795 дБ. По сравнению с теоретическими расчётами, разность частот полученных образцов составила 3,5 МГц и 0,73 МГц, соответственно (13,5% и 5,5% отклонения), что характеризует достаточную точность метода лазерной обработки волоконным иттербиевым лазером. Для производства опытных образцов такие показатели считаются допустимыми, однако в дальнейшем планируется улучшение данных параметров путем более точного подбора режимов работы лазера, а также переходом к другим типам излучения.

Для создания медных тонкопленочных структур (< 5 мкм) на пьезокварце был рассмотрен метод обработки поверхности ультрафиолетовым (УФ) лазером. Лазерное излучение УФ-диапазона (355 нм) обладает высокой энергией квантов и меньшим диаметром пятна в области фокусировки за счет более короткой длины волны по сравнению с волоконными (1,064 мкм) и CO₂-лазерами (10,6 мкм). В свою очередь, это позволяет более эффективно нагревать металлические тонкопленочные структуры и воспроизводить структуру чувствительного элемента с большей точностью, снизив количество дефектов [5]. Помимо этого, плотность мощности УФ-лазеров достаточна для абляции тонких пленок порядка 1-3 мкм. Таким образом, использование УФ-излучения представляет особый интерес для производства навигационных датчиков на ПАВ и позволяет улучшить в несколько раз геометрические параметры и спектральные характеристики структур. Было установлено, что, в частности, для медной

пленки, использование УФ-лазера позволяет снизить коэффициент отражения в 9 раз по сравнению с волоконными и CO₂-лазерами.

Заключение. Разработан метод формирования структур микромеханических датчиков на ПАВ с помощью лазерной абляции волоконным иттербиевым лазером. Выбран оптимальный режим лазерной абляции. Проведена оценка геометрических и спектральных параметров образцов чувствительных элементов микромеханических датчиков на ПАВ, изготовленных методом лазерной абляции волоконным иттербиевым лазером, которая показала незначительное отклонение (5-8 %) геометрических размеров образцов от заданных значений, и отклонение 5,5 – 13,5 % от расчетных спектральных характеристик. Метод лазерной абляции волоконным иттербиевым лазером с длиной волны 1,064 мкм обладает преимуществами по сравнению с методом фотолитографии, поскольку позволяет значительно упростить процесс производства сложных топологий датчиков на ПАВ и минимизировать дефекты при изготовлении, однако имеет недостатки при абляции образцов с пленками порядка 5 мкм. Исследована возможность создания образцов с тонкопленочным покрытием с помощью УФ-лазера с длиной волны 355 нм, что позволяет минимизировать геометрические дефекты структур и улучшить спектральные характеристики микромеханических датчиков на ПАВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Д.П. Лукьянов и др.** Разработка и оптимизация схемы построения микроакселерометра на поверхностных акустических волнах // Гирскопия и навигация № 2, СПб, 2005, с.79–95;
2. **Сафронов Д.В.** Лазерное формирование структур навигационных сенсоров на поверхностных акустических волнах: автореф. дисс. канд. техн. наук / СПбГЭТУ «ЛЭТИ», СПб, 2018;
3. **Юльметова О.С., Щербак А.Г., Челпанов И.Б.** Специальные технологии изготовления прецизионных узлов и элементов гироскопических приборов. СПб: Университет ИТМО, 2017. 131 с.
4. **Послянова О.Н., Юльметова О.С., Щербак А.Г.** Исследование процесса лазерной обработки в гироскопостроении // Материалы XXI Конференции молодых ученых, ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2019.
5. **Ражев А.М.** Оптические технологии с использованием импульсных УФ-лазеров для микроэлектроники и медицины. Труды МНК «Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии». 2012: 1(5); 187–192.

Shubin G.M., Safronov D.V. (Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg). **Formation of topologies of navigation sensors on surface acoustic waves using laser radiation.**

The possibilities of manufacturing a sensitive element of a micromechanical sensors based on surface acoustic waves using the method of laser formation of structures using a fiber ytterbium laser are considered. The geometric and spectral parameters of the obtained structures were evaluated. The fundamental possibility of using ultraviolet lasers to create sensors based on surface acoustic waves is considered.

УДК 681.51

А. Д. КАЗАКОВА
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЪЮСТИРОВКИ УГЛОВЫХ ШКАЛ ИЗ МЕТАПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассмотрен принцип работы угловых шкал из наноструктурированных метаповерхностей. Проведен анализ влияния наклона шкал из наноструктурированных метаповерхностей на измерение угла поворота. Также рассмотрена предельная чувствительность к углу поворота при применении шкал из метаповерхностей.

Введение. Оптические датчики угла поворота (энкодеры) – устройства, которые используются для определения угла поворота, направления вращения и измерения скорости. Датчики угла поворота включают в себя угловую шкалу, которую обычно жестко закрепляют на позиционируемом объекте, и устройство, считывающее поворот угловой шкалы. В работах [1, 2] было предложено использовать метаповерхности в качестве угловых шкал, что позволяет снизить их габаритные размеры при сохранении высокой точности оптических датчиков. Известно, что точность датчиков угла поворота может быть существенно ограничена за счет разъюстировки (наклона) шкалы.

В работе оценивается предельная чувствительность датчиков угла поворота, основанных на шкалах из метаповерхностей, а также анализируется влияние разъюстировки шкалы на измерение угла поворота.

Принцип работы шкалы из наноструктурированной метаповерхности. Диэлектрическая метаповерхность с простейшей структурой представляет собой одномерную прямоугольную

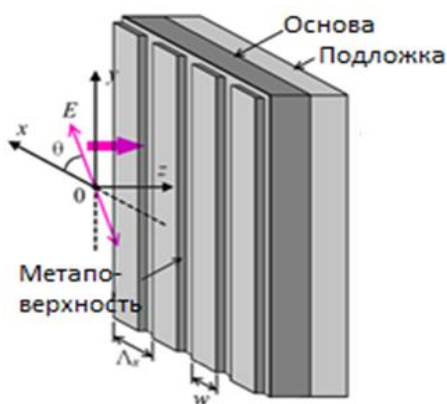


Рис. 1. Метаповерхность в виде диэлектрической одномерной прямоугольной субволновой решетки

субволновую решетку с шириной штрихов w и периодом их следования Λ_x вдоль оси Ox (рис. 1). Если на метаповерхность падает луч линейно поляризованного света с произвольным углом θ , его можно представить как сумму двух компонент $E \cdot \cos\theta$ и $E \cdot \sin\theta$, поляризованных вдоль осей Ox и Oy , соответственно. Компоненты $E \cdot \cos\theta$ и $E \cdot \sin\theta$ описывают поляризационные волны магнитного (ТМ) и электрического (ТЕ) типов, соответственно. В результате анизотропии показателя преломления ТМ и ТЕ компоненты возбуждают моды на разных участках спектра [3]. Общий коэффициент пропускания рассмотренной структуры определяется по формуле:

$$T(\lambda) = T_x(\lambda)\cos^2\theta + T_y(\lambda)\sin^2\theta, \quad (1),$$

где $T(\lambda)$ – общий коэффициент пропускания; $T_x(\lambda)$ – коэффициент пропускания для ТМ поляризации; $T_y(\lambda)$ – коэффициент пропускания для ТЕ поляризации.

Согласно выражению (1), на резонансных длинах волн коэффициент пропускания при повороте метаповерхности изменяется пропорционально $\sin^2\theta$. Это позволяет реализовать измерение угла поворота θ по изменению коэффициента пропускания (или коэффициента отражения) метаструктуры [1, 2].

Научный руководитель: к.т.н, доцент Шалымов Егор Вадимович

В случае, если метаповерхность разъюстирована и повернулась вокруг оси Oy на некоторый угол наклона α , то углы распространения дифракционных порядков в метаповерхности становятся различными, что приводит к расщеплению спектральных линий [4-6]. Соответственно, это приводит к изменению коэффициента пропускания, что вносит дополнительную систематическую погрешность при измерении угла поворота θ .

Предельная чувствительность шкал датчиков угла поворота. Под предельной чувствительностью будем понимать наименьшее изменение угла поворота, которое принципиально может быть измерено данным типом датчика на фоне шума:

$$\delta\theta = \sqrt{\frac{hf\mu}{2P_{in}\tau}}, \quad (2)$$

где h – постоянная Планка; f – частота излучения источника света; μ – квантовая эффективность фотоприемника; τ – время интегрирования сигнала с фотоприемника; P_{in} – оптическая мощность излучения, падающая на метаповерхность; $\delta\theta$ – предельная чувствительность.

Выражение (2) позволяет оценить предельную чувствительность к углу поворота при применении шкал из метаповерхностей. Например, при $f = 193$ ТГц, $\mu \approx 1$, $P_{in} = 1$ мВт и $\tau = 1$ мкс предельная чувствительность составит около $1,7''$. Несмотря на высокую предельную чувствительность, наклон шкалы может существенно ограничивать точность датчика.

Влияние угла наклона на спектральную характеристику метаповерхности. Для оценки влияния разъюстировок шкал из метаповерхности было выполнено моделирование их работы методом конечных элементов. Моделирование показало, что при использовании метаповерхностей эксцентриситет не оказывает влияние на измерение угла поворота. Далее моделировался поворот (наклон) метаповерхности на угол α вокруг оси Oy . При этом наблюдалось расщепление резонансной линии: на более низких длинах волн появлялась дополнительная спектральная линия, ширина и смещение которой росли с увеличением угла α , а спектральная линия на исходной длине волны с ростом α постепенно смещалась в область более высоких длин волн и сужается (рис. 2).

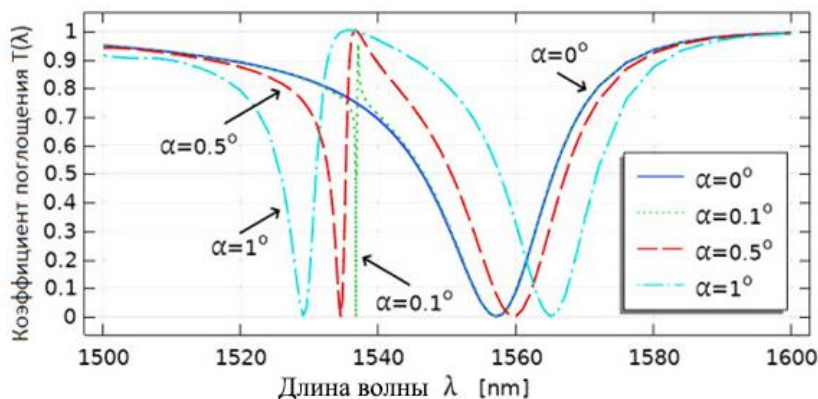


Рис. 2. Спектральная характеристика метаповерхности при повороте вокруг оси Oy

Стоит отметить, что если смещение резонансной линии превышает ее ширину, то измерение угла невозможно. К таким смещениям приводят только наклоны порядка нескольких градусов и более (рис. 3).

Данная проблема легко решается ведением конструкторского требования по углу наклона шкалы менее 1 градуса при сборке датчиков угла поворота. При небольшом (менее 1 градуса) угле наклона смещение спектральной линии не препятствует измерению угла поворота, но приводит к изменению величины коэффициента пропускания на рабочей длине волны, что воспринимается как систематическая погрешность. Например, при $\alpha = 0,5^\circ$ систематическая погрешность измерения угла поворота θ для моделируемой шкалы из метаповерхности составит около $2,4^\circ$. Моделирование показало, что систематическую погрешность можно уменьшить на порядок при использовании метаповерхностей с более широкими спектральными линиями. Также

ее можно исключить при калибровке датчика угла поворота. Наклон шкалы может меняться и в процессе эксплуатации прибора, что может привести к неучтенному при калибровке изменению угла $\alpha = 0,1^\circ$. При этом систематическая погрешность составит порядка $47''$.

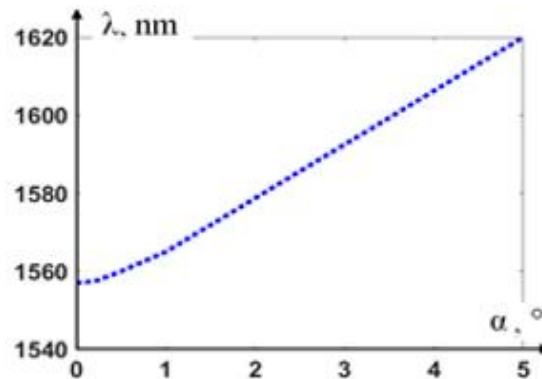


Рис.3. Смещение спектральной линии при повороте вокруг оси Ox ; λ – длина волны; α – угол наклона

При повороте (наклоне) метаповерхности вокруг оси Ox смещения спектральной линии будут на порядок меньше (см. рис. 2 и рис. 4). Изменение спектра обусловлено изменением длины пути, который свет проходит в волноведущем слое, что эквивалентно увеличению эффективной толщины волноведущего слоя. Возникающая в этом случае систематическая ошибка пренебрежимо мала (при $\alpha = 0,1^\circ$ меньше предельной чувствительности).

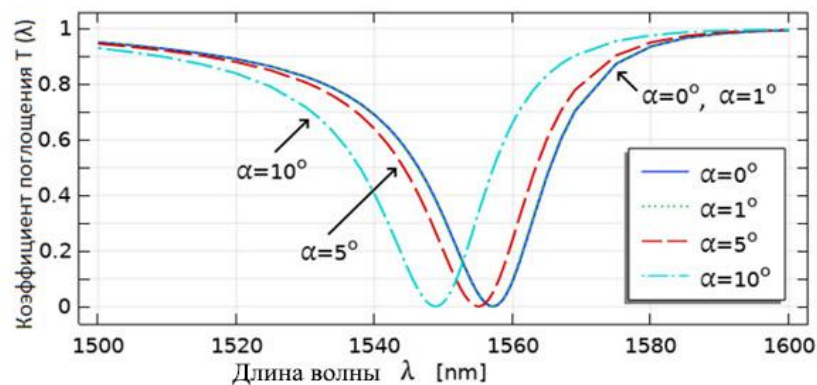


Рис.4. Спектральная характеристика метаповерхности при повороте вокруг оси Ox

Заключение. В работе рассмотрен принцип работы угловых шкал из наноструктурированных метаповерхностей. Установлено, что величина коэффициента пропускания зависит от угла поворота метаповерхности, что позволяет использовать их в качестве шкал датчиков угла поворота. Оценена предельная чувствительность, которая составила $1,7''$ и произведен анализ влияния наклона шкал на измерение угла. Выявлено, что при наклоне $0,5^\circ$ систематическая погрешность измерения угла поворота может достигать нескольких градусов. Она может быть уменьшена на порядок, при использовании метаповерхности с более широкими спектральными линиями, и исключена при калибровке датчика угла поворота.

ЛИТЕРАТУРА

1. E. A. Efremova, N. A. Nikolaeva, E. V. Shalymov, V. Shoev, V. Yu. Venediktov, A. V. Venediktova. The main ways of applying nanostructured metasurfaces in rotation angle sensors. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 11028, pp. 110280X. DOI: 10.1117/12.2520706. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11028/110280X/The-main-ways-of-applying-nanostructured-metasurfaces-in-rotation-angle/10.1117/12.2520706.short>

2. **M. Boronakhin, E. A. Efremova, E. V. Shalymov, R. V. Shalymov, V. Yu. Venediktov, A.V. Venediktova.** Measurement of rotation angle by response of nanostructured metasurfaces. *Proceedings of SPIE*, 2019, vol. 1119, pp. 111910J . DOI: 10.1117/12.2537754. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11191/111910J/Measurement-of-rotation-angle-by-response-of-nanostructured-metasurfaces/10.1117/12.2537754.short>
3. **Kang G., Tan Q., Jin G, Wang X.** Achromatic phase retarder applied to MWIR & LWIR dual-band. *Optics Express*, 2010, vol. 18, i. 2, pp. 1695-1703. DOI: 10.1364/OE.18.001695. Available at: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-18-2-1695&id=194975>
4. **Magnusson R., Khaleque T, Uddin M.J.** Guided-mode resonant polarization-controlled tunable color filters. *Optics Express*, 2014, vol. 22, i. 10, pp. 12307-12315. DOI: doi.org/10.1364/OE.22.012307. Available at: <https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-22-10-12307&id=286223>
5. **Magnusson R., Wang S.S.** Theory and applications of guided-mode resonance filters. *Applied Optics*, 1993, vol. 32, i. 14, pp. 2606-2613. DOI: 10.1364/AO.32.002606. Available at: <https://opg.optica.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-32-14-2606>
6. **Efremova E.A., Shalymov E.V., Venediktov V.Yu., Venediktova A.V., Zinchik A.A.** Application of metasurface to inclination angle measurement. *Proceedings of SPIE*, 2020, vol. 11554, pp. 115540I. DOI: 10.1117/12.2573682. Available at: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11554/115540I/Application-of-metasurface-to-inclination-angle-measurement/10.1117/12.2573682.short>

A. D. Kazakova (St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg) **Modeling the Adjustment of Angular Scales from Metasurfaces.**

The operation principle of angular scales consisting of nanostructured metasurfaces is considered. The analysis of the influence of the scale slope on the measurement of the rotation angle by the response of nanostructured metasurfaces is carried out. The rotation angle sensitivity limit when using metasurface scales is also considered.

УДК 531.383-1.537.8

М.А. ВЛАСОВА

(Университет ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

А.Н. ШЕВЧЕНКО

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ И МИКРОМЕХАНИКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ ЯЧЕЕК ПРЕЦИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ КВАНТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Проведён обзор и проанализированы возможности современных технологий изготовления газовых ячеек, их применения для создания миниатюрных гироскопов и магнитометров. Определены наиболее перспективные технологии для производства габаритных ячеек. Исследована гибридная технология изготовления газовых ячеек, приведены результаты экспериментальных испытаний изготовленного макетного образца ячейки.

Введение. Приборы квантовой электроники, принцип действия которых основан на взаимодействии света и специальным образом подготовленных атомов вещества, способны измерять различные физические величины, такие как время, индукция магнитного поля и параметры вращения [1-3]. Атомы рабочего вещества обычно находятся в газовой ячейке, к которой предъявляются строгие требования по прозрачности, немагнитности, герметичности, термостойкости. Для некоторых приборов, например ядерного магнитного гироскопа [4, 5], не менее важными параметрами являются форма, размеры ячейки и допуски на них [6].

Ячейки заполняются смесью газообразных веществ, в которую входят следующие компоненты: пары щелочного металла, благородный газ, буферный газ, антирелаксационное покрытие. Общее и парциальные давления газов в ячейке определяют параметры сигналов резонанса и должны соответствовать значениям, заданным в технических требованиях на ячейку. Особую сложность в процессе изготовления ячейки представляет процедура ее заправки щелочным металлом, которая включает в себя этапы получения металла в чистом виде, размещение его в ячейке и герметизацию ячейки. Все эти этапы должны проходить в инертной газовой среде, т.к. щелочные металлы легко окисляются атмосферным кислородом и парами воды [4, 6].

В настоящее время идет активное развитие миниатюрных квантовых датчиков, изготовленных с использованием технологий микромеханики и микроэлектроники (MEMS-технологий). В частности, были разработаны новые подходы, как к изготовлению корпусов газовых ячеек, так и к их заполнению.

В работе рассмотрены наиболее перспективные MEMS-технологии для изготовления газовых ячеек, проанализирована возможность их применения для производства габаритных ячеек (с линейным размером более 1 мм), используемых в прецизионных приборах квантовой электроники. Внутренний объём таких ячеек не превышает 10 см^3 . Кроме того, исследована гибридная технология изготовления газовых ячеек, приведены результаты экспериментальных испытаний изготовленного макетного образца ячейки.

Обзор MEMS-технологий изготовления газовых ячеек. Методы изготовления и заполнения ячеек, созданных на основе технологий микромеханики и микроэлектроники (MEMS-ячеек), основаны на трех основных принципах: испарение чистых жидких щелочных металлов, химическая реакция щелочных соединений и дозирование паров щелочи из твердотельных дозаторов [7].

Одной из технологий, основанных на принципе испарения чистых щелочных металлов, является технология испарения чистого цезия через гибридную трубку [8]. Напуск цезия осуществляется через соединительную трубку, присоединённую к вакуумной ячейке. После

¹Научный руководитель: к.т.н. Безмен Глеб Владимирович

заполнения трубку отпаивают от ячейки с помощью газовой горелки. Представленный метод обеспечивает превосходное качество заполнения ячейки (герметичность) и хорошо применим к изготовлению габаритных ячеек. Недостатком метода является сложность его освоения в массовом производстве и низкая воспроизводимость параметров ячеек ввиду наличия операций, выполняемых вручную.

Кроме того, возможно заполнение газовой ячейки методом химического обмена с образованием жидкого цезия в виде мелких капель снаружи преформы [9-11]. Окончательная инкапсуляция ячейки в таком случае производится с помощью процедуры низкотемпературной анодной пайки. Описанная технология не обеспечивает требуемого качества заполнения ячейки и имеет «среднюю» воспроизводимость в массовом производстве.

Другой технологией, основанной на принципе химических реакций, является технология распределения на кристалле и высокотемпературного анодного соединения [12, 13]. Напуск цезия выполняется после окончательной герметизации ячейки. Анодное соединение выполняется при оптимальных температурах, что устраняет проблемы постобработки, связанные с дегазацией. Указанный метод хорошо повторим в массовом производстве, обеспечивает требуемое качество заполнения. Есть возможность его применения для габаритных ячеек.

Также способом изготовления газовых ячеек является метод осаждения азида щёлочи и ультрафиолетовый фотолиз [14, 15]. Он заключается в том, что для создания слоя щелочного металла используется процесс физического осаждения или напуска водного раствора азид щелочного металла. Разложение соединения вызывается воздействием на инкапсулированные ячейки ультрафиолетового (УФ) излучения. Однако следует отметить, что метод не обеспечивает необходимые требования по качеству и плохо воспроизводим в массовом производстве.

Одним из способов дозирования щелочи из твердотельных дозаторов является технология пипетирования (напуска) чистого щелочного металла [16]. В ней производится прямое введение щелочного металла с помощью пипетки и окончательная герметизация низкотемпературным, долговечным анодным соединением. Такая технология отличается высоким качеством заполнения и воспроизводимостью.

Выбор технологии изготовления газовой ячейки и результаты испытаний. Проведя анализ перечисленных выше технологий, было установлено, что наиболее перспективной технологией для изготовления газовых ячеек является технология распределения на кристалле и высокотемпературного анодного соединения. Она обеспечивает наилучшие показатели по качеству заполнения ячейки рабочим веществом, а также применимости в массовом производстве. Рассматриваемый метод является весьма трудоемким, и для ускорения проведения лабораторных исследований макет ячейки для заполнения был изготовлен по гибридной технологии, совмещающей в себе технологию испарения чистого цезия и технологию химического обмена с образованием жидкого цезия (рис. 1).

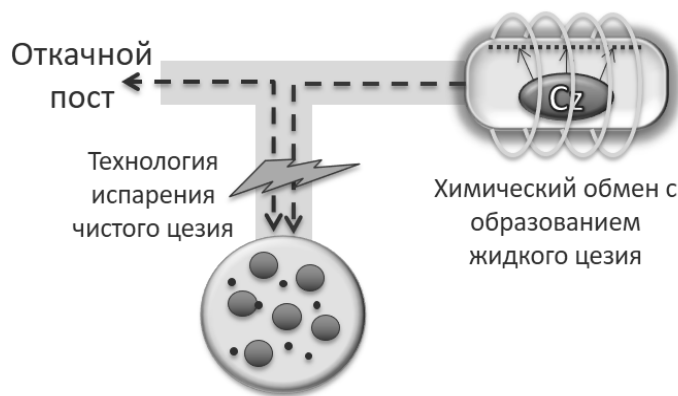


Рис. 1. Схематическое изображение гибридной технологии изготовления газовых ячеек

Процесс заполнения ячеек по предложенной технологии состоит из двух этапов. На первом производится высвобождение жидкого цезия из солей хлора в специальной капсуле под действием температуры 600-700 °С. На втором этапе производится перегонка образовавшегося жидкого цезия из капсулы в ячейку через присоединённую к ней трубку. После заполнения трубка отпаивается от ячейки и герметизируется под действием атмосферного давления.

Для проверки на наличие нарушений в технологическом процессе изготовления ячеек необходимо провести анализ линии поглощения щелочного металла путём проведения спектроскопического эксперимента [16]. Он позволяет определить давление буферного газа и количество загрязнений в объёме ячейки по ширине линии оптического резонанса. Если давление в ячейке отличается от номинального, график резонансного оптического поглощения будет либо слишком широким, либо слишком узким. Загрязнения только уширяют график.

Для проверки была использована ячейка, изготовленная по предложенной гибридной технологии. Проверяемую ячейку просвечивали лазером на длине волны лазерного излучения в соответствующем диапазоне. Длина волны лазерного излучения должна соответствовать энергетическим уровням атомов цезия. В ходе проверки была экспериментально определена линия резонансного оптического поглощения (рисунок 2).

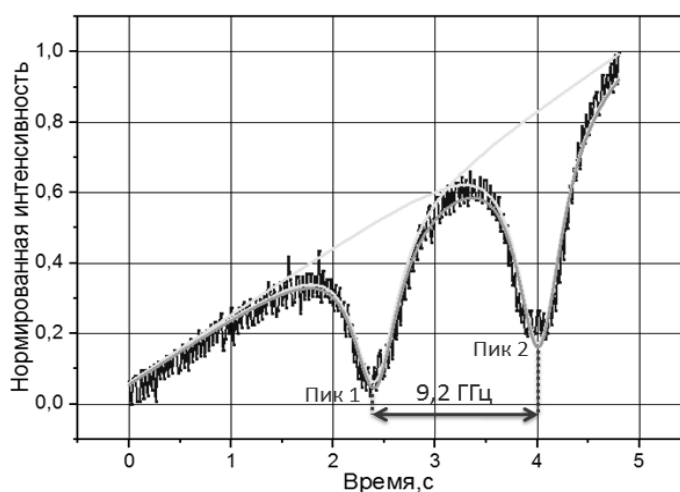


Рис. 2. Линия резонансного оптического поглощения ($U_{\text{осц}}$ – напряжение сигнала на осциллографе; t – время).

По полученному графику измерялось расстояние в секундах от нижней точки пика 1 до нижней точки пика 2, затем измерялась ширина пика 1 в секундах на уровне 0,707 от его нижней точки, после, исходя из того, что расстояние между расщепленными состояниями основного подуровня цезия имеет значение 9,2 ГГц, составлена пропорция для поиска расчетной ширины резонанса. Давление азота вычислялось согласно [17].

В ходе эксперимента выявлено, что экспериментальная ячейка удовлетворяет требованиям отсутствия примесей. Давление буферного газа в ней соответствует заявленному в технических требованиях (100 торр) с допустимым отклонением 10%.

Заключение. Проведён обзор MEMS-технологий для изготовления газовых ячеек, определены и проанализированы наиболее перспективные из них, оценена возможность их применимости для создания миниатюрных квантовых датчиков. Наиболее перспективной технологией для внедрения в массовое производство, согласно проведенному анализу, является технология распределения на кристалле и высокотемпературного анодного соединения.

Предложена и исследована гибридная технология изготовления ячеек, которая не требует больших финансовых затрат на этапе подготовки производства. В лабораторных условиях изготовлена габаритная ячейка с линейным размером более 1 мм и внутренним объемом не более 10 см³. Приведены результаты испытаний, в частности, экспериментального определения линии резонансного оптического поглощения в изготовленном макете ячейки. Дальнейшие исследования будут направлены на освоение промышленной технологии создания ячеек для массового производства квантовых датчиков перспективных робототехнических систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вершовский А. К. и др.** Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики //Гироскопия и навигация. – 2018. – Т. 26. – №. 1. – С. 100.
2. **Kobtsev S. et al.** CPT atomic clock with cold-technology-based vapour cell //Optics & Laser Technology. – 2019. – Т. 119. – С. 105634.
3. **Голев И. М., Никитина Е. А., Заенцева Т. И.** Магнитометрические датчики для систем навигации //Датчики и системы. – 2019. – №. 9. – С. 22-27
4. **Вершовский А. К., Шевченко А. Н.** Ядерный магнитный гироскоп: принцип действия, история, перспективы //Навигация и управление движением. – 2015. – С. 19-28.
5. **Безмен Г. В. и др.** Система двухчастотной генерации в схеме датчика угловой скорости //Гироскопия и навигация. – 2020. – Т. 28. – №. 1. – С. 19-30.
6. **Власова М. А., Шевченко А. Н.** Разработка требований к конструкции газовой ячейки ядерного магнитного гироскопа //Навигация и управление движением. – 2021. – С. 199-201.
7. **Knappkiewicz P.** Technological assessment of MEMS alkali vapor cells for atomic references //Micromachines. – 2018. – Т. 10. – №. 1. – С. 25.
8. **Lutwak, R.; Emmons, D.; English, T.; Riley, W.; Duwel, A.; Varghese, M.; Serkland, D.K.; Peake, G.M.** The chip-scale atomic clock-recent development progress //In Proceedings of the 35th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, San Diego, CA, USA, 2–4 December 2003; pp. 467–478.
9. **Knapp, S.; Schwindt, P.D.D.; Gerginov, V.; Shah, V.; Hollberg, L.; Kitching, J.; Liew, L.; Moreland, J.** Microfabricated atomic clocks at NIST. In Proceedings of the 36th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, Washington, DC, USA, 7–9 December 2004; pp. 355–368. 55.
10. **Eklund, E.J.; Shkel, A.M.; Knapp, S.; Donley, E.; Kitching, J.** Glass-blown spherical microcells for chip-scale atomic devices. Sens. Actuators A 2008, 143, 175–180. [CrossRef] 56. Noor, R.M.;
11. **Gundeti, V.; Shkel, A.M.** A status on components development for folded micro NMR gyro. In Proceeding of the 2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), Kauai, HI, USA, 28–30 March 2017; pp. 156–159.
12. **Dziuban, J.; Gorecki, C.; Giordano, V.; Nieradko, L.; Maillotte, H.; Moraja, M.** Procédé de Fabrication d'une Cellule à gaz Active Pour L'horloge Atomique à gaz Ainsi Obtenue. French Patent 06/09089, 17 Octobre 2006.
13. **Knappkiewicz, P.; Dziuban, J.; Walczak, R.; Mauri, L.; Dziuban, P.; Gorecki, C.** MEMS caesium vapour cell for European micro-atomic-clock. Procedia Eng. 2010, 5, 721–724. [CrossRef]
14. **Woetzel, S.; Kessler, E.; Diegel, M.; Schultze, V.; Meyer, H.G.** Low-temperature anodic bonding using thin films of lithium-niobate-phosphate glass. J. Micromech. Microeng. 2014, 24, 095001. [CrossRef]
15. **Woetzel, S.; Schultze, V.; Jsselsteijn, R.I.; Schulz, T.; Anders, S.; Stolz, R.; Meyer, H.-G.** Microfabricated atomic vapor cell arrays for magnetic field measurements. Rev. Sci. Instrum. 2011, 82, 033111. [CrossRef] [PubMed]
16. **Liew, L.; Knapp, S.; Moreland, J.; Robinson, H.; Hollberg, L.; Kitching, J.** Microfabricated alkali atom vapor cells. Appl. Phys. Lett. 2004, 84, 2694–2696. [CrossRef]
17. **Greg A. Pitz, Douglas E. Wertepny, and Glen P. Perram** Pressure broadening and shift of the cesium D1 transition by the noble gases and N₂, H₂, HD, D₂, CH₄, C₂H₆, CF₄, and 3He. //Phys. Rev A 80, 062718 (2009)

M.A. Vlasova (ITMO University, St. Petersburg), A.N. Shevchenko (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)
Prospects for the application of MEMS-technologies for the manufacture of gas cells of precision devices of quantum electronics

The paper provides an overview of modern technologies for the manufacture of gas cells, as well as a study of the applicability of these technologies for the creation of miniature gyroscopes and magnetometers. Based on the analysis of technologies, the most promising ones for the production of dimensional cells have been identified. The hybrid technology of manufacturing gas cells is explored, the results of experimental tests of the manufactured sample of the cell are presented.

УДК 681.51

О. Ю. ЧЕРНЯЕВА, А. Н. НИКОНОВ
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ НА БАЗЕ СИМУЛЯТОРА ПРОМЫШЛЕННОГО ЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЛЕРА

Рассмотрена задача создания компьютерной модели автоматизированной системы управления технологическим процессом с целью отладки используемых программных средств. Представлена модель основных процессов и алгоритмов регулирования производственного объекта. Модель системы автоматизации реализована с использованием пакета Matlab, симулятора промышленного контроллера и программы визуализации.

Введение. Одним из вариантов модернизации существующих предприятий выступает автоматизация отдельных производственных линий, проявляющих сложную динамику. Это позволяет повышать качество выпускаемой продукции и снижать затраты за счет формализации технологического процесса и повышения прозрачности принимаемых решений. При этом при разработке новых автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) необходимо гарантировать обеспечение существующих и планируемых показателей качества. Процесс отладки и предъявления результатов работы системы АСУТП может быть значительно усовершенствован за счет использования компьютерных моделей, так как становится возможным многократное воспроизведение сценариев использования без каких-либо материальных затрат, а также исключение рисков повреждения оборудования из-за неправильной работы алгоритмов и технических средств в процессе отладки.

В работе рассматриваются этапы построения компьютерной модели АСУТП на примере кислования полотна в процессе беления ткани.

Этапы разработки компьютерной модели. Создание компьютерной модели АСУТП состоит из трех основных этапов. Первым из них является изучение конкретного производственного процесса и основных принципов его функционирования. Вторым этапом можно считать моделирование основных переходных процессов, имеющих в системе. Третий этап – это интеграция технических средств системы управления и компьютерной модели процесса.

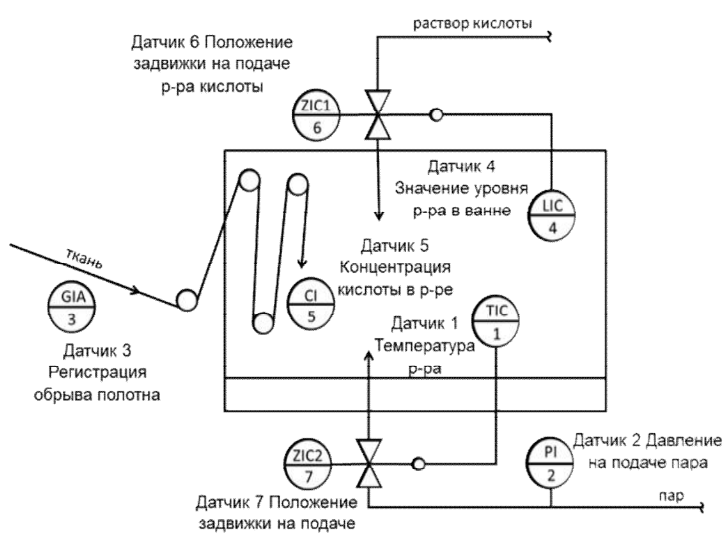


Рис. 1. Схема пропиточной ванны

Описание технологического процесса.

Кислование (кисловка) ткани представляет собой операцию в технологии беления хлопчатобумажных тканей при щелочно-перекисном методе отбеливания и относится к категории мокрой отделки, когда обработка ткани осуществляется с использованием растворов химических реактивов [1].

Для осуществления процесса кислования, как правило, используются пропиточные ванны (рис. 1.). Подача раствора серной кислоты в ванну осуществляется с помощью задвижки. Ванна оборудована двойным дном, которое предназначено для подогрева раствора кислоты путем подачи глухого пара с использованием задвижки [2]. При подогреве глухим паром нагреваемый раствор и подаваемый пар не смешиваются [3]. Ткань подается в ванну врасправку, что означает необхо-

го пара с использованием задвижки [2]. При подогреве глухим паром нагреваемый раствор и подаваемый пар не смешиваются [3]. Ткань подается в ванну врасправку, что означает необхо-

димось соблюдения требований по натяжению ткани для избежания необратимой деформации волокон полотна или его обрыва.

Моделирование контуров регулирования. Моделирование работы контуров регулирования осуществлялось помощью среды Simulink программного пакета Matlab. В рассматриваемом объекте управления существует два контура регулирования. Первый контур отвечает за регулирование уровня кислотного раствора в ванне с помощью задвижки на подаче кислоты, датчика уровня (датчик 4, Рис. 1) и датчика положения задвижки (датчик 6, Рис. 1). Второй контур отвечает за регулирование температуры раствора с помощью задвижки на подаче пара, датчика положения задвижки (датчик 7, Рис. 1) и датчика температуры (датчик 2, Рис. 1). Оба контура представляют собой цепочку последовательно соединенных интегрирующих звеньев. Разомкнутая структурная схема контура регулирования уровня кислоты представлена на Рис. 2.

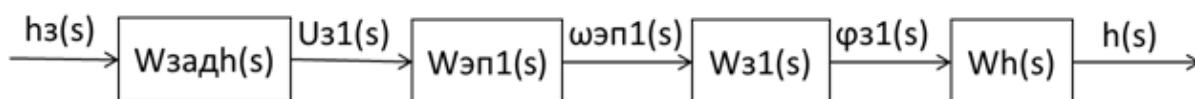


Рис. 2. Структурная схема контура регулирования уровня раствора в ванне.

h_z – заданное оператором значение уровня раствора; $W_{задh}$ – передаточная функция (ПФ) цифро-аналогового преобразователя (ЦАП); $U_{з1}$ – значение напряжения, поступающее на вход электропривода; $\omega_{эп1}$ – частота вращения электропривода; $W_{з1}$ – ПФ задвижки на подаче раствора кислоты; $\phi_{з1}$ – угол поворота задвижки; W_h – ПФ пропиточной ванны; h – уровень раствора в ванне.

Разомкнутая схема контура регулирования температуры раствора в ванне во многом аналогична (Рис 3).

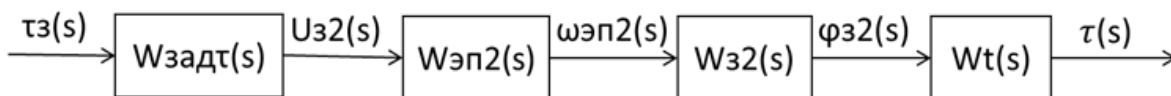


Рис. 3. Структурная схема контура регулирования температуры раствора в ванне

τ_z – заданное оператором значение температуры раствора; $W_{задт}$ – ПФ ЦАП; $U_{з2}$ – значение напряжения, поступающее на вход электропривода; $\omega_{эп2}$ – частота вращения электропривода; $W_{з2}$ – ПФ задвижки на подаче пара; $\phi_{з2}$ – угол поворота задвижки; W_t – ПФ пропиточной ванны; τ – уровень раствора в ванне

Переходные процессы работы обоих контуров после подбора значений коэффициентов регулирования с помощью инструмента Sisotool являются сходящимися и не имеют перерегулирования. Заполнение ванны на 95% до заданного уровня раствора кислоты происходит примерно за 21 секунду. Нагрев раствора на 95% до заданного уровня раствора кислоты происходит примерно за 18 секунд.

Разработка модели АСУТП. Проектирование АСУТП осуществлялось с использованием программного обеспечения Simatic Step 7 версии 5.5. В качестве контроллера в системе использовался центральный процессор CPU 314C-2 PN/DP. Имитация работы контроллера производилась в пакете PLCSim.

В системе были сформированы аналоговые и дискретные входы/выходы системы, стандартные режимы работ («Стоп», «Работа», «Авария») и режимы управления (автоматическое управление, дистанционное управление и местное управление). Также предусматривается система аварийной и предупредительной сигнализации и обычные сообщения о состоянии системы и стандартных изменений в ней.

Заключение. Рассмотрены этапы разработки модели АСУ ТП на базе симулятора промышленного логического контроллера. Проанализирован принцип работы производственного объекта, проведено моделирование основных переходных процессов, а также разработана система визуализации (создание динамической мнемосхемы) для возможности отображения работы производственного объекта на экране оператора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бельцов В.М.** Оборудование текстильных отделочных предприятий: Учебник для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. ПГУТД. СПб: СПбГУТД, 2000. 568 с.
2. **Ерофеева Е.В.** Автоматизированное проектирование систем и средств управления: метод. указания к выполнению самостоятельной работы для студентов специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т., 2009. 40 с.
3. **Сажин Б.С., Реутский В.А.** Сушка и промывка текстильных материалов: теория, расчет процессов. М: Лег-промбытгиздат, 1990. 224 с.

O.Y.Cherniaeva, A.N.Nikonov (Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg). **Computer simulation of an automated process control system based on a simulator of an industrial logic controller**

The report reviews the problem of creating a computer model for industrial process automation systems debugging. A model of the main processes and algorithms of regulation of an industrial object is presented. Automation system is modeled with the use of Matlab software, industrial controller simulation and visualisation program.

СЕКЦИЯ 4. ОБРАБОТКА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

УДК 629.12.014

Д.В.АНТОНОВ

(Университет ИТМО, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург),

И.В.СЕМЕНОВ

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ВЫБОР КРИТЕРИЯ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ УГЛОМ НАКЛОНА ОПТИЧЕСКОЙ ГЛИССАДЫ

Описывается задача управления углом наклона и стабилизации оптической глиссады. Приводится закон управления углом наклона оптической глиссады, использующий информацию о текущей качке, вертикальных перемещениях, и прогнозе этих величин на заданный интервал времени. Предлагается критерий для решения задачи управления углом наклона оптической глиссады, учитывающий ограничение, вводимое для приращения ошибки управления, обусловленной ошибками прогноза качки и вертикальных перемещений.

Введение. Известно, что наиболее сложным этапом полета морской авиации является посадка самолета на короткую качающуюся палубу корабля [1]. Для обеспечения помощи пилоту в построении траектории движения самолета на заключительном этапе захода на посадку используется набор различных инструментальных средств обеспечения посадки, таких как радиолокационная станция, морской телевизионный комплекс и оптическая система посадки (ОСП). ОСП это система, в которой оптический блок, установленный в карданов подвес центрального прибора, обеспечивает формирование разнесенных в пространстве световых секторов красного, желтого и зеленого цветов. Узкий (10 угл.мин) световой луч центрального зеленого сектора определяет оптическую глиссаду (ОГ). Пилот, заходя на посадку, следует световым сигналам, получаемым от ОСП, и контролирует угол наклона действительной глиссады посадки самолета относительно посадочной палубы по базовым огням, жестко связанным с палубой и повернутым на заданный угол наклона относительно нее. Очевидно, что для обеспечения пилота информацией в условиях качки необходимо управление углом наклона ОГ.

В последнее время усилился интерес к изучению и повышению точностных характеристик систем управления углом наклона ОГ [2-7]. Так, в [2, 5] описываются алгоритмы вычисления угла наклона ОГ, которые используются в системах стабилизации ОГ. Работы [3, 4] в большей мере нацелены на рассмотрение принципов построения ОСП. В [6, 7] исследуются разброс действительных точек касания палубы гаком самолета (тормозной крюк, предназначенный для захвата аэрофинишера и остановки самолета) относительно заданной точки в двух направлениях при использовании предлагаемых авторами алгоритмов управления. Однако в этих работах приводятся только экспериментальные результаты, либо полученные с помощью моделирования этих систем на специальных тренажерах. Авторы настоящей работы выбирают и обосновывают критерий для решения задачи управления углом наклона ОГ в аналитической форме, а также описывают погрешности работы системы управления и стабилизации угла наклона ОГ.

Постановка задачи. Финальной фазой посадки самолета на корабль является касание гака самолета палубы и последующий зацеп за металлический трос, который называется аэрофинишером [1]. Точка касания гака определяется проектантом корабля и называется расчетной точкой касания (РТК). Угол наклона ОГ α_{r0} относительно палубы, под которым самолет должен заходить на посадку зависит от модели самолета и как правило задается руководителем посадки, далее этот угол будем называть - заданный угол наклона ОГ. Однако в

условиях качки установка ОГ относительно палубы на заданный угол не целесообразна, поэтому осуществляется стабилизация ОГ относительно плоскости горизонта - так называемая пространственная стабилизация.

При стабилизации угла наклона ОГ относительно плоскости горизонта из-за наклона палубы, вызванного качкой, а, как следствие, и из-за отличий заданного угла наклона ОГ от действительного, действительная точка касания (ДТК) не будет совпадать с РТК по оси посадочного участка в плоскости палубы, см. рис.1. Здесь указан суммарный угол наклона палубы в плоскости горизонта при качке, определяемый как:

$$\psi_{\Sigma}(t) = \Psi(t)\cos(\gamma) + \Theta(t)\sin(\gamma), \quad (1)$$

где $\Psi(t)$, $\Theta(t)$ - углы килевой и бортовой качек, получаемые от навигационного комплекса (НК); γ - угол поворота посадочного участка относительно диаметральной плоскости корабля, заданный в плоскости палубы.

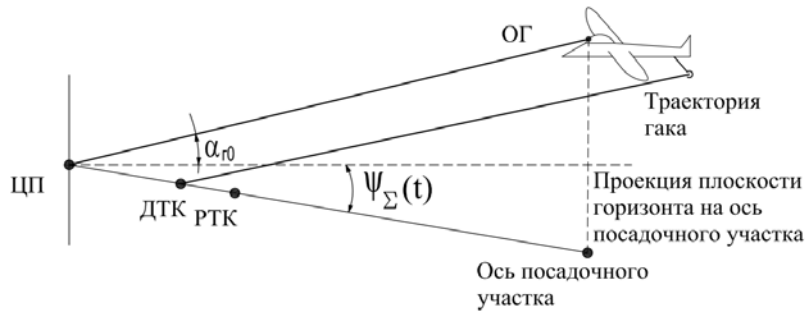


Рис. 1 Случай стабилизации угла наклона ОГ относительно плоскости горизонта при наклоне палубы α_{r0} - заданный угол наклона ОГ относительно палубы; $\psi_{\Sigma}(t)$ - суммарный угол наклона палубы.

Из-за наклона палубы и отстояния центрального прибора (ЦП) ОСП от центра качания корабля и в силу наличия орбитального движения [8] возникают вертикальные перемещения ЦП, которые также необходимо учитывать при управлении лучом ОГ, поскольку они приводят к отличию ДТК от РТК, см.(рис.2). Суммарные вертикальные перемещения ЦП в вертикальной плоскости можно представить, как:

$$h(t) = h_o(t) + h_k(t), \quad (2)$$

где $h_o(t)$ - орбитальные перемещения корабля;

$h_k(t) = \sin(\Psi(t))r + \sin(\Theta(t))l$ - вертикальные перемещения ЦП, вызванные качкой с учетом его отстояния от центра качания О, вычисляемые с учетом проекций: r – проекция отстояния центрального прибора ОСП от центра качания на плоскость, перпендикулярную диаметральной плоскости корабля и l – проекция отстояния центрального прибора ОСП от центра качания на диаметральной плоскость корабля.

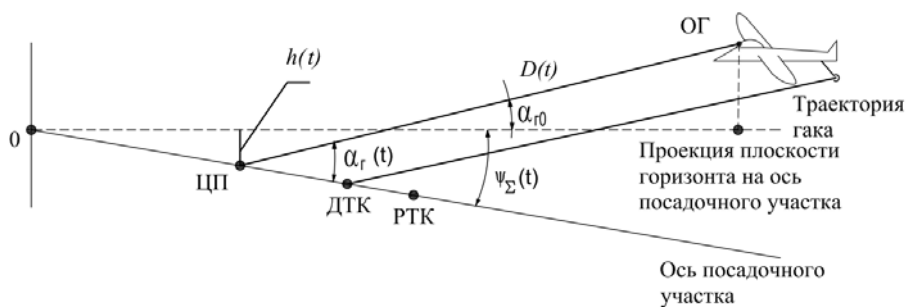


Рис. 2 Случай стабилизации угла наклона ОГ относительно плоскости горизонта при наличии отстоянии и вертикальных перемещения ЦП, $D(t)$ - дистанция от ЦП до самолета в направлении ОГ, $h(t)$ - суммарное значение вертикальных перемещений ЦП.

Из рис.1 и рис.2 видно, что при стабилизации ОГ относительно плоскости горизонта изменяется угол наклона ОГ относительно палубы, что может привести к возникновению аварийной ситуации в момент посадки. Например, при угле наклона глиссады относительно палубы, существенно превышающим заданный руководителем посадки угол наклона для конкретной модели самолета, вертикальная скорость может существенно превысить допустимую, что приведет к поломке шасси, а также увеличению натяжения тросов аэрофинишеров. При малом угле наклона глиссады относительно палубы, расстояние между гаком самолета и кормой корабля станет критически малым и появляется опасность зацепа за корму.

Из этого следует, что для обеспечения безопасной посадки самолета необходимо установить такой угол глиссады относительно палубы, чтобы минимизировать разброс ДТК относительно РТК. По величине этого отстояния будем определять безопасность посадки. Далее рассмотрим подробно предлагаемый алгоритм управления углом наклона ОГ и критерий качества его работы.

Алгоритм работы системы управления углом наклона ОГ. На сегодняшний день для управления углом наклона ОГ $\alpha_{\Gamma}(t)$ используется алгоритм, осуществляющий пространственную стабилизацию относительно плоскости горизонта и учитывающий при этом только угловую качку [2]. В этом случае угол наклона ОГ относительно плоскости палубы в момент времени t можно рассчитать с помощью следующего соотношения:

$$\alpha_{\Gamma}(t) = \alpha_{\Gamma 0} + \psi_{\Sigma}(t). \quad (3)$$

где $\alpha_{\Gamma 0}$ - заданный угол наклона ОГ.

В (3) и далее, положительными углами качки считается дифферент на корму и на правый борт [9].

В работе [5] приводится закон управления углом наклона ОГ для модернизированного алгоритма системы стабилизации с учетом компенсации текущих вертикальных перемещений $h(t)$. В этом случае относительно плоскости палубы ОГ будет установлена на угол:

$$\alpha_{\Gamma}(t) = \alpha_{\Gamma 0} + \psi_{\Sigma}(t) + \Delta\alpha_{\Gamma 0}(t), \quad (4)$$

где $\Delta\alpha_{\Gamma 0}(t)$ - поправка угла наклона ОГ, учитывающая вертикальные перемещения [5]:

$$\Delta\alpha_{\Gamma 0}(t) = \arctg\left(\sin(\alpha_{\Gamma 0}) + \frac{h(t)}{D(t)}\right) - \alpha_{\Gamma 0}. \quad (5)$$

Очевидно, что в случае наличия качки и идеальной стабилизации относительно плоскости горизонта по закону (4) реальный угол наклона ОГ будет ещё больше отличаться от заданного угла наклона ОГ. Это, в свою очередь приведет к разбросу ДТК от РТК. Для уменьшения возможных отличий ДТК от РТК во избежание появления аварийных ситуаций и увеличения общей безопасности посадки в [2] предложено использовать значение прогноза угла качки на момент касания палубы корабля гаком самолета. Таким образом, закон управления углом наклона ОГ относительно плоскости палубы с учетом парирования вертикальных перемещений можно записать в виде:

$$\alpha_{\Gamma}(t, \tau) = (\alpha_{\Gamma 0} - \psi_{\Sigma}(t + \tau)) + \psi_{\Sigma}(t) + \Delta\alpha_{\Gamma 0}(t, \tau), \quad (6)$$

где $\psi_{\Sigma}(t + \tau)$ - значение суммарного угла качки в момент времени $t + \tau$;

$\Delta\alpha_{\Gamma 0}(t, \tau)$ - поправка угла наклона ОГ, учитывающая значение вертикальных перемещений в момент времени τ :

$$\Delta\alpha_{\Gamma 0}(t, \tau) = \arctg\left(\sin(\alpha_{\Gamma 0}) + \frac{h(t) - h(t + \tau)}{D(t)}\right) - \alpha_{\Gamma 0}. \quad (7)$$

В (7) $h(t + \tau) = h_o(t + \tau) + h_k(t + \tau)$ - значение суммарных вертикальных перемещений в момент времени $t + \tau$.

Ясно, что для реальной системы с учетом погрешностей измерений угла качки и ошибок прогноза выражение (6) следует записать как:

$$\hat{\alpha}_r(t, \tau) = (\alpha_{r0} - \hat{\psi}_\Sigma(t + \tau)) + \tilde{\psi}_\Sigma(t) + \Delta\hat{\alpha}_{r0}(t, \tau), \quad (8)$$

где $\hat{\psi}_\Sigma(t + \tau)$ - прогноз суммарного угла качки в момент времени $t + \tau$;

$\tilde{\psi}_\Sigma(t)$ - измеренное значение суммарного угла качки в момент времени t ;

$\Delta\hat{\alpha}_{r0}(t, \tau)$ - оценка поправки угла наклона ОГ, учитывающая значение прогноза вертикальных перемещений в момент времени τ согласно (7).

Используя полученные выражения, можно ввести ошибку угла наклона ОГ в виде разности (8) и (6):

$$\varepsilon_{\alpha_r}(t, \tau) = \hat{\alpha}_r(t, \tau) - \alpha_r(t, \tau). \quad (9)$$

В то же время в самой ошибке угла наклона ОГ можно выделить две составляющие:

$$\varepsilon_{\alpha_r}(t, \tau) = \varepsilon_{гс}(t) + \varepsilon_{п}(t, \tau), \quad (10)$$

где $\varepsilon_{гс}(t)$ – ошибка работы системы стабилизации ОСП;

$\varepsilon_{п}(t, \tau)$ – ошибка прогноза угла качки и вертикальных перемещений.

Далее рассмотрим влияние составляющих ошибки угла наклона ОГ (10) на величину отклонения ДТК от РТК более детально.

Критерий при решении задачи управления. Введем величину, определяющую отличия ДТК от РТК в направлении оси посадочного участка, в виде

$$\begin{aligned} \Delta y &= y_{ДТК} - y_{РТК} = \frac{h_{гг}}{\operatorname{tg}(\hat{\alpha}_r(t, \tau))} - \frac{h_{гг}}{\operatorname{tg}(\alpha_r(t, \tau))} = \\ &= y_{РТК} \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{tg}(\alpha_r(t, \tau))(1 - \operatorname{tg}(\alpha_r(t, \tau))\operatorname{tg}(\varepsilon_{\alpha_r}(t, \tau)))}{\operatorname{tg}(\alpha_r(t, \tau)) + \operatorname{tg}(\varepsilon_{\alpha_r}(t, \tau))} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

где $y_{ДТК}$ - значение расстояния от центрального прибора ОСП до ДТК в плоскости палубы; $y_{РТК}$ - значение расстояния от центрального прибора ОСП до РТК; $h_{гг}$ - значение вертикального расстояния глаз-газ, в плоскости, перпендикулярной плоскости палубы, зависящее от модели самолета.

Полагая процесс качки случайным, будем также считать случайными и ошибки системы управления. Введем критерий, количественно характеризующий возможные значения величины отстояния ДТК от РТК:

$$J = \sqrt{M\{(\Delta y)^2\}}, \quad (12)$$

где M - математическое ожидание.

Для уменьшения возможных отличий ДТК от РТК необходимо минимизировать ошибки прогноза и системы стабилизации (10). Алгоритмы прогноза качки, возможные к применению в системе управления, проанализированы в серии работ [10, 11]. В этих работах показано, что при известных параметрах качки все алгоритмы выходят на уровень среднеквадратической величины качки, за время, сопоставимое с половиной преобладающего периода качки T_0 . Таким образом, необходимо иметь в виду, что приемлемые точности прогноза могут быть достигнуты лишь на интервалах, заметно меньших величины $T_0/2$.

Задача уменьшения ошибки системы стабилизации рассмотрена в [5], и заключается в синтезе нового регулятора системы стабилизации, учитывающего суммирование информации от НК и волоконно-оптического гироскопа (ВОГ). Тем не менее, опыт проектирования

оптических систем и предварительная оценка ошибок системы стабилизации показывают, что эта ошибка существенно меньше ошибки, вызванной неточностью прогноза угла качки.

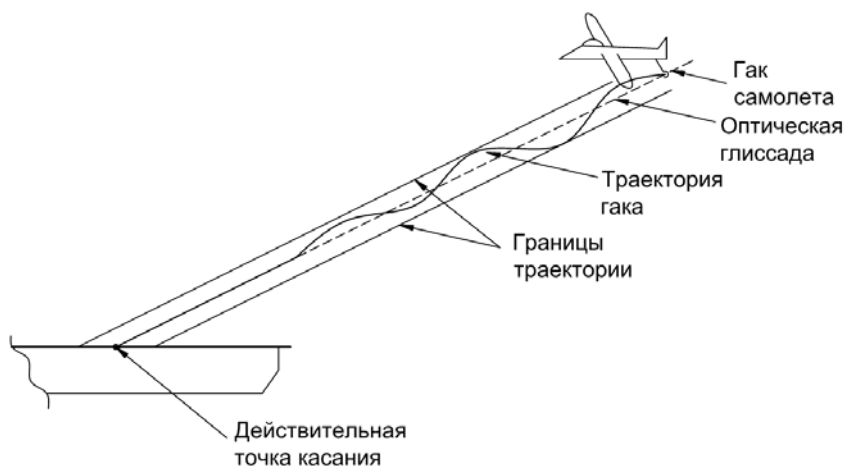


Рис. 3 Траектория гака самолета при посадке на палубу (границы возможных значений действительной траектории, желаемая ОГ).

Определим действительную траектория самолета в вертикальной плоскости, как реальную траекторию его движения при управлении с целью движения по заданной ОГ без учета ошибок управления (рис. 3). В силу наличия ошибок стабилизации и ошибок прогноза, в системе управления углом наклона ОГ, действительная ОГ будет представлять собой зависящую от времени функцию, имеющую колебательный характер. Такая форма действительной ОГ затрудняет движение самолета вдоль этой траектории. Следовательно, для упрощения управления самолетом целесообразно наложить требования к траектории и, как следствие, к характеру суммарной ошибки управления углом наклона ОГ. Согласно публикациям [3, 4], постоянная времени переходного процесса системы управления самолетом в вертикальной плоскости при управлении ручкой зависит от коэффициента чувствительности реакции по вертикальной скорости. При этом время переходного процесса системы управления самолетом приблизительно равно 7 сек. При ступенчатом отклонении ручки по тангажу самолета изменение этого угла на $\vartheta = 0,2$ град = 12 угл.мин происходит за 7 сек., при максимальном значении переходного процесса по тангажу, равном $\vartheta \approx 0,4$ град ≈ 24 угл.мин на момент времени 1,5 сек. Следовательно, система управления самолетом не способна обрабатывать быстро меняющиеся значения траектории (меньшие 7 сек. или близкие к нему). С учетом сказанного, очевидно, что на заключительном промежутке времени $T_J = 3$ сек, перед касанием гака самолета, летчик не может резко изменять траекторию движения.

Разумно ввести требование на приращение суммарной ошибки управления. Для обеспечения выполнения этого требования, полагая ошибку прогноза качки и вертикальных перемещений значительно превышающей ошибку системы стабилизации [11], введем ограничение, на максимальное значение приращения ошибки прогноза $\varepsilon_{\Pi}(t, \tau)$. В этом случае, для того чтобы пилот, двигаясь по прямой, с вероятностью 0,997 находился в центральном секторе ОГ, необходимо соблюдение следующего условия:

$$3\sigma_{\varepsilon_{\Pi}(t, \tau)} < \chi / 2T_J, \quad (13)$$

где χ - углового размера зеленого огня, $\sigma_{\varepsilon_{\Pi}(t, \tau)}$ - среднеквадратическое отклонение приращения ошибки прогноза угла качки и вертикальных перемещений.

Таким образом, для решения задачи управления углом наклона ОГ предлагается также ввести требование (13) на приращение ошибки с учетом выполнения определения гладкости функции, описывающей траекторию.

Заключение. Представлен закон управления углом наклона оптической глissады, учитывающий информацию о прогнозе угла качки и вертикальных перемещений корабля. Предложен критерий качества работы системы управления на основе этого закона, направленный на минимизацию среднеквадратической погрешности отстояния действительной точки касания от расчетной точки касания при ограничении на приращение суммарной ошибки управления. Показано, что для обеспечения выполнения предлагаемого критерия необходимо ввести ограничение на значение среднеквадратического отклонения приращения ошибки прогноза качки и вертикальных перемещений. Использование предложенного закона управления углом наклона ОГ совместно с указанным критерием позволит минимизировать погрешность отстояния действительной точки касания от расчетной точки касания и облегчить работу пилота при совершении посадки самолета на корабль.

Работа проводилась при поддержке гранта Российского научного фонда № 18-19-00627, <https://rscf.ru/project/18-19-00627>

ЛИТЕРАТУРА

1. **Басов Ю.Г.** Светосигнальные устройства. – М.: Транспорт. 1993. – 309 с.
2. **Гутнер И.Е., Журавлев Л.Д., Зворыкин Е.Н., Молочников А.А., Орлов М.В.** Вычисление текущего угла наклона глissады для обеспечения посадки самолета на палубу авианосца. – Сб. «Гирокоспия и навигация» №4(63), Санкт-Петербург, 2008 – 9с.
3. **Zhu Q., Zhang W., Wang T.** Research on the line stabilization law of the Fresnel guiding glide slope. 3036-3041. 2009. doi: 10.1109/CCDC.2009.5192852.
4. **Hernando J-L, Martinez-Val R.** Preliminary suitability analysis of carrier approach guidance and recovery of land-based aircraft. Proc IMechE Part G: J Aerospace Engineering 0(0) 1–15. 2015. DOI: 10.1177/0954410015602278
5. **Антонов Д.В., Гутнер И.Е., Зворыкин Е.Н., Молочников А.А., Семенов И.В.** Перспективная система гиросtabilизации оптической глissады для посадки самолета на авианосец // 9-я Российская мультikonференция по проблемам управления. «Материалы XXX конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова», С. 221-228, СПб.2016г.
6. **Ковтун С.А., Ткаченко О.И.** Алгоритм системы управления самолета при посадке на авианесущий корабль // Э Труды МФТИ. 2017. №2 (34).
7. **Ткаченко О.И., Ковтун С.А.** Применение прогноза колебаний палубы для разработки закона стабилизации оптической системы посадки самолетов корабельного базирования // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. №4 (390).
8. **Лукомский Ю.А., Чугунов В.С.,** Системы управления морскими подвижными объектами: Учебник – Л.: Судостроение, 1988. – 272 с., ил.
9. **Бородай И.К., Нецветаев Ю.А.** Качка судов на морском волнении. – Л.: Судостроение. 1969. – 432 с.
10. **Лопарев А.В., Зайцев О.В., Антонов Д.В.** Использование адаптивных алгоритмов прогнозирования угла качки корабля. Материалы конференции «Управление в морских системах» (УМС-2020). СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020.
11. **Antonov D.** Comparative analysis of algorithms for ship pitching forecasting // IOP Conf.Ser.: Mater/Sci/Eng.984.012017. DOI:10.1088/1757-899X/984/1/012007

В. В. БОГОМОЛОВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ НЕЛИНЕЙНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ ПО РАЗНОМОМЕНТНЫМ ИЗМЕРЕНИЯМ ДАЛЬНОСТИ ДО ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ МАЯКОВ

Разработан рекуррентный алгоритм определения координат автономного необитаемого подводного аппарата с использованием разномоментных измерений дальностей до гидроакустических маяков при большой априорной неопределенности координат. Одним из преимуществ алгоритма, является то, что количество одновременно наблюдаемых маяков может быть произвольным, но есть, по крайней мере, один момент, в который измерения поступают от не менее чем трех маяков. Представлены результаты моделирования, подтверждающие эффективность разработанного алгоритма при изменении числа используемых маяков в процессе движения подводного аппарата.

Введение. Одним из перспективных методов определения координат автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) является метод определения координат по измерениям дальности до гидроакустических маяков (long baseline navigation), представляющий собой частный случай более общего метода определения координат подвижного объекта по измерениям дальностей до точечных ориентиров [1–6]. Его отличие от методов навигации по гравитационным и магнитным полям [7], а также батиметрическим данным [8, 9] в том, что здесь используется ограниченный объем картографической информации (координаты маяков). При большой априорной неопределенности координат по сравнению с дальностью до маяков оказываются существенно нелинейными, что приводит к негауссовской апостериорной плотности вероятности оцениваемого вектора, называемой далее просто апостериорной плотностью (АП). В этом случае при использовании итерационного фильтра Калмана (ИФК) оценка медленно сходится к максимуму АП, причем, это может быть побочный максимум АП. Для преодоления этой проблемы в работе [10] разработан алгоритм модифицированного ИФК. Однако он может начать работу только в момент, когда имеются измерения как минимум от трех маяков.

В настоящей работе предлагается алгоритм с использованием разномоментных измерений дальностей до маяков на основе сглаживания по сохраненным измерениям, который лишен указанного недостатка.

Постановка задачи навигации АНПА. Для дискретных моментов времени $i \in \mathbb{Z}$ требуется оценить горизонтальные координаты АНПА x_{1i}, x_{2i} в локальной прямоугольной системе координат по измерениям дальности до маяков, которые имеют вид

$$y_i^j = T_i^j \hat{c}_0 = \sqrt{(x_{1,i}^j - x_{1,i})^2 + (x_{2,i}^j - x_{2,i})^2 + (x_{3,i}^j - x_{3,i})^2} + \Delta c \cdot T_i^j + \delta_i + v_i^j,$$

где $j = 1..n_i$ – номер маяка, \hat{c}_0 – априорная оценка скорости распространения звука в воде, $x_{1,i}^j, x_{2,i}^j$ – известные горизонтальные координаты маяков, $x_{3,i}^j, x_{3,i}$ – известные глубины маяков и АНПА, T_i^j – измеренное время прохождения сигнала, Δc – центрированная постоянная ошибка знания скорости распространения звука в воде со среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_{\Delta c}$, δ_i – общая для всех маяков и v_i^j некоррелированная для разных маяков ошибка измерений. При этом δ_i и v_i^j – белые шумы с СКО σ_δ и σ_v соответственно.

Предполагается, что на борту АНПА используется система счисления по измерениям продольной и поперечной составляющих скоростей от лага и магнитного компаса, которые имеют вид:

$$\tilde{V}_{\xi,i} = V_{\xi,i} + \Delta V_{\xi,i},$$

$$\begin{aligned}\tilde{V}_{\eta,i} &= V_{\eta,i} + \Delta V_{\eta,i}, \\ \tilde{K}_i &= K_i + \Delta K,\end{aligned}$$

где $V_{\xi,i}$, $V_{\eta,i}$, K_i – истинные значения, $\Delta V_{\xi,i}$ и $\Delta V_{\eta,i}$ – белозумные дискретные центрированные взаимнонекоррелированные ошибки продольной и поперечной составляющих скоростей лага с СКО $\sigma_{\Delta V_{\xi}} = \sigma_{\Delta V_{\eta}} = \sigma_{\Delta V_{\xi,\eta}}$, ΔK – центрированная постоянная ошибка магнитного компаса с СКО $\sigma_{\Delta K}$.

Предполагается, что вся измерительная аппаратура работает по единой шкале времени и моменты поступления измерений лага, дальности и магнитного компаса совпадают.

Начальные координаты представим как

$$x_{1,0} = \hat{x}_{1,0} + \Delta x_{1,0}, \quad x_{2,0} = \hat{x}_{2,0} + \Delta x_{2,0},$$

где $\hat{x}_{1,0}$ и $\hat{x}_{2,0}$ – априорные оценки координат, а $\Delta x_{1,0}$, $\Delta x_{2,0}$ их центрированные погрешности с СКО $\sigma_{\Delta x_{1,0}}$ и $\sigma_{\Delta x_{2,0}}$.

Введем вектор состояния $X_i = [x_{1,i} \ x_{2,i} \ \Delta c \ \Delta K]^T$. Уравнения динамики вектора состояния в линеаризованной форме имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}x_{1,i} &= x_{1,i-1} + \left((\tilde{V}_{\xi,i} \cdot \cos(\tilde{K}_i) - \tilde{V}_{\eta,i} \cdot \sin(\tilde{K}_i)) \cdot \Delta K_{i-1} + \tilde{V}_{\xi,i} \cdot \sin(\tilde{K}_i) + \tilde{V}_{\eta,i} \cdot \cos(\tilde{K}_i) \right) \cdot \Delta t_i + \Delta V_{1,i} \cdot \Delta t_i, \\ x_{2,i} &= x_{2,i-1} + \left((-\tilde{V}_{\xi,i} \cdot \sin(\tilde{K}_i) - \tilde{V}_{\eta,i} \cdot \cos(\tilde{K}_i)) \cdot \Delta K_{i-1} + \tilde{V}_{\xi,i} \cdot \cos(\tilde{K}_i) - \tilde{V}_{\eta,i} \cdot \sin(\tilde{K}_i) \right) \cdot \Delta t_i + \Delta V_{2,i} \cdot \Delta t_i, \\ \Delta c_i &= \Delta c_{i-1}, \\ \Delta K_i &= \Delta K_{i-1}.\end{aligned}$$

где Δt_i – интервал дискретности, равный интервалу поступления измерений дальности до маяков, $\Delta V_{1,i}$ и $\Delta V_{2,i}$ – проекции ошибок лага на оси x_1 и x_2 , которые имеют такую же СКО, что и ошибки лага $\sigma_{\Delta V_1} = \sigma_{\Delta V_2} = \sigma_{\Delta V_{\xi,\eta}}$, так как $\Delta V_{\xi,i}$ и $\Delta V_{\eta,i}$ взаимнонекоррелированы и имеют одинаковые СКО.

Начальная оценка вектора состояния и ковариационная матрица ее погрешности выбираются

$$\text{как } \hat{X}_0 = (\hat{x}_{1,0} \ \hat{x}_{2,0} \ 0 \ 0)^T \text{ и } P_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{\Delta x_{1,0}}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\Delta x_{2,0}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\Delta c}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\Delta K}^2 \end{bmatrix}.$$

Измерения дальностей на момент i объединяются в вектор $Y_i = (y_i^1, \dots, y_i^{n_i})^T$.

Таким образом, исходная задача оценки координат сводится к задаче стохастического оценивания вектора состояния X_i по всем Y_k для $k \leq i$.

Рекуррентный алгоритм навигации АНПА с использованием разномоментных измерений дальностей. На рис. 1 приведена схема предлагаемого рекуррентного алгоритма навигации АНПА с использованием разномоментных измерений дальностей. Запуск алгоритма выполняется в момент $i = 0$, в который впервые появляются единовременные измерения от трех или большего количества маяков. Измерения дальностей до маяков, поступившие перед этим моментом, т.е. на моменты $i < 0$, сохраняются в памяти. Таким образом, для размерности вектора измерений справедливы неравенства $\dim Y_0 \geq 3$, $\dim Y_i \leq 2$ при $i < 0$. Вектор измерений Y_0 обрабатывается с помощью модифицированного ИФК, использующего множество точек линеаризации [10]. Накопленные ранее измерения $Y_{-1}, Y_{-2} \dots Y_{-M}$ могут быть обработаны с помощью рекуррентной процедуры сглаживания в фиксированной точке [12]. Учет этих измерений и является основной особенностью предлагаемого алгоритма.

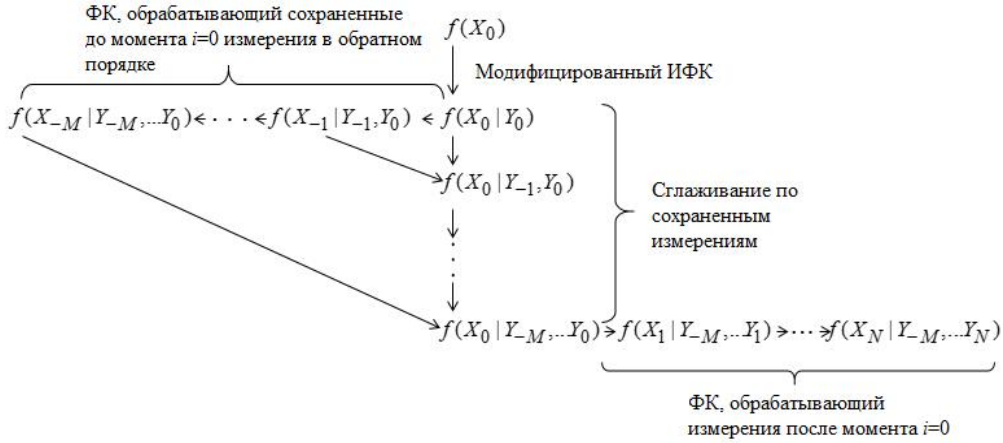


Рис. 1. Схема алгоритма, где $f(X_0)$ – априорная плотность X_0 , $f(X_i|Y_j, \dots, Y_i)$ – гауссовская аппроксимация АП X_i , условной по отношению к измерениям Y_j, \dots, Y_i , M – общее количество моментов времени от получения первого сохраненного измерения до $i=0$.

В роли фиксированной точки выступает момент $i = 0$, а измерения обрабатываются в обратном порядке:

$$\hat{X}(0/i) = \hat{X}(0/i+1) + B(i) \cdot (\hat{X}(i/i) - \hat{X}(i/i+1)),$$

$$P(0/i) = P(0/i+1) + B(i) \cdot (P(i/i) - P(i/i+1)) \cdot B^T(i),$$

где $i = [-1, -2, -3, \dots, -M]$, $B(i) = \prod_{j=0}^{i+1} A(j)$, $A(j) = P(j/j) \cdot F^T(j+1, j) \cdot P^{-1}(j+1/j)$, $F(j+1)$ переходная матрица от X_{j+1} к X_j , $\hat{X}_{i/j}$ – оценка X_i по измерениям Y_0, Y_{-1}, \dots, Y_j ; $P_{i/j}$ – ковариационная матрица ошибки этой оценки. $B(i)$ можно вычислять рекуррентно $B(i) = B(i-1)P(i+1/i+1)F^T(i+2)P^{-1}(i+2/i+1)$.

Оценивание $X_i, i > 0$ выполняется с помощью обычного ФК, который рекуррентно обрабатывает Y_i по мере их поступления. При обработке $Y_i, i \neq 0$, в отличие от Y_0 , используется одна точка линеаризации.

Результаты моделирования. Для проверки эффективности алгоритма моделировались случайные погрешности измерений дальности, скорости и курса, а также погрешности априорных координат с СКО $\sigma_\delta = 5$ м, $\sigma_v = 10$ м, $\sigma_{\Delta c} = 3$ м/с, $\sigma_{\Delta x_{i,0}} = 500$ м, $\sigma_{\Delta x_{2,0}} = 500$ м, $\sigma_{\Delta v_{\xi,\eta}} = 0.1$ м/с, $\sigma_{\Delta \kappa} = 0.5^\circ$. Решение проводилось при прямолинейном движении АНПА (рис. 2) со скоростью 5 м/с и фиксированном местоположении маяков.

Маяк считается наблюдаемым, если дальность до него не превышает заданного порога – 1 км. Дискретность поступления измерений $\Delta t_i = 1$ с.

По 1000 реализациям были вычислены действительные и расчетные значения среднеквадратической погрешности (СКП) [11] координат как для предлагаемого алгоритма со сглаживанием, т.е. с учетом измерений Y_i для $i < 0$, так и для алгоритма без сглаживания [10]. Графики СКП приведены на рис. 3. Из графиков видно, что точность предлагаемого рекуррентного алгоритма со сглаживанием в два раза выше, чем алгоритма без сглаживания [10], в котором накопленные до момента наблюдения трех ориентиров измерения не учитываются. При этом действительная и расчетная СКП обоих алгоритмов согласованы.

Отметим, что предлагаемый алгоритм может быть реализован нерекуррентно. Проведено сравнение рекуррентного алгоритма и нерекуррентного, в котором одновременно обрабатываются измерения Y_i для всех $i \leq 0$. При большом количестве измерений нерекуррентный алго-

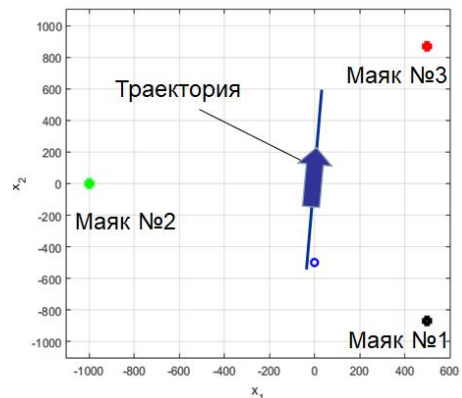


Рис. 2. Траектория движения АНПА и расположение маяков

ритм практически нереализуем в реальном времени, но потенциально является более точным, так как здесь нет необходимости применять гауссовскую аппроксимацию АП на каждом шаге. В рекуррентном алгоритме для обработки очередного вектора измерений Y_i используется гауссовская аппроксимация АП для предыдущего шага. При проведении моделирования рекуррентный и нерекуррентный алгоритмы использовали одни и те же реализации ошибок измерений, курса, скорости и априорных координат. Установлено, что результаты рекуррентного алгоритма со сглаживанием близки к результатам более точного, но трудоемкого нерекуррентного алгоритма.

Закключение. Разработан рекуррентный алгоритм решения задачи определения координат движущегося АНПА с учетом разномоментных измерений дальностей до гидроакустических маяков при большой априорной неопределённости координат. Для работы алгоритма количество одновременно наблюдаемых маяков в большинстве моментов времени может составлять менее трех (что является минимумом для одномоментного навигационного решения), однако требуется, по крайней мере, один момент времени ($i=0$), в котором измерения поступают от трех или более маяков. Установлено, что включение в алгоритм этапа сглаживания с обработкой поступивших до $i=0$ измерений позволяет повысить точность определения координат АНПА более чем в два раза. При этом действительная и расчетная СКП согласованы. По точности результатов рекуррентный алгоритм близок к нерекуррентному.

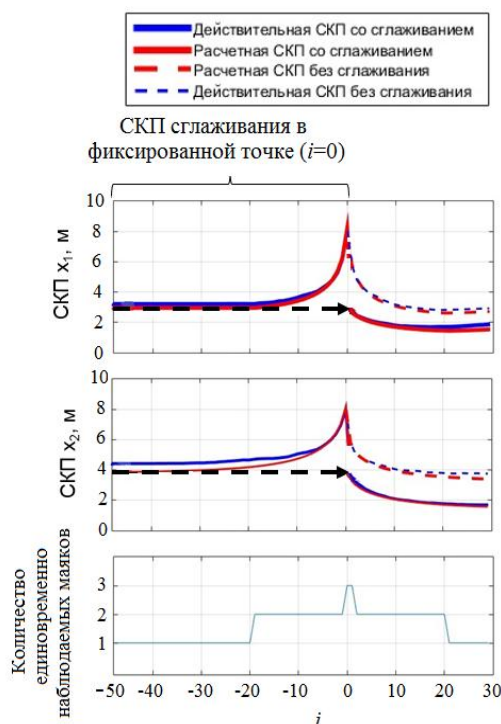


Рис. 3. Расчетная и действительная СКП оценок с использованием разработанного рекуррентного алгоритма со сглаживанием и без него

ЛИТЕРАТУРА

1. Paull, L., Saeedi, S., Seto M., Li H., AUV Navigation and Localization: A Review, IEEE Journal of oceanic engineering, 2014, vol. 39, no. 1, pp. 131–149.
2. Кебкал К.Г., Машошин А.И. Гидроакустические методы позиционирования автономных необитаемых подводных аппаратов // Гирокоспия и навигация. 2016. №3. С. 115–130.
3. Ю.В. Матвиевко, А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, А.Ф. Щербатюк. Перспективы повышения эффективности автономных подводных роботов // Известия ЮФУ. Технические науки, 2016. С. 123-141
4. Степанов О.А. Методы обработки навигационной измерительной информации. СПб., 2017. 196 с.
5. Д. А. Кошаев. Многоальтернативный алгоритм одномаяковой навигации автономного необитаемого подводного аппарата без априорных данных о его местоположении. Часть 1. Математическое описание // Гирокоспия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 109-130.
6. Д. А. Кошаев. Многоальтернативный алгоритм одномаяковой навигации автономного необитаемого подводного аппарата без априорных данных о его местоположении. Часть 2. Моделирование // Гирокоспия и навигация. 2020. Том 28. №3 (110). С. 76-94.
7. Степанов О. А., А. Б. Торопов, Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 2 Современные тенденции развития. // Гирокоспия и навигация, 2015. № 4 (91). С. 147-159.
8. С.Ф. Ключева, В.В. Завьялов. Синтез алгоритмов батиметрических систем навигации // Владивосток: Мор. гос. ун-т, 2013. 132 с.
9. Дунаевская К.В., Киселев Л.В., Костоусов В.Б. Исследование метода вычисления текущей характеристики точности в задаче навигации по картам геофизических полей // Гирокоспия и навигация. Том 29. №1 (112), 2021. С. 52-69. DOI 10.17285/0869-7035.0056
10. Bogomolov V.V. Test Results of the Long Baseline Navigation Solutions under a Large a Priori Position Uncertainty // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, International Workshop Navigation and Motion Control (NMC 2021), №1215.
11. Степанов О.А., Литвиненко Ю.А., Васильев В.А., Торопов А.Б., Басин М.В. Алгоритм полиномиальной фильтрации в задачах обработки навигационной информации при квадратичных нелинейностях в уравнениях динамики и измерений. Часть I. Описание и сопоставление с алгоритмами калмановского типа // Гирокоспия и навигация. 2021. Т. 29. № 3(114). С. 3–33.
12. Медич Дж. Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия. 1977, с. 440.

А.М. ИСАЕВ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», С.-Петербург)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СУБОПТИМАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ ОЦЕНИВАНИЯ ПРИ НАЛИЧИИ НЕЛИНЕЙНОСТИ ПОЛИНОМИАЛЬНОГО ТИПА В ИЗМЕРЕНИЯХ

Проведено сопоставление эффективности обобщённого, полиномиального и ансцентного фильтров калмановского типа на простейшем примере задачи оценивания скалярного параметра по измерениям, содержащим нелинейность полиномиального типа, включающую слагаемые второго и третьего порядка. Исследовано влияние порядка нелинейности на эффективность сопоставляемых фильтров.

Введение. Как отмечается в работе [1], в настоящее время в задачах оценивания, решаемых при обработке навигационной информации, широкое распространение получил стохастический подход, основанный на байесовской теории фильтрации [2,3]. Под задачей синтеза оптимального алгоритма оценивания в рамках байесовского подхода понимается нахождение процедуры, обеспечивающей не только вычисление оценки, но и соответствующей ей текущей характеристики точности в виде условной апостериорной матрицы ковариаций. Наиболее просто в рамках байесовского подхода задача оценивания решается в линейном гауссовском случае. Широкое применение при этом получил знаменитый фильтр Калмана [2-6]. Однако, на практике, как правило, задачи оценивания оказываются нелинейными [4-9]. В этом случае не удаётся получить выражения для оптимальной оценки и матрицы ковариаций в замкнутой форме. Поэтому при решении нелинейных прикладных задач разрабатывают различного рода упрощённые (субоптимальные) алгоритмы, позволяющие, с одной стороны, получить экономичные в вычислительном отношении процедуры вычисления оценки и текущей матрицы ковариаций, а с другой – обеспечить точность, близкую к потенциальной [3]. В настоящей работе рассматриваются субоптимальные алгоритмы, основанные на гауссовской аппроксимации апостериорной плотности или, как их еще называют, алгоритмы калмановского типа [1,3-12]. Эти алгоритмы, как правило, оказываются эффективными при решении широкого круга задач в случае, если апостериорная плотность хотя и отлична от гауссовской, но при этом является одноэкстремальной.

В работе [1] описан алгоритм, названный полиномиальным фильтром, для решения задач обработки навигационной информации для случая наличия нелинейностей квадратичного типа как в уравнениях динамики, так и в уравнениях измерений. В этой же работе предложена методика, направленная на оценивание эффективности субоптимальных алгоритмов и сопоставление их между собой в различных прикладных задачах. Цель настоящей работы - продолжить исследования, касающиеся оценки эффективности полиномиальных алгоритмов [1, 10]. В предлагаемом докладе на примере простейшей задачи оценивания скалярного параметра по измерениям, содержащим полиномиальную нелинейность, включающую слагаемые второго и третьего порядка, проводится сопоставление различных субоптимальных алгоритмов калмановского типа. При этом рассматриваются полиномиальный фильтр третьего порядка и ансцентный фильтр Калмана. Кроме того, при реализации описанной в работе [1] методики при исследовании точности, дополнительно проводится вычисление нижней границы точности по Рао-Крамеру [3, 13].

Постановка задачи и сопоставляемые алгоритмы. Пусть требуется оценить скалярный параметр x по скалярным измерениям полиномиального вида

$$y_i = h(x) = ax + cx^2 + bx^3 + v_i, \quad i = \overline{1,m}, \quad (1)$$

в которых a, c и b – известные величины, а x и y_i – центрированные гауссовские независимые между собой случайные величины с дисперсиями σ_0^2 и r^2 .

При проведении исследований сопоставлялись следующие алгоритмы: обобщённый фильтр Калмана (Extended Kalman Filter - EKF), полиномиальный фильтр второго и третьего порядка (Second Order Polynomial Filter - SOPF и Third Order Polynomial Filter - TOPF соответственно), ансцентный фильтр Калмана (Unscented Kalman Filter - UKF) и оптимальный алгоритм, реализуемый с помощью метода сеток [3,4,14]. Заметим, что алгоритмы, рассмотренные в [1], в настоящей работе названы полиномиальными фильтрами второго порядка, с тем чтобы отличить их от рассматриваемого здесь полиномиального фильтра, учитывающего нелинейность третьего порядка.

Все рассматриваемые субоптимальные алгоритмы являются алгоритмами калмановского типа и имеют одинаковую структуру, включающую блок прогноза и блок коррекции. Общим для них является также предположение о гауссовском характере распределения апостериорной плотности на каждом шаге, и тот факт, что обработка текущего измерения осуществляется исходя из идеологии построения линейного оптимального алгоритма [1,12,15]. Однако в EKF, SOPF и TOPF нахождение первых двух моментов для составного вектора, включающего векторы x и y_i , производится путём разложения в ряд исходных нелинейных функций с пренебрежением членами третьего и более высокого порядков малости. UKF же основан на методах приближенного вычисления двух первых моментов функции плотности распределения при помощи процедуры так называемого U -преобразования.

Соотношения обобщенного фильтра Калмана и полиномиального фильтра второго порядка для задачи (1) легко получить с использованием таблицы 3 работы [1], для оптимального алгоритма – в [6], для UKF с использованием псевдокода, приведённого в [12]. Соотношения, необходимые для вычисления моментов в полиномиальном фильтре третьего порядка, применительно к рассматриваемой задаче были получены с использованием выражения для чётных моментов гауссовских случайных величин и того факта, что нечетные центральные моменты равны нулю:

$$\hat{y}_i^{TOPF} = cP_{i-1}^{TOPF} + (a + 3bP_{i-1}^{TOPF})(\hat{x}_{i-1}^{TOPF}) + c(\hat{x}_{i-1}^{TOPF})^2 + b(\hat{x}_{i-1}^{TOPF})^3, \quad (2)$$

$$P_{x,y_i}^{TOPF}(\hat{x}_{i/i-1}^{TOPF}, \hat{x}_{i-1}^{TOPF}) = 3b(P_{i-1}^{TOPF})(\hat{x}_{i-1}^{TOPF})^2 + 2c(P_{i-1}^{TOPF})(\hat{x}_{i-1}^{TOPF}) + 3b(P_{i-1}^{TOPF})^2 + a(P_{i-1}^{TOPF}), \quad (3)$$

$$P_{y_i}^{TOPF}(\hat{x}_{i/i-1}^{TOPF}) = 9b^2(P_{i-1}^{TOPF})(\hat{x}_{i-1}^{TOPF})^4 + 12cb(P_{i-1}^{TOPF})(\hat{x}_{i-1}^{TOPF})^3 + \left[36b^2(P_{i-1}^{TOPF})^2 + 4c^2(P_{i-1}^{TOPF}) + 6ab(P_{i-1}^{TOPF}) \right](\hat{x}_{i-1}^{TOPF})^2 + \left[24cb(P_{i-1}^{TOPF})^2 + 4ac(P_{i-1}^{TOPF}) \right](\hat{x}_{i-1}^{TOPF}) + 15b^2(P_{i-1}^{TOPF})^3 + 2c^2(P_{i-1}^{TOPF})^2 + 6ab(P_{i-1}^{TOPF})^2 + a^2(P_{i-1}^{TOPF}) + r^2. \quad (4)$$

При оценке эффективности алгоритмов, как уже говорилось выше, помимо методики, описанной в [1] привлекалась нижняя граница точности по Рао-Крамеру, соотношения для которой в рассматриваемом примере примут вид [3,13]:

$$J_i^{-1} = (\sigma_i^{HTT})^2 = \left(\frac{1}{\sigma_0^2} + \frac{1}{r^2} \int \left[\sum_{i=1}^m \left(\frac{dh(x)}{dx} \right)^2 \right] p(x) dx \right)^{-1} = \frac{\sigma_0^2 r^2}{\sigma_0^2 (h^{HTT})^2 i + r^2}, \quad i = \overline{1..m}, \quad (5)$$

где $h^{HTT} = \sqrt{a^2 + 4c^2\sigma_0^2 + 6ab\sigma_0^2 + 27b^2\sigma_0^4}$.

Результаты моделирования. Моделирование проводилось согласно методике, описанной в [1], для частных случаев уравнения (1): $(a = 1, c = 5, b = 0)$ - нелинейность, включающая слагаемые второго порядка; $(a = 1, c = 0, b = 10)$ - нелинейность, включающая слагаемые третьего

порядка; $(a = 1, c = 5, b = 10)$ - нелинейность, включающая слагаемые второго и третьего порядка. Для всех рассматриваемых случаев $\sigma_0 = 0.2$, а $r = 0.1$. Ниже представлены некоторые результаты моделирования. На всех графиках синий цвет соответствует EKF, чёрный – SOPF, фиолетовый – UKF, красный – оптимальному алгоритму (OPT), зелёный – нижней границе точности (НГТ), оранжевый – TOPF, сплошные линии соответствуют действительным средне-квадратическим ошибкам (СКО), полученным при помощи метода статистических испытаний, пунктирные - расчётным. Действительная и расчётная дисперсии получены путём моделирования случайной величины x с числом реализаций $L=2000$.

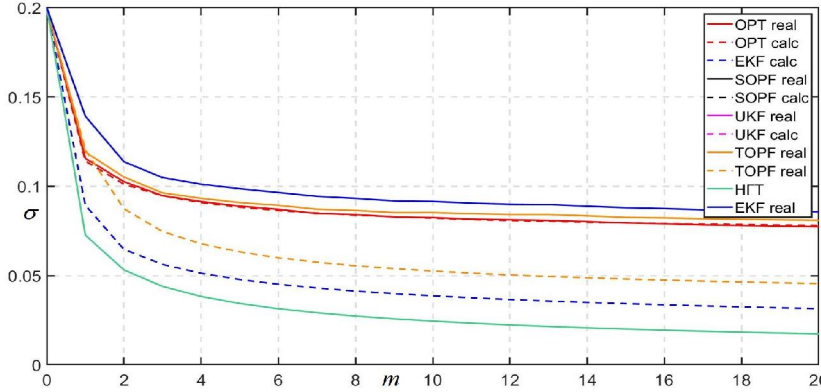


Рис.1. Действительные и расчетные СКО оценивания x при $c=5$ и $b=0$.

На рисунке 1 для случая нелинейности включающей слагаемые второго порядка приведены графики безусловной и расчётной СКО, а в таблице 1 представлены гистограммы погрешностей оценивания x и приведена действительная СКО для первого и последнего измерений.

Таблица 1.

m	<i>EKF</i>	<i>UKF</i>	<i>SOPF</i>	<i>TOPF</i>	<i>OPT</i>
1	 СКО = 0,1393	 СКО = 0,1192	 СКО=0,1192	 СКО=0,1192	 СКО=0,1157
20	 СКО = 0,0858	 СКО = 0,0810	 СКО=0,0810	 СКО = 0,0810	 СКО=0,0774

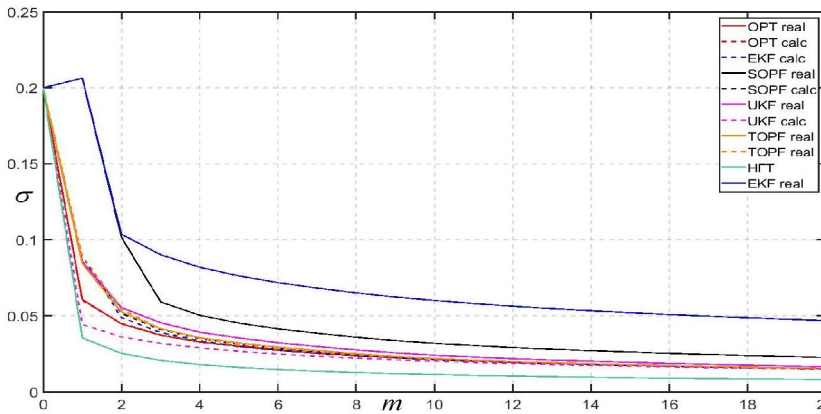
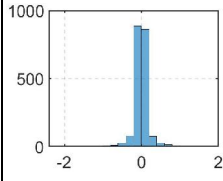
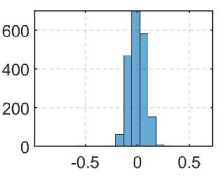
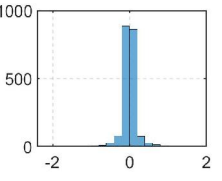
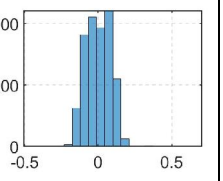
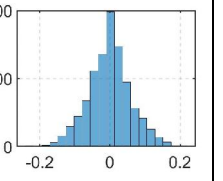
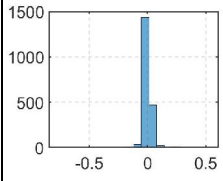
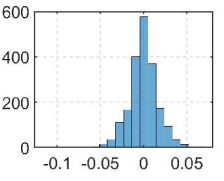
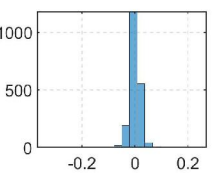
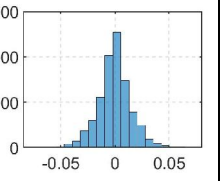
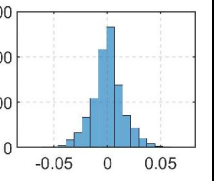


Рис.2. Действительные и расчетные СКО оценивания x при $c=0$ и $b=10$.

На рисунках и в таблицах 2 и 3, в целях иллюстрации получаемых данных, приведены результаты, аналогичные представленным выше, но для случаев нелинейности, включающей слагаемые третьего порядка, и нелинейности, включающей слагаемые второго и третьего порядка.

Таблица 2.

m	<i>EKF</i>	<i>UKF</i>	<i>SOPF</i>	<i>TOPF</i>	<i>OPT</i>
1	 СКО = 0,2063	 СКО = 0,0856	 СКО=0,2063	 СКО=0,0843	 СКО=0,0607
20	 СКО = 0,0468	 СКО = 0,0165	 СКО = 0,0226	 СКО = 0,0153	 СКО=0,0151

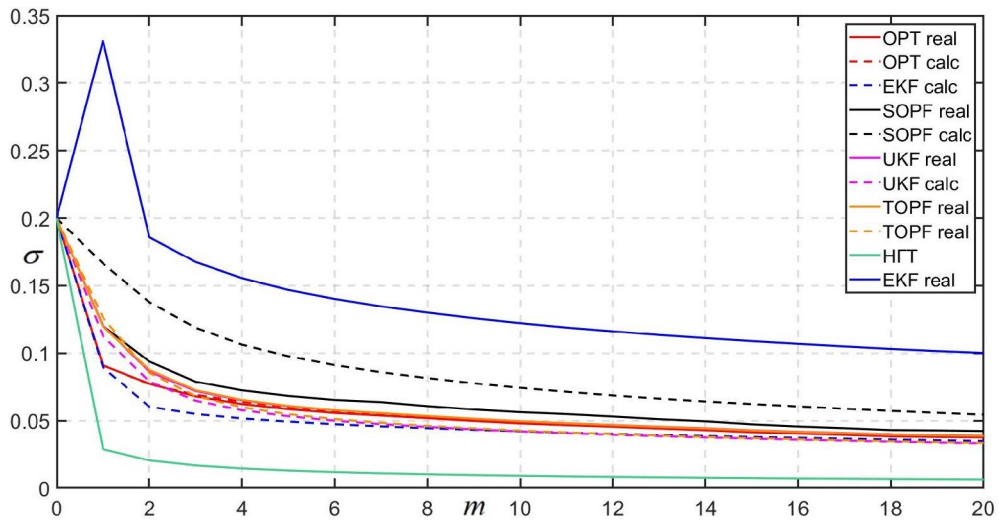
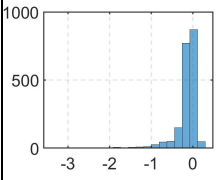
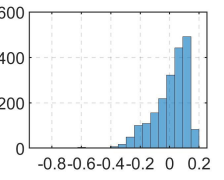
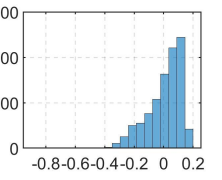
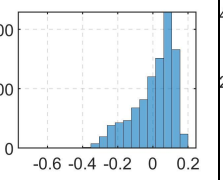
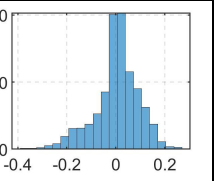
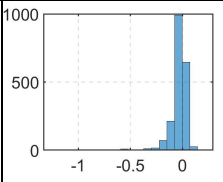
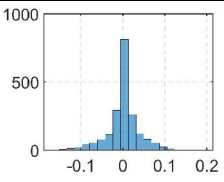
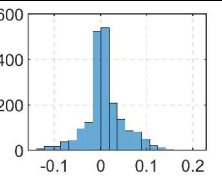
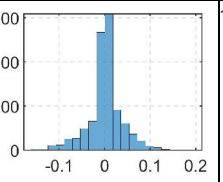
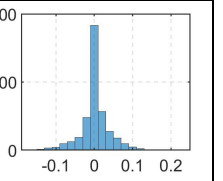


Рис.3. Действительные и расчетные СКО оценивания x при $c=5$ и $b=10$.

Таблица 3.

m	<i>EKF</i>	<i>UKF</i>	<i>SOPF</i>	<i>TOPF</i>	<i>OPT</i>
1	 СКО = 0,3316	 СКО = 0,1203	 СКО=0,1202	 СКО=0,1197	 СКО=0,0909
20	 СКО = 0,1002	 СКО = 0,0388	 СКО=0,0423	 СКО = 0,0387	 СКО=0,0376

Соотношения среднеквадратических ошибок для различных фильтров и соотношение величин $\sigma_i^{HГТ}$, характеризующих нижнюю границу точности, с СКО, соответствующей оптимальному фильтру, в общем случае существенным образом зависит от конкретного вида нелинейной функции, определяемого уровнем слагаемых второго и третьего порядков.

Заключение.

1. Для рассматриваемого примера оценки скалярного параметра по скалярным измерениям, содержащим нелинейности полиномиального типа, получен полиномиальный фильтр третьего порядка.
2. Во всех рассмотренных примерах наименее эффективным оказался обобщенный фильтр Калмана. При этом вырабатываемая в нем расчетная характеристика точности заметно отличается от действительной.
3. При наличии нелинейности кубического типа, наибольшую эффективность среди рассматриваемых субоптимальных алгоритмов показывают *UKF* и *TOPF*, при этом их безусловная и расчётные СКО согласованы.
4. Представляется целесообразным продолжить анализ влияния вида нелинейностей, зависящих от уровня слагаемых второго и третьего порядков, на характер апостериорной плотности, а также на эффективность *UKF* и рассматриваемых полиномиальных фильтров.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Степанов О.А., Литвиненко Ю.А., Васильев В.А., Торопов А.Б., Басин М.В.** Алгоритм полиномиальной фильтрации в задачах обработки навигационной информации при квадратичных нелинейностях в уравнениях динамики и измерений. Часть I. Описание и сопоставление с алгоритмами калмановского типа. Гирскопия и навигация. Том 29. №3 (114), 2021- С. 3-33.
2. **Kalman, R. E.** A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems. / R.E. Kalman//Trans. ASME, J. Basic Eng. – 1960, – 82 (Series D)– P. 35-45.
3. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. Издание 3-е. – СПб.: ЦНИИ "Электроприбор", 2003. – 370 с.
4. **Gelb, A.,** Applied Optimal Estimation. M.I.T. Press, Cambridge, 1974.
5. **Simon, D.** Optimal State Estimation. Kalman, ∞ , and Nonlinear approaches/ D. Simon. – A John Wiley & Song Inc. – 2006. – 550 p
6. **Степанов О.А.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации / изд. 3-е, исправленное и дополненное. Ч. 1. Введение в теорию оценивания, СПб.:ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. 509 с.
7. **Дмитриев С.П.** Высокоточная морская навигация. СПб.: Судостроение, 1991. - 224 с.: ил. ISBN 5-7355-0410-X.
8. **Julier S. J., Uhlmann J. K.** Unscented filtering and nonlinear estimation, Proceedings of the IEEE, vol. 92(3), pp. 401–422, 2004.
9. **Condomines, Jean-Philippe.** Nonlinear kalman filtering for multi-sensor navigation of unmanned aerial vehicle. Elsevier Science and Technology, 2018. – 254 с.: ил. ISBN 9780081027448.
10. **Basin, M.** New Trends in Optimal Filtering and Control for Polynomial and Time-Delay Systems, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2008, P. 380
11. **F. Gustafsson., G. Hendeby,** "Some relations between extended and unscented Kalman filters", IEEE Trans. Signal Process., vol. 60, no. 2, pp. 545-555, 2012.
12. **Торопов, А.Б.** Линейные оптимальные алгоритмы в задачах оценивания с нелинейными измерениями. Связь с алгоритмами калмановского типа / О.А. Степанов, А.Б. Торопов // Известия ТулГУ. Технический вестник. – 2012. –№ 7. – С. 172-189
13. **Степанов О. А., Торопов А.Б.** Сравнительное исследование линейного и нелинейного оптимальных алгоритмов оценивания в задачах обработки навигационной информации. // Гирскопия и навигация - 2010. - № 3 (70). - С. 24-37
14. **Kramer, S. C.** Recursive Bayesian estimation using piece-wise constant approximations/ S. C. Kramer, H. W. Sorenson // Automatica. – 1988. –24(6). – P. 789–801.
15. **Zhankue Zhao, Rong, X., Li, V., Jilkov, P.** Best Linear Unbiased Filtering with Nonlinear Measurements for Target Tracking, IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 2004, vol. 40, no. 4, pp. 1324–1336.

A. M. Isaev (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, Russia). «**Suboptimal estimation algorithms comparative analysis under polynomial nonlinearity in measurements**»

An extended, polynomial and unscented Kalman filters effectiveness comparison is carried out on the scalar parameter estimating problem under polynomial nonlinearity in measurements. The nonlinearity order influence on the compared filters efficiency is investigated.

УДК 531.5

Н. Г. СКИДАНОВ, А. В. БЕЗДЕТКО
(АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", г. Санкт-Петербург)**О ФОРМИРОВАНИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ВЕКТОРНОЙ ГРАВИМЕТРИИ ИНЕРЦИАЛЬНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ**

Рассматриваются способы формирования измерений при решении задачи определения на подвижном основании горизонтальных компонент вектора аномалии силы тяжести инерциально-геодезическим методом, обобщение которого на пространственный случай принято называть задачей векторной гравиметрии. Проводится анализ вариантов формирования измерений, описываемых в российских и зарубежных публикациях. Оцениваются их преимущества и недостатки.

Введение. Определение параметров аномалий гравитационного поля Земли (ГПЗ) является востребованным, в частности, в задачах поиска полезных ископаемых и осуществления высокоточной инерциальной навигации. Отсутствие достоверной информации об уклонении отвесной линии (УОЛ) порождает методическую погрешность инерциальных навигационных систем (ИНС) вследствие отличия вырабатываемых ИНС астрономических координат места от геодезических координат, с использованием которых осуществляется навигация подвижных объектов. В связи с тем, что такая погрешность в некоторых районах может достигать величин в десятки угл. с, возникает необходимость в получении данных об УОЛ на больших территориях. Существующие глобальные модели ГПЗ, полученные по результатам измерений с космических аппаратов, имеют ограниченное разрешение. Для получения детальной информации об УОЛ проводят морскую съёмку в интересующих районах Земли.

В настоящее время выделяют четыре метода определения УОЛ: гравиметрический, градиентометрический, астрономо-геодезический и инерциально-геодезический [1]. В работе рассматривается инерциально-геодезический метод, базирующийся на совместной обработке данных ИНС и приёмной аппаратуры (ПА) спутниковой навигационной системы (СНС) и использующий, как правило, фильтр Калмана (ФК). Особенностью этого метода является то, что, в отличие от классического астрономо-геодезического метода, как вырабатываемые ИНС навигационные параметры (и координаты, и соответствующие скорости), так и параметры угловой ориентации, связаны с истинным горизонтом (вертикалью), то есть их можно использовать в качестве источника информации об УОЛ при наличии соответствующих параметров, выработанных относительно геодезической вертикали [2]. Рассматриваемый метод позволяет определить лишь относительную величину УОЛ [3], для нахождения абсолютных значений необходимо создавать реперные точки точных значений [4].

Настоящая работа посвящена анализу различных вариантов формирования измерений в ФК при решении задачи определения УОЛ инерциально-геодезическим методом, обобщение которого на пространственный случай принято называть задачей векторной гравиметрии.

Способы формирования измерений. В векторной гравиметрии различают два основных метода обработки полученной информации: прямой и косвенный [5, 6]. В прямом методе производится сравнение ускорений, вырабатываемых ИНС и вычисляемых по данным ПА СНС. В косвенном методе происходит обработка данных о координатах и скоростях от тех же источников. Помимо двух приведённых вариантов, в [7] предложен способ формирования измерений по данным об углах ориентации, вырабатываемых ИНС и одноименных параметрах, вырабатываемых по данным гироскопов и информации о координатах места от ПА СНС.

На рисунке 1 на примере «северного» канала построителя вертикали ИНС показана упрощенная схема формирования погрешностей ИНС и перечисленных выше измерений ФК, выполняющего оценивание УОЛ, которая отражает влияние инструментальных погрешностей ИНС и ПА СНС (контуры демпфирования шулеровских колебаний и широтно-курсовой связи

Научный руководитель начальник отдела, д.т.н. Литманович Юрий Аронович.

[8] не показаны) [2]. «Входами» схемы являются неучтённая составляющая смещения нуля «северного» акселерометра ε_{AN} , погрешность учёта дрейфа «восточного» гироскопа ε_{GE} , погрешность широты от СНС $\Delta\varphi_{СНС}$, а также искомый полезный сигнал – «северная» составляющая УОЛ ξ . На схеме также обозначены: $\Delta\varphi$ – погрешность выработки ИНС астрономической широты; β_* – «северная» составляющая погрешности моделирования инерциального трёхгранника, β – составляющая погрешности построения истинного горизонта в плоскости меридиана, β_Γ – составляющая погрешности построения геодезического горизонта в плоскости меридиана, ΔW_N^Γ , $\Delta W_N^{СНС}$ – «северные» составляющие погрешностей ускорений ИНС и СНС в геодезической системе координат, Z_W, Z_φ, Z_ψ – измерения, являющиеся функциями приведённых на схеме погрешностей, g, R – ускорение силы тяжести и радиус референц-эллипсоида, аппроксимирующего форму Земли, соответственно.

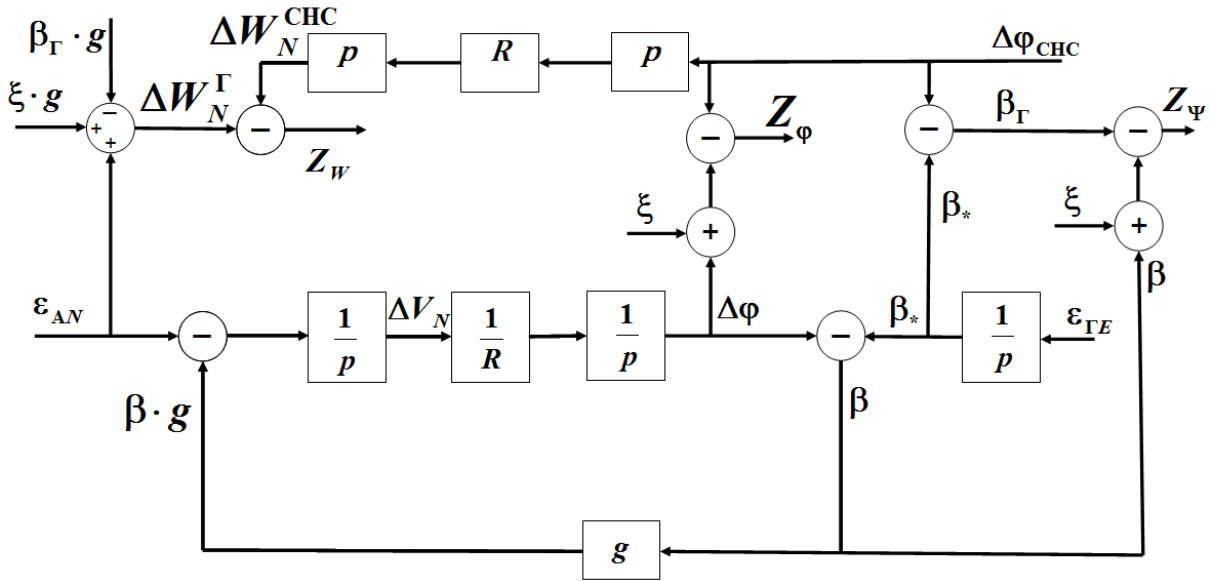


Рисунок 1. Схема влияния погрешностей ИНС и ПА СНС на формируемые измерения («северный канал»)

Позиционные измерения. Инерциально-геодезический метод при обработке позиционных измерений подробно описан в [3]. Для его реализации необходимо располагать координатами от ИНС и ПА СНС (на рис.1 Z_φ – позиционное измерение ИНС по «северному каналу»).

Для позиционного широтного измерения при условии завершения коррекции (демпфирования) построителя вертикали по данным о скорости от ПА СНС (когда $\beta = \frac{\varepsilon_{AN}}{g}$) можно записать выражение:

$$Z_\varphi = \varphi - \varphi_\Gamma = \xi + \left(\beta_* - \frac{\varepsilon_{AN}}{g}\right) - \Delta\varphi_{СНС}, \quad (1)$$

где φ – широта, вырабатываемая ИНС, φ_Γ – широта по данным ПА СНС (геодезическая широта).

Погрешности вырабатываемых ИНС координат можно разделить на две основные компоненты - погрешности построения инерциального трёхгранника (на рис.1 – β_*), имеющие период, близкий к суточному, и погрешности построения вертикали (на рис.1 – β), имеющие шулеровские колебания. Разделение в ФК погрешностей ИНС, обусловленных погрешностями построения инерциального трёхгранника, и длиннопериодических составляющих УОЛ возможно за счёт использования доступных глобальных карт ГПЗ.

Отдельно отметим, что построение в ИНС не геодезической вертикали, а истинной (астрономической) не позволяет достичь невозможности вертикали, так как в контуре построителя

вертикали ИНС используются значения радиуса R для референц-эллипсоида, аппроксимирующего форму Земли, отличающегося от местного радиуса кривизны геоида. Это приводит к появлению методической погрешности построения астрономической вертикали ИНС, устранение которой также требует демпфирования [9].

Оценивание оставшихся после учёта данных глобальных карт ГПЗ «высокочастотных» составляющих УОЛ может быть достигнуто лишь при использовании высокоточной ИНС.

Измерения по углам ориентации. Параметры угловой ориентации, вырабатываемые интегрированной ИНС/СНС системой, содержат составляющие УОЛ, погрешностей чувствительных элементов и СНС [7]. Для оценивания короткопериодных погрешностей УОЛ в [7] предлагается в качестве независимой от значений УОЛ отсчетной базы использовать углы ориентации, рассчитанные по данным гироскопов и координатам от ПА СНС, при формировании которых показания акселерометров не используются. Как видно из рисунка 1, совместное использование данных о координатах от ПА СНС и данных от гироскопа позволяет осуществить построение геодезической вертикали. Разности между углами ориентации, выработанными относительно истинной вертикали и геодезической вертикали, формируют измерения (рассмотрим на примере угла ориентации в плоскости меридиана Ψ):

$$Z_{\Psi} = \Psi - \Psi_{\Gamma} = \xi + \beta_* - \left(\frac{\varepsilon_{AN}}{g} - \Delta\varphi_{\text{СНС}} \right), \quad (2)$$

где Ψ – угол ориентации в плоскости меридиана относительно истинной вертикали, Ψ_{Γ} – угол ориентации в плоскости меридиана относительно геодезической вертикали. Полученное измерение содержит аналогичный позиционному измерению набор инструментальных погрешностей. Выражения (1) и (2) эквивалентны друг другу, что свидетельствует о равнозначности двух способов формирования измерений.

Для получения результатов требуемой точности авторами использовалась постобработка по нескольким реализациям и волновой корреляционный фильтр.

Измерения по ускорениям. Измерения, по которым определяются УОЛ, формируются как разности составляющих ускорений, измеренных акселерометрами ИНС и преобразованных в систему координат, связанную с горизонтом, с использованием геодезических координат от ПА СНС (см. рисунок 1) и одноимённых составляющих ускорений, полученных дифференцированием данных ПА СНС [10], что согласно рисунку 1 может быть выражено следующей формулой (на примере «северной» составляющей ускорений):

$$Z_W = W_N^{\Gamma} - W_N^{\text{СНС}} = \varepsilon_{AN} + g \cdot \xi - g \cdot (\beta_* - \Delta\varphi_{\text{СНС}}) - \Delta\ddot{\varphi}_{\text{СНС}} \cdot R, \quad (3)$$

где $W_N^{\Gamma}, W_N^{\text{СНС}}$ – «северные» составляющие ускорений ИНС и ПА СНС в геодезической системе координат.

Как видно из сравнения (3) с (1), недостатком измерений по ускорениям является наличие дополнительной погрешности, представляющей собой вторую производную от погрешности ПА СНС. Отметим также, что в случае наличия ходовых вибраций объекта в измерениях появляются дополнительные составляющие ускорений.

Обращает на себя внимание статья [11], в которой используются измерения по ускорениям и приведены теоретические и экспериментальные данные, согласно которым УОЛ могут быть определены с требуемой точностью и разрешением с помощью интегрированных ИНС/СНС систем с гироскопами навигационного класса точности. Подобный результат достигается за счёт нескольких проходов по исследуемой области, исключением из обрабатываемых данных длиннопериодных составляющих УОЛ (также посредством глобальных карт) и последующей обработкой данных с помощью волновых корреляционных фильтров [11].

Определение УОЛ в [11] производится в режиме постобработки. Важно отметить, что перед оценкой составляющих УОЛ из накопленных данных съёмки исключаются оценённые фильтром Калмана значения параметров модели погрешностей чувствительных элементов.

Заключение. В работе проведён анализ вариантов формирования измерений при решении задачи векторной гравиметрии инерциально-геодезическим методом. Рассмотрены варианты

формирования измерений по координатам, ускорениям и углам ориентации, упоминаемые в отечественной и зарубежной литературе. Подчеркнута возможность использования глобальных карт ГПЗ для учёта длинноволновых составляющих УОЛ. Отмечено, что дополнительным источником погрешности построения астрономической вертикали является использование не истинных значений радиуса Земли, а значений референц-эллипсоида.

Состав погрешностей в рассматриваемых вариантах формирования измерений по координатам, углам ориентации и ускорениям идентичен, за исключением наличия дополнительной погрешности в измерениях по ускорениям, обусловленной необходимостью двойного дифференцирования данных ПА СНС.

Также следует иметь в виду, что все рассматриваемые варианты формирования измерения позволяют достичь высокой точности определения УОЛ при условии использования высокоточной ИНС, обладающей малым уровнем высокочастотных погрешностей, и постобработки полученных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Проблема уклонения отвесной линии в высокоточной инерциальной навигации. Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №4 (111). С. 3–15. DOI 10.17285/0869-7035.0046.
2. **Л.П.Несенюк, Л.П.Старосельцев, Л.Н.Бровко** Определение уклонений отвесных линий с помощью инерциальных навигационных систем. Памяти профессора профессора Л.П. Несенюка. Избранные труды и воспоминания. – Санкт-Петербург, : Электроприбор, 2010. – 227 с.
3. **Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Августов Л.И., Блажнов Б.А., Болотин Ю.В., Вершовский А.К., Витушкин Л.Ф., Вязьмин В.С., Гайворонский С.В., Голован А.А., Евстифеев М.И., Емельянцева Г.И., Железняк Л.К., Конешов В.Н., Носов А.С. и др.** Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли. 2017. 390 с.
4. **Емельянцева 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(90). С. 72–81. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.3.072-081.
5. **Johann F., Becker D., Becker M., Forsberg R., Kadir M.** The Direct Method in Strapdown Airborne Gravimetry – a Review. DOI 10.12902/zfv-0263-2019.
6. **Jekeli C., Garcia R.** (1997): GPS phase accelerations for moving-base vector gravimetry. In: Journal of Geodesy 71: 630–639. DOI: 10.1007/s001900050130.
7. **Dongkai Dai, Xingshu Wang, Dejun Zhan, Shiqiao Qin, Zongsheng Huang.** Dynamic Measurement of High-frequency Deflections of the Vertical Based on the Observation of INS/GNSS Integration Attitude Error. Journal of Applied Geophysics. 2015. Vol. 119. P. 89-98. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.05.010.
8. **Каракашев В.А.** Обобщенные уравнения ошибок инерциальных навигационных систем - Изв. ВУЗов СССР - Приборостроение, 1973, №3.
9. **Тимочкин С.А.** Методические погрешности построения астрономической вертикали в инерциальной навигационной системе, демпфируемой от измерителя скорости относительно Земли. Сборник работ XV конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» СПб.: ЦНИИ “Электроприбор”, 2013.
10. **Jekeli C.** Vector gravimetry using GPS in free-fall and in an earth-fixed frame. 1992. Bull Geod 66, P. 54-61.
11. **Kwon JH, Jekeli C.** A new approach for airborne vector gravimetry using GPS/INS. 2001. Journal of Geodesy no. 74. P. 690-700.

N. G. Skidanov (Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg), A. V. Bezdetko (ITMO University, Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg). **On the formation of measurements in solving the problem of vector gravimetry.**

The methods of forming measurements in solving the problem of determining the gravity anomaly vector on a moving base by the inertial geodesic method are considered. A comparative analysis of measurement options found in Russian and foreign sources is carried out. Their advantages and disadvantages are evaluated.

УДК 621.391.172

В. А. ВАСИЛЬЕВ

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

ОТБРАКОВКА ИЗМЕРЕНИЙ ГРАВИМЕТРА С ДВОЙНОЙ КВАРЦЕВОЙ УПРУГОЙ СИСТЕМОЙ

Предложены новые критерии отбраковки измерений гравиметра с двойной кварцевой упругой системой, базирующиеся на основе статистического анализа разности показаний одинарных систем. Проведена оценка эффективности предложенных критериев, в том числе сравнение с традиционным пороговым критерием.

Введение. С целью изучения поля силы тяжести широкое применение находят гравиметрические съемки, выполняемые с борта морских и воздушных носителей. Основной проблемой, возникающей при проведении таких измерений, является то, что порожденные движением носителя ускорения на несколько десятичных порядков превосходят искомые аномалии силы тяжести [1]. Для повышения производительности гравиметрических работ съемки выполняются с борта носителей различных типов, в том числе и в сложных погодных условиях [1,2]. В связи с этим актуальной становится задача отбраковки некондиционных измерений гравиметра. К текущему моменту разработаны алгоритмы отбраковки, позволяющие определять участки неравномерного движения на основе высоких значений невязок между прогнозными и поступающими измерениями от спутниковой навигационной системы [3,4]. Специфика настоящей работы состоит в том, что в ней рассматриваются критерии отбраковки, основанные на данных, поступающих с гравиметра с двойной кварцевой упругой системой, не использующие измерения сторонних источников.

Описание исследуемого порогового критерия. Основу чувствительного элемента гравиметров серии «Чекан» составляет двойная кварцевая система крутильного типа [1,5]. Система состоит из двух идентичных маятников на торсионном подвесе, расположенных горизонтально навстречу друг другу. Использование такой двойной системы позволяет на уровне чувствительного элемента исключить совместное влияние горизонтальных и вертикальных возмущающих ускорений на показания гравиметра. Результатом измерения приращения силы тяжести для двойной кварцевой системы является сумма показаний $m_1 + m_2$, входящих в ее состав одинарных кварцевых систем (m_1 , m_2 показания в пикселах, соответствующие углам поворота маятников, на выходе оптоэлектронного преобразователя для первой и второй упругих систем, соответственно). Традиционный критерий отбраковки недостоверных измерений основан на контроле модуля разности показаний (РП) одинарных кварцевых систем и может быть выражен формулой:

$$\left| m_1 - m_2 - \Delta_0^m \right| < 5 \text{ пикс}, \quad (1)$$

где Δ_0^m - исходная разность показаний одинарных кварцевых систем, которая определяется перед началом гравиметрической съемки.

Такой пороговый критерий отбраковки прост в реализации, но имеет существенные недостатки. На рис. 1 показан график разности показаний упругих систем в процессе гравиметрической съемки. Желтые линии характеризуют пороговый критерий, а красные прямоугольники показывают области,

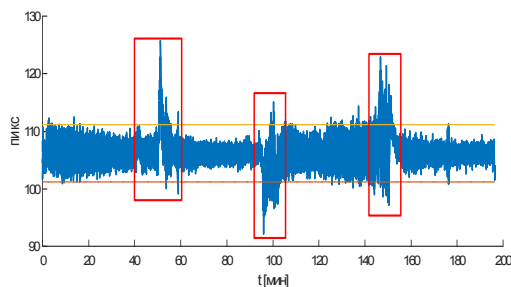


Рис 1. Разность показаний одинарных кварцевых систем при равномерном прямолинейном движении и при маневрах

где происходит смена курса и, соответственно, показания гравиметра некорректны из-за появления дополнительных погрешностей двухосной гироплатформы гравиметра.

Из рис. 1 видно, что пороговый критерий не полностью отбраковывает некорректные показания (т.е. присутствуют «плохие» срабатывания, когда показания не корректны, а критерий их пропускает), и частично отбраковывает корректные (т.е. допускает «неверные» срабатывания), вызванные повышенным уровнем вертикальных перемещений.

Для повышения адекватности критерия отбраковки возникает необходимость проведения анализа достоверности на некоторых временных интервалах. Исходные данные делились на участки $I_j(\Delta t)$ продолжительностью Δt . Рассматривались различные интервалы времени $\Delta t = 600\text{с}$, $\Delta t = 300\text{с}$, $\Delta t = 150\text{с}$, $\Delta t = 60\text{с}$, и $\Delta t = 30\text{с}$, характеризующие длительность анализируемых последовательностей разности показаний одинарных кварцевых систем (далее - последовательностей разности показаний – последовательностей р.п.). На каждом из участков $I_j(\Delta t)$ строились последовательности р.п. $\{\Delta m_j(\Delta t)\}$, $j = 1, \dots, L$, где $L = \Delta T \cdot 10 / \Delta t$ (ΔT - продолжительность гравиметрической съемки в секундах).

Описание предлагаемых статистических критериев. С целью повышения эффективности отбраковки некондиционных данных гравиметра предложено два критерия, основанных на статистическом анализе значений разности показаний кварцевых систем. Первый - основан на проверке гипотезы об однородности соседних по времени центрированных последовательностей $\{\Delta m_j(\Delta t)\} - \overline{\Delta m_j}$ и $\{\Delta m_{j+1}(\Delta t)\} - \overline{\Delta m_{j+1}}$, где $\overline{\Delta m_j}$ - среднее значение $\{\Delta m_j(\Delta t)\}$, т.е. сумма всех элементов последовательности РП. $\{\Delta m_j(\Delta t)\}$, деленная на n - число элементов в ней. Проверка проводится по критерию Вилкоксона со стандартизированной Z -статистикой и уровнем значимости $\alpha = 0.1$, т.е. проверка гипотезы о том, что функции распределения вероятности соседних центрированных выборок совпадают [6].

Второй критерий основан на проверке гипотезы о том, что последовательность РП $\{\Delta m_j(\Delta t)\}$ представляет собой выборку значений нормально распределенной случайной величины с заранее определенными значениями дисперсии и мат. ожидания, первые два момента которой определяются с помощью метода максимального правдоподобия. Гипотеза проверяется с помощью критерия согласия Пирсона, со статистикой, соответствующей χ^2 распределению с 97-степенями свободы и уровнем значимости $\alpha = 0.01$ [7]. Такая статистика выбрана из-за необходимости рассматривать не менее 100 интервалов для построения выборочной вероятности значений последовательности р.п., так как эти значения в среднем находятся в области шириной в 10 пикс. (см. пороговый критерий) и ширина каждого интервала соответствует 0.1 пикс., что примерно соответствует интервалу в 0.3 мГал, который близок к нижнему пределу точности гравиметрической съемки на подвижном основании. Увеличение числа интервалов ведет к возрастанию вычислительной сложности критерия, не приводя при этом к росту эффективности.

Сопоставление. Сопоставление эффективности предложенных критериев выполнялось по материалам реальной гравиметрической съемки (см. таблицу 1). В ячейках таблицы приведено суммарное время «неверных» срабатываний, а также суммарное время «плохих» срабатываний, для каждого из критериев при различных длительностях последовательностей РП Δt . При этом СКО вертикальных ускорений для всех анализируемых профилей съемки составляло 24 Гал, их продолжительность - 12000 с, из них продолжительность некондиционных данных гравиметра - 2700 с. В идеале критерий не должен допускать «плохих» и «неверных» срабатываний. При этом «плохие» срабатывания дают на выходе некорректные результаты съемки, а «неверные» приводят к потере достоверных данных.

Из представленных результатов следует, что статистические критерии можно применять, при анализе последовательностей разностей показаний упругих систем $\{\Delta m_j(\Delta t)\}$ на интервалах времени с выше 150 с. При меньшей длине анализируемых последовательностей резко растет число «плохих» срабатываний, что ведет к получению некорректного результата

при обработке гравиметрической съемки. Также стоит отметить, что при увеличении продолжительности анализируемых последовательностей увеличивается число «неверных» срабатываний за счет того, что статистические критерии принимают или отвергают данные на всей последовательности $\{\Delta m_j(\Delta t)\}$ в случае критерия Пирсона или на двух соседних последовательностях в случае критерия Вилкоксона. Критерий Пирсона на практике имеет больше ложных срабатываний и работает хуже из-за того, что последовательность р.п. $\{\Delta m_j(\Delta t)\}$ проверяется на соответствие нормальному распределению с четко определенными значениями дисперсии и математического ожидания.

Т а б л и ц а 1

Результаты работы автоматической отбраковки измерений при различных значениях интервала Δt

Δt	Критерий Пирсона «неверные» / «плохие» (с)	Критерий Вилкоксона «неверные» / «плохие» (с)	Пороговый критерий «неверные» / «плохие» (с)
600 с	2100 с/ 600с	3600 с/ 0с	534 с/ 1500с
300 с	600 с/ 900с	1200 с/ 0с	534 с/ 1500с
150 с	300 с/ 1650с	150 с/ 300с	534 с/ 1500с
60 с	60 с/ 2280с	0 с/ 1140с	534 с/ 1500с
30 с	30 с/ 2460с	60 с/ 2100с	534 с/ 1500с

Заключение. Предложены алгоритмы отбраковки измерений гравиметра с помощью критериев, основанных на статистическом анализе значений разности показаний кварцевых систем, без использования дополнительных измерений. Проведена оценка эффективности предложенных алгоритмов отбраковки. Показано, что алгоритм на основе критерия Пирсона менее эффективен по сравнению с алгоритмом на основе критерия Вилкоксона. Для последнего найдены уровни достоверности гипотезы об однородности и получены значения интервала времени, определяющие размер выборки для статистического анализа, при которых предложенный алгоритм показывает более высокую эффективность по сравнению с критерием используемым в настоящее время. Предложенные алгоритмы могут быть использованы как при гравиметрической съемке, так и при решении задачи навигации с использованием гравитационного поля.

*Работа проводилась при поддержке гранта РНФ 18-19-00627,
<https://rscf.ru/project/18-19-00627/>*

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В. Г.** Современное состояние и перспективы развития отечественной морской гравиметрии / В. Г. Пешехонов, А. В. Соколов, А. А. Краснов // 11-я Российская мультиконференция по проблемам управления : материалы пленарных заседаний, Санкт-Петербург, 02–04 октября 2018 года / АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – Санкт-Петербург: "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор", 2018. – С. 6-16.
2. **Краснов А. А.** Опыт выполнения гравиметрических измерений с борта дирижабля / А. А. Краснов, А. В. Соколов, Н. Н. Ржевский // Сейсмические приборы. – 2014. – Т. 50. – № 4. – С. 36-42.
3. **Носов А.С., Моторин А.В.** Оценивание аномалии силы тяжести в морских условиях с отбраковкой измерений. // Материалы XXI КМУ «Навигация и управление движением». 2019 г.
4. Краснов, А. А. Разработка и внедрение методики обработки аэрогравиметрических измерений / А. А. Краснов, А. В. Соколов // Навигация и управление движением : материалы докладов X Юбилейной конференции молодых ученых, Санкт-Петербург, 11 марта – 26 сентября 2008 года / под общей редакцией: В.Г. Пешехонова, О.А. Степанов (научный редактор). – Санкт-Петербург: ЦНИИ "Электроприбор", 2008. – С. 193-198.
5. **Соколов, А. В.** Автоматизация технологии изготовления кварцевой упругой системы мобильного гравиметра / А. В. Соколов, А. А. Краснов, А. Б. Коновалов // Гиропропия и навигация. – 2021. – Т. 29. – № 2(113). – С. 35-46. – DOI 10.17285/0869-7035.0061.
6. **Гмурман В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.
7. **Кулльдорф Г.** Введение в теорию оценивания по группированным и частично группированным выборкам. М.: Наука, 1966. - 176 с

V.A.Vasilev (State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg, State Electrotechnical University "LETI" , St. Petersburg). **Rejection of measurements of a gravimeter with a double quartz elastic system.**

New criteria for rejecting measurements of a gravimeter with a double quartz elastic system are proposed, based on a statistical analysis of the difference in the readings of single systems. The effectiveness of the proposed criteria was evaluated, including a comparison with the traditional threshold criterion.

К. В. ДУНАЕВСКАЯ

(Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского Уральского отделения РАН,
Екатеринбург)**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА ВЫЧИСЛЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОЧНОСТИ В ЗАДАЧЕ НАВИГАЦИИ ПО ПОЛЮ
МИКРОРЕЛЬЕФА**

Исследуется ранее предложенный метод вычисления текущей характеристики точности поискового корреляционно-экстремального алгоритма решения задачи навигации по полю микрорельефа. Метод основан на определении диаметра множества заданного уровня функционала сопоставления измеренного фрагмента поля и фрагментов, полученных из эталонной карты. Приводятся результаты сравнения предложенного способа и байесовского метода оценивания.

Введение. Одним из известных способов решения задачи коррекции ошибок инерциальной навигационной системы (ИНС) является применение корреляционно-экстремального метода навигации по полю высот рельефа земной поверхности [1,2].

Ранее в работе [3] были приведены результаты исследования предложенного метода вычисления текущей характеристики точности поискового корреляционно-экстремального алгоритма решения задачи навигации применительно к картам трёх геофизических полей: полю глубин моря, полю аномалий силы тяжести и аномальному магнитному полю.

Настоящий доклад посвящен применению вышеупомянутого метода к задаче навигации по полю микрорельефа [4], которое образовано высотами объектов, находящимися на рельефе, и которое применяется для навигации маловысотных летательных аппаратов. Целью доклада, как и в работе [3], является исследование метода оценки ошибки коррекции поискового алгоритма и его сравнение с оптимальным байесовским методом [5,6].

Методы вычисления текущей характеристики точности коррекции координат по картам геофизических полей. В докладе основным предметом исследования является корреляционно-экстремальный метод коррекции навигационных ошибок ИНС, который дополняется способом оценки ошибки коррекции, основанным на анализе функционала сопоставления [3]. Исследование заключается в сравнении предложенного способа с алгоритмом, построенном на основе байесовской теории фильтрации [5,6].

Постановка задачи оценивания координат по данным измерений поля аналогична [3]. При этом оценка вектора состояния $\tilde{x}_\Pi(\varphi)$ определяется в результате поиска минимума квадратичного функционала $\Phi_\varphi(x)$ [3].

Анализ функционала заключается в нахождении множества Φ_p -уровня $\{x: \Phi_\varphi(x) \leq \Phi_p\}$ для порога Φ_p и вычислении диаметра этого множества (как максимального расстояния между точками множества):

$$2 \cdot \rho_{max} = D_{max} = diam\{x: \Phi_\varphi(x) \leq \Phi_p\}.$$

Величина ρ_{max} называется D_{max} -оценкой. Порог Φ_p вычисляется по формуле $\Phi_p = \frac{\Phi(\tilde{x}_\Pi(\varphi))}{r_p}$, где r_p – параметр метода ($0 < r_p < 1$), рассчитываемый заранее по карте поля.

Величина $\rho_{max} = D_{max}/2$ служит оценкой точности коррекции поискового алгоритма, которая может быть вычислена на борту и использована для принятия решения о коррекции во время движения. С помощью ρ_{max} можно построить решающее правило коррекции следующим образом: если величина ρ_{max} не превышает значение априорно допустимой радиальной ошибки определения координат ИНС R_{max} , то принимается гипотеза о правильной коррекции, в противном случае происходит отказ от коррекции.

В настоящей работе ранее изложенный способ оценивания сравнивается с алгоритмом, основанным на байесовской теории нелинейной фильтрации [5,6], в соответствии с которым оценка точности коррекции вычисляется по формуле:

$$r_B(\delta) \approx \sqrt{P_{x_1x_1} + P_{x_2x_2}},$$

где $P_{x_1x_1}$ и $P_{x_2x_2}$ – компоненты ковариационной матрицы, соответствующие ошибкам оценивания координат.

Описание и результаты вычислительного эксперимента. Вычислительный эксперимент проводился по картам высот микрорельефа участка городской застройки (рис. 1).

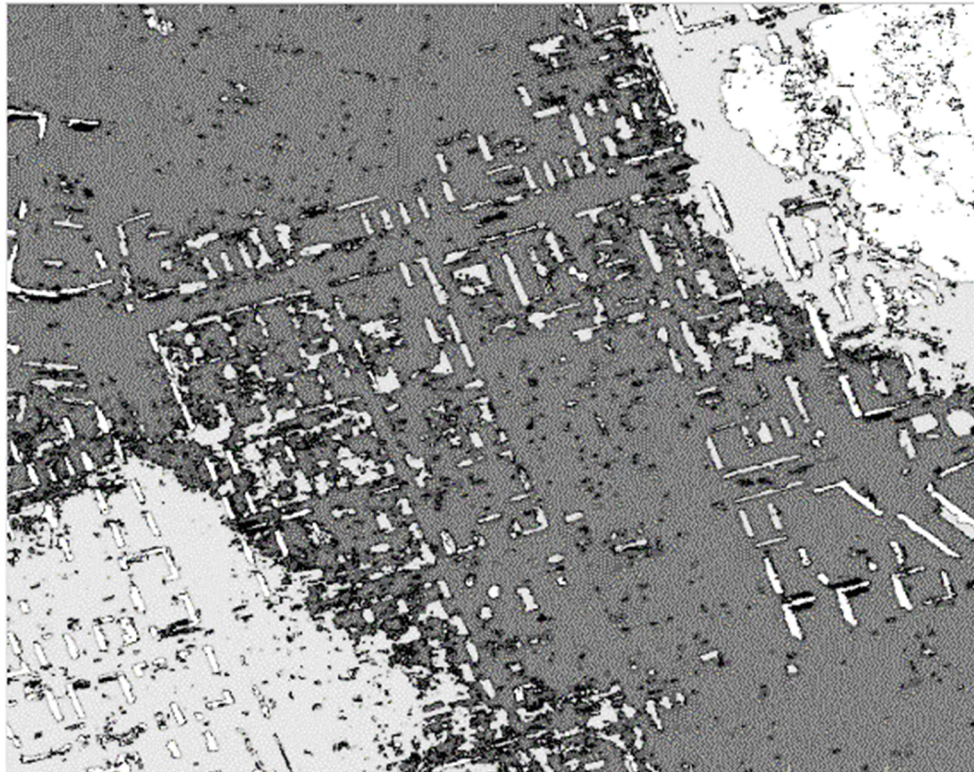


Рис. 1. Матрица высот участка 1 городской застройки размером 2×2 км, с шагом 1м

В табл. 1 приведены результаты методического эксперимента, в котором вектор погрешностей ξ формировался как гауссовский независимый вектор.

Т а б л и ц а 1

Результаты работы поискового и байесовского алгоритмов в случае независимых гауссовских ошибок

Усреднённые оценки	Коррекция по микрорельефу
Действительная ошибка поискового алгоритма (2), $\bar{\delta}_П$, м	0.4635
D_{max} -оценка точности поискового алгоритма, $\bar{\rho}_{max}$, м	0.4725
Действительная ошибка байесовского алгоритма (6), $\bar{\delta}_Б$, м	0.3955
Расчётная точность байесовского алгоритма, $\bar{r}_Б$, м	0.3359

Из табл. 1 видно, что D_{max} -оценка в этом эксперименте близка к действительной средней погрешности поискового алгоритма, а D_{max} -оценка точности корреляционно-экстремального алго-

ритма близка к байесовской расчетной оценке точности аппроксимации оптимального алгоритма.

Заключение. Применительно к полю микрорельефа рассмотрен предложенный ранее способ оценки ошибок корреляционно-экстремального метода коррекции. Путём вычислительного эксперимента проведено сравнение предложенного метода оценки точности с байесовским методом, основанным на вычислении ковариационной матрицы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов О. А. и А. Б. Торопов, Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 2 Современные тенденции развития. Гироскопия и навигация, 2015. № 4 (91). С. 147-159.
2. Степанов О. А. и А. Б. Торопов, Методы нелинейной фильтрации в задаче навигации по геофизическим полям. Ч. 1. Обзор алгоритмов. Гироскопия и навигация, 2015. № 3 (90). С. 102-125.
3. Дунаевская К. В. Исследование метода вычисления текущей характеристики точности в задаче навигации по картам геофизических полей / К. В. Дунаевская, Л. В. Киселев, В. Б. Костоусов // Гироскопия и навигация. — 2021. — Т. 29. — № 1 (112). — С. 52-69. DOI: 10.17285/0869-7035.0056.
4. Костоусов, В.Б. Метод коррекции навигационных ошибок по полю высот объектов местности / В.Б.Костоусов, К.В.Дунаевская // Материалы XXXI конф. памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н.Острякова. – СПб. : АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. С.218-227.
5. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания / Изд. 2-е, исправлен. и дополнен. / О.А.Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. - 509 с. ISBN 978-5-900780-81-8
6. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.2. Введение в теорию фильтрации / О.А.Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2012.- 417 с.

К. В. Dunaevskaya (Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of RAS, Yekaterinburg)
Study of a Method for Calculating the Current Accuracy In Map-Aided Navigation Problem The Microrelief Field

УДК 681.51

Д.Р. УЖВА

(Институт проблем машиноведения РАН, Научно-образовательный центр
«Математическая робототехника и искусственный интеллект», Санкт-Петербург)**«ОПОЗНАНИЕ ПО СЖАТИЮ» РАЗРЕЖЕННЫХ МАГНИТОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ**

Предложен алгоритм сжатия магнитометрических данных на основе метода «опознания по сжатию» (Compressed Sensing), позволяющий за счёт разреженности сигнала преодолеть ограничение теоремы Котельникова о шаге его дискретизации. Подход является альтернативой популярному алгоритму сжатия LZMA (Lempel-Ziv-Markov chain-Algorithm), используемому в формате архивации ZIP. Продемонстрирован пример сжатия и восстановления магнитометрического сигнала: метод опознания по сжатию опередил алгоритм LZMA по степени сжатия при сохранении качества восстанавливаемого сигнала.

Введение. Дискретизация при регистрации непрерывного аналогового сигнала, как правило, осуществляется в соответствии с известной теоремой Котельникова-Найквиста, ограничивающей минимальную частоту дискретизации. Нарушение этого ограничения в общем случае ведёт к потере качества сигнала, восстановленного из дискретных отсчётов. Однако для частного случая разреженных сигналов восстановление исходного сигнала без существенных потерь оказывается возможным благодаря рандомизации при его дискретизации и сжатии.

«Опознание по сжатию» (Compressed Sensing, CS, также встречается вариант «опознание со сжатием») [1, 2, 3, 5] предлагает реализацию сжатия для разреженных сигналов при помощи матрично-векторного преобразования исходных данных в базис меньшей размерности и их восстановление при помощи решения задачи оптимизации. Название метода [5] отражает одно из главных преимуществ этого подхода: возможность сжимать данные «на лету», по мере их регистрации. При этом, ввиду линейности операции сжатия, метод также позволяет производить анализ сжатых данных также «на лету». Принцип метода заключается в следующем: если некоторый сигнал f , представленный в виде вектора из \mathbb{R}^N (где \mathbb{R} — множество вещественных чисел), является s -разреженным в некотором базисе $\Psi \in \mathbb{R}^{N \times N}$, то есть $f = \Psi x$, где x вектора x не более s ($s \ll N$) ненулевых компонент, то он представим в виде вектора меньшей размерности следующим образом:

$$y = \Phi \Psi x, \quad (1)$$

где Φ — так называемая матрица измерений $m \times N$ ($m \ll N$) с рандомизированными (известными, но полученными при помощи генератора псевдослучайных чисел) элементами, $y \in \mathbb{R}^m$ — вектор сжатых наблюдений. Разреженный исходный сигнал позволяет ввести ограничение на решения в виде минимума ℓ_1 -нормы этого сигнала, что позволяет решить плохо обусловленную задачу, формулируемую уравнением (1).

В свою очередь алгоритм LZMA [4] использует символьное кодирование, хорошо подходящее для сжатия данных, представленных в целочисленном виде: например, тексты и некоторые изображения с низкой разрядностью. При этом данные с дробными компонентами (представимыми числами с плавающей точкой) имеют сравнительно мало повторяющихся элементов, что приводит к низкой эффективности алгоритма LZMA.

Магнитометрические данные [6, 7] представляют собой сигнал, удовлетворяющий определению разреженности при его представлении в Фурье-базисе, при этом компоненты сигнала кодируются числами с плавающей точкой. Таким образом, теоретически сигналы магнитометрической разведки можно сжимать и восстанавливать с незначительными потерями при помо-

щи метода опознания по сжатию, при этом его эффективность будет значительно выше эффективности алгоритма LZMA.

Постановка задачи, экспериментов и результаты. Задача состоит в сравнении степени сжатия алгоритмов CS и LZMA и оценке потерь качества восстанавливаемого сигнала на примере магнитометрического сигнала, полученного при помощи моделирования.

Условия сравнения и моделирование. При помощи геофизического симулятора Fatiando a Terra в статье [8] был получен образец магнитометрических данных, представленных одномерной волновой формой, который будет использован далее. Предварительно над данными было проведено преобразование Фурье, после чего — сжатие и реконструкция с различными степенями сжатия по методу CS, и затем обратное преобразование Фурье. Рандомизированные элементы матрицы измерений Φ были получены из распределения Гаусса с математическим ожиданием 0 и дисперсией $1/\sqrt{m}$ в соответствии с [3]. Поскольку при длине сигнала $N = 10000$ в Фурье-базисе при помощи оконного преобразования был найден 51 пик, то разреженность сигнала $s = 51$, а (исходя из [1, 2, 3]) $m \geq 4 * 51 * \ln(10000/51) \approx 1000$, что соответствует удовлетворительным степеням сжатия со значением до 10. Значение m , таким образом, задаёт количество строк в матрице Φ , в то время как количество столбцов равно длине исходного сигнала N . Всего было проведено 5 экспериментов со степенями сжатия R от 2 до 10 с шагом 2. Также файл с данными о сигнале был отдельно сжат в архив формата ZIP, использующий алгоритм LZMA.

Результаты. На Рисунке 1 представлен исходный сигнал, а также два примера сигналов, восстановленных со степенями сжатия $R = 2$ и $R = 10$. На Рисунке 2 представлен увеличенный фрагмент исходного и восстановленных сигналов. Видно, что при малой степени сжатия детально сохраняется форма сигнала, в то время как при больших — сохраняются только общие признаки (как правило, низкочастотные, так как низкочастотные пики имеют наибольшую высоту в Фурье-базисе). Для численной оценки расхождения между исходным и сжатыми сигналами было вычислено расстояние между ними по норме ℓ_2 : значения нормы линейно варьируются от 2.5 для $R = 2$ до 10.9 для $R = 10$.

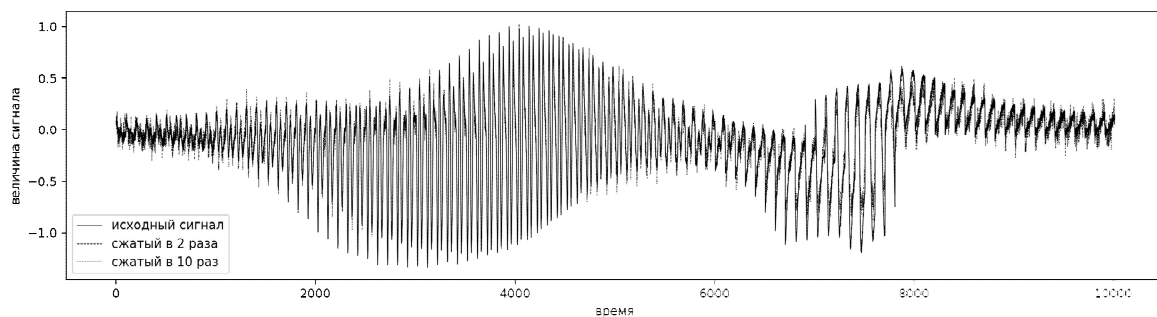


Рис. 1. Полный исходный сигнал в сравнении с восстановленными при разных степенях сжатия

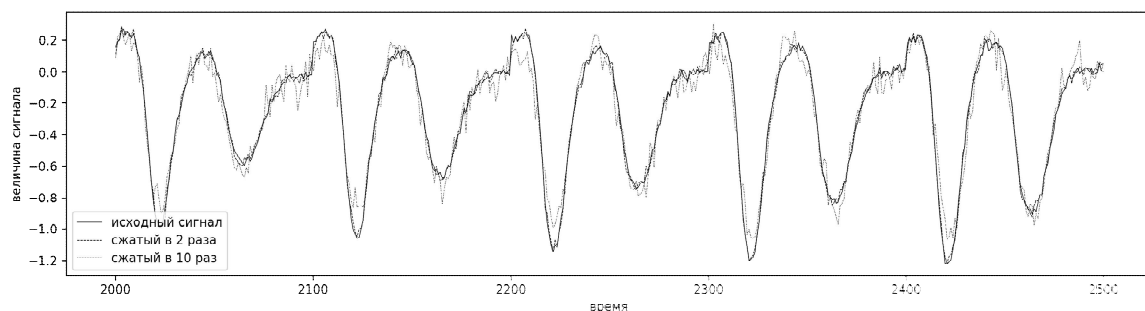


Рис. 2. Фрагмент исходного сигнала в сравнении с восстановленными при разных степенях сжатия

С использованием алгоритма LZMA сигнал удаётся сжать с 40 до 38 килобайт, что соответствует степени сжатия 1,05 раз.

Заключение. Таким образом, при помощи разработанного алгоритма на основе метода «опознания по сжатию» продемонстрирована эффективность этого подхода в сравнении с классическим алгоритмом LZMA применительно к магнитометрическим сигналам. При малых степенях сжатия восстановленный сигнал отличается от исходного незначительно, в то время как большие степени сжатия приводят к ощутимым отклонениям от оригинала. В будущем улучшить качество восстановления можно при помощи методов машинного обучения, активно используемых в «опознании по сжатию».

Работа проводилась при поддержке гранта РФФ № 21-19-00516 ИПМаш РАН

ЛИТЕРАТУРА

1. Candès E. J., Romberg J., and Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2006. Vol. 52, № 2, P. 489–509.
2. Donoho D. L. Compressed sensing. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2006. Vol. 52, № 4, P. 1289–1306.
3. Granichin O., Uzhva D., Volkovich Z. Cluster Flows and Multiagent Technology. *Mathematics*. 2020. Vol. 9, № 1. P. 22.
4. Horita A., Loubach D. and Bonna R. Analysis and Identification of Possible Automation Approaches for Embedded Systems Design Flows. *Information*. 2020. Vol. 11, P. 120.
5. **Граничин О.Н., Павленко Д.В.** Рандомизация получения данных и ℓ_1 -оптимизация (опознание со сжатием). *Автоматика и телемеханика*, 2010. № 11, С. 3–28.
6. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации. СПб: ЦНИИ «Электроприбор», 2003. С. 370.
7. **Литманович Ю.А., Вершовский А.К., Пешехонов В.Г.** Гироскоп на основе явления ядерного магнитного резонанса: прошлое, настоящее, будущее. В сборнике: Материалы пленарного заседания 7-й Российской мультиконференции по проблемам управления ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». Санкт-Петербург, 2014. С. 35–42.
8. Uieda L., Oliveira Jr. V. and Barbosa V. Geophysical tutorial: Euler deconvolution of potential-field data. *The Leading Edge*. 2014. Vol. 33, P. 448.

D.R. Uzhva (Institute of Problems of Mechanical Engineering Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg) (Saint Petersburg University, Saint Petersburg). **Compressed sensing in sparse magnetometry data shrinkage**

Abstract. A compressed-sensing-inspired algorithm for magnetometry survey signal shrinkage is proposed. The method allows compressing sparse data with higher compression rates than the Nyquist barrier allows. The approach is compared to the LZMA data compression algorithm, used for ZIP archive file format. Advantages of compressed sensing over LZMA are demonstrated on numerical simulations: compressed sensing is able to handle larger compression rates than LZMA without significant loss in reconstruction quality.

В АВТОРСКОЙ РЕДАКЦИИ
УДК 007.03

В. А. ЕРОФЕЕВА, А. Н. СЕРГЕЕНКО
(Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург)

М. Б. ТУРСУНОВА
(Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург)

УСКОРЕННЫЙ РАНДОМИЗИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ТРЕКИНГА

Предлагается ускоренная версия рандомизированного алгоритма стохастической аппроксимации с одновременным возмущением. Основным отличием от существующих работ является фокус на нестационарную постановку задачи и наличии неизвестных, но ограниченных возмущений. Приведены результаты моделирования для подтверждения работоспособности алгоритма.

Введение. Трекинг или задача отслеживания нескольких целей является классической задачей в обработке сигналов, которая возникает во многих приложениях, например, в управлении морским или воздушным движением [1]. Решение задачи может быть получено путем решения задачи оптимизации. На сегодняшний день известно огромное количество работ, посвященных выпуклой оптимизации, в том числе для решения стохастических задач. Тем не менее, в нестационарных постановках, когда оптимальное значение искомого параметра изменяется с течением времени, эффективность работы существующих алгоритмов в реальном времени при большой размерности является открытым вопросом. В оптимизации активно используются различные техники ускорения алгоритмов, широкий обзор таких решений представлен в [2]. Фокус рассматриваемой работы направлен на создание модификации широко известного алгоритма рандомизированной стохастической аппроксимации [3] с использованием ускорения по Нестерову. Отличительными чертами задачи является ее нестационарность и присутствие неизвестных, но ограниченных возмущений в измерениях.

Постановка задачи. Рассмотрим множество, состоящее из n сенсоров. Сенсоры расположены на некоторой территории с целью мониторинга движущихся объектов (целей). Введем обозначения: $N = \{1, 2, \dots, n\}$ – множество всех сенсоров, d – размерность пространства в котором перемещаются цели и сенсоры, $\mathbf{s}_t^i = [s_t^{i,1}, \dots, s_t^{i,d}]^T$ – известный вектор координат сенсора i в момент времени t , $M = \{1, 2, \dots, m\}$ – множество всех целей, $\mathbf{r}_t^l = [r_t^{l,1}, \dots, r_t^{l,d}]^T$ – вектор координат цели l в момент времени t , $\boldsymbol{\theta}_t = \text{col}(\mathbf{r}_t^1, \dots, \mathbf{r}_t^m)$ – общий вектор состояния всех целей в момент времени t .

В каждый момент времени t сенсоры независимо друг от друга измеряют квадрат расстояния до одного случайно выбранного объекта слежения (цели) из всех попадающих в их область видимости:

$$z_t^{i,l} = \|\mathbf{r}_t^l - \mathbf{s}_t^i\|^2 + w_t^{i,l},$$

где l – идентификатор текущей цели, до которой производится измерение квадрата расстояния сенсором i , $w_t^{i,l}$ – помехи измерения. Задача состоит в нахождении оценок $\hat{\boldsymbol{\theta}}_t = \text{col}(\hat{\mathbf{r}}_t^1, \dots, \hat{\mathbf{r}}_t^m)$ истинных координат всех целей $\boldsymbol{\theta}_t$ по полученным измерениям путем минимизации следующей функции:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_t = \underset{\hat{\boldsymbol{\theta}}_t}{\text{argmin}} \sum_{l \in M} f_t(\hat{\mathbf{r}}_t^l),$$

где $f_t(\hat{\mathbf{r}}_t^l)$ – функция потерь (или качества). Например, $f_t(\hat{\mathbf{r}}_t^l) = \|\hat{\mathbf{r}}_t^l - \mathbf{r}_t^l\|^2$.

Научный руководитель д.ф.-м.н., профессор Граничин Олег Николаевич.

Ввиду невозможности выполнения поставленной задачи каждым сенсором в отдельности, связанной с ограниченностью области видимости каждого из них и неоднозначностью восстановления координат по одному типу измерений (расстоянию), получаемые измерения передаются в центр слияния и обработки данных, именуемый далее как центральный узел. Центральный узел в каждый момент времени получает измерения квадратов расстояний $z_t^{i,l}$ от d сенсоров i_1^l, \dots, i_d^l до каждой цели $l = 1..m$. Предполагается, что взаимные ориентации целей и сенсоров таковы, что процедура, аналогичная триангуляции, позволяет получить величину r_t^l по измерениям квадратов расстояний.

Для решения поставленной задачи оптимизации в работе предполагается использование метода нулевого порядка. Этот класс методов подразумевает использование измерений оптимизируемой функции и не задействует вычисление градиента и/или производных более высоких порядков. Следовательно, предполагается, что центральный узел формирует оценки координат целей $\hat{\theta}_t = \text{col}(\hat{r}_t^1, \dots, \hat{r}_t^m)$ по зашумленным измерениям оптимизируемой функции $y_t^i(x_t^l) = f_t(x_t^l) + v_t^i = \|x_t^l - r_t^l\|^2 + v_t^i$, где x_t^l – это текущая точка, в которой производится измерение функции (точки наблюдения), например, $x_t^l = \hat{r}_t^l$, v_t^i – некоторый ограниченный шум, характеристики которого определяются взаимным расположением сенсоров и характеристиками помех измерения квадратов дальностей $w_t^{i,l}$ (см. формулу (5) в [4]).

Ранее для решения поставленной задачи авторами был предложен алгоритм рандомизированной стохастической аппроксимации, который в отличие от классических методов оптимизации теоретически обоснован для применения при наличии шумов в измерениях, о которых неизвестны их статистические свойства [5]. Ввиду решения задачи в реальном времени, требуется производить процедуру оценивания за короткий промежуток времени. В связи с этим, в статье предлагается ускоренная при помощи добавления алгоритма Нестерова схема предложенного ранее алгоритма и ее сравнение с уже известными результатами.

Алгоритм решения. Рандомизация алгоритма достигается путем введения возмущения Δ_n соответствующей размерности в точку наблюдения. Возмущение является случайной величиной, заданной по закону распределения Бернулли и принимающей значения $\pm \frac{1}{\sqrt{d}}$ с вероятностью $\frac{1}{2}$. Предполагается, что оптимизируемая функция является сильно-выпуклой с константой μ и ее градиент удовлетворяет условию Липшица с константой L .

В начале работы алгоритма устанавливаются начальные значения используемых переменных: начальной оценки $\hat{\theta}_0$, шага алгоритма $h > 0$, и других вспомогательных величин, а именно: $\gamma_0 > 0, \beta > 0, \eta \in (0, \mu), \alpha_0 \in (0, 1), z_0 = \hat{\theta}_0, H = h - \frac{h^2 L}{2}$. На каждом шаге выбирается $\alpha_n \in (0, 1)$, удовлетворяющий $H - \frac{\alpha_n^2}{2\gamma_n} > 0$, где $\alpha_n \in [\alpha_x, 1)$. Схема алгоритма состоит в следующем, где n – это номер итерации:

1. Выбирается начальная точка наблюдения

$$\tilde{x}_{2n-2} = \frac{1}{\gamma_{n-1} + \alpha_n(\mu - \eta - 1)} (\alpha_n \gamma_{n-1} z_{2n-2} + \gamma_n \hat{\theta}_{2n-2})$$

2. Виртуально добавляется случайное рандомизированное возмущение для формирования двух входов для моделей наблюдения

$$x_{2n} = \tilde{x}_{2n-2} + \beta \Delta_n, \quad x_{2n-1} = \tilde{x}_{2n-2} - \beta \Delta_n,$$

где $x_{2n} = \text{col}(x_{2n}^1, \dots, x_{2n}^m)$.

3. Учитываются значения входов для моделей наблюдения и оценки с предыдущего шага

$$\tilde{x}_{2n-1} = \tilde{x}_{2n-2}, \quad \hat{\theta}_{2n-1} = \hat{\theta}_{2n-2}$$

4. Вычисляется псевдоградиент

$$g_{2n} = \Delta_n \frac{y_{2n} - y_{2n-1}}{2\beta},$$

где $y_{2n} = \text{col}(y_{2n}^1, \dots, y_{2n}^n)$.

5 Обновляется текущая оценка искомых параметров

$$\hat{\theta}_{2n} = \tilde{x}_{2n-1} - hg_{2n}$$

6. Пересчитывается вспомогательный параметр алгоритма

$$z_{2n} = \gamma_n^{-1} [(1 - \alpha_n)\gamma_{n-1}z_{2n-2} + \alpha_n(\mu - \eta - \mathfrak{D}\tilde{x}_{2n-1} - \alpha_n g_{2n})]$$

В случае, если константы из ограничений на функцию неизвестны, возможно использование их наихудших оценок. Анализ алгоритма опирается на результаты, полученные в [4] для метода оптимизации первого порядка.

Моделирование. Представленный алгоритм проверен на примере отслеживания характеристик шести движущихся целей тремя сенсорами с выбранной размерностью пространства, равной двум. Сенсоры стационарны и расположены случайным образом в интервале $[0:100;0:120]$. Цели начинают свое движение из случайно выбранной точки в интервале $[0:100;0:100]$. Динамика движения целей реализована в виде случайного блуждания, а именно $r_{t+1}^l = r_t^l + \xi_t^l$, где ξ_t^l выбран из значений равномерно распределенных величин на окружности. При моделировании установлены следующие параметры:

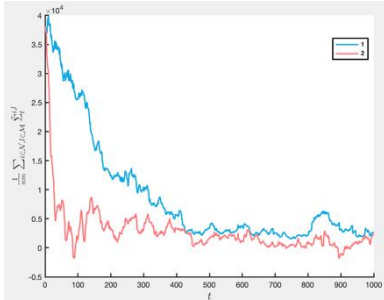


Рис. 1. Усредненные по целям и сенсорам величины ошибок. Красный – предложенный алгоритм с ускорением

При моделировании установлены следующие параметры:

$$h = 0.08, \beta = 0.1, \eta = 0.95, \alpha_x = 0.1, \gamma_0 = 2, L = 2, \mu = 2,$$

$a = 2, b = 2, c = 1$. На рисунке 1 представлены результаты сравнения предлагаемого алгоритма с версией без ускорения. Случайные величины, входящие в процесс движения и в алгоритм, установлены идентичным образом для обоих алгоритмов. Как видно из результатов, предложенная версия имеет более быструю сходимость по сравнению с алгоритмом, предложенным в [3].

Заключение. В работе представлен ускоренный стохастический алгоритм оценивания в задаче трекинга нескольких целей, работоспособный при наличии неизвестных, но ограниченных помех. Эмпирические результаты показывают более быструю скорость сходимости по сравнению с предшествующим решением в случае оптимизации строго-выпуклых функций.

Теоретическая часть работы проводилась при поддержке гранта РФФИ 20-01-00619а. Моделирование выполнено при поддержке гранта РНФ 21-19-00516.

ЛИТЕРАТУРА

1. O. Hlinka, F. Hlawatsch, and P. M. Djuric, “Distributed particle filtering in agent networks: A survey, classification, and comparison,” *IEEE Signal Processing Magazine*, 2013. 30(1), pp. 61–81.
2. d'Aspremont A, Scieur D, Taylor A. Acceleration methods. arXiv preprint arXiv:2101.09545. 2021 Jan 23.
3. O. Granichin and N. Amelina, “Simultaneous perturbation stochastic approximation for tracking under unknown but bounded disturbances,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2015. 60(6), pp. 1653–1658.
4. Erofeeva V, Granichin O, Granichina O, Proskurnikov A, Sergeenko A. Weighted spsa-based consensus algorithm for distributed cooperative target tracking. In 2021 European Control Conference (ECC) 2021 Jun 29 (pp. 1074-1079). IEEE.
5. Kosaty D, Vakhitov A, Granichin O, Yuchi M. Stochastic fast gradient for tracking. In 2019 American Control Conference (ACC) 2019 Jul 10 (pp. 1476-1481). IEEE.

V.A. Erofeeva, A.N. Sergeenko (IPME RAS, St. Petersburg), M.B. Tursunova (St. Petersburg University, St. Petersburg). **Accelerated randomized stochastic approximation algorithm for tracking.**

In this paper, an accelerated version of the randomized stochastic approximation algorithm with simultaneous perturbation is proposed. The main difference from existing works is the focus on the non-stationary formulation of the problem and the presence of unknown-but-bounded noise. The simulation results are presented to prove the convergence of the algorithm.

УДК 004.94

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

МОДЕЛЬ ТРАЕКТОРНОГО СОПРОВОЖДЕНИЯ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Рассматривается задача имитационного моделирования работы штатных алгоритмов гидроакустической системы на этапе траекторного сопровождения целей, обнаруженных фазированной антенной решёткой. Представлены основные этапы решения задачи траекторного сопровождения и математические выражения, описывающие выходные данные разработанной модели.

Введение. Задача моделирования обнаружения и траекторного сопровождения объектов находит широкое применение, как в гидроакустике, так и в смежных отраслях. Рассматриваемая модель траекторного сопровождения целей может использоваться как в рамках имитационного программного обеспечения для расчёта входных данных штатных задач комплексной обработки гидроакустических систем (ГАС), так и в составе штатного программного обеспечения учебно-тренировочного режима, либо в тренажёрах [1].

Постановка задачи. Пусть относительно ГАС, в некоторой точке, располагается шумящий объект.

Сопровождение такого объекта рассматривается в двух вариантах работы системы [2, 3]:

- *сопровождение в каналах*, при котором формирование траекторий (трасс) осуществляется в каждом канале наблюдения. Выделение каналов наблюдения характеризуется, например, частотным диапазоном, временем накопления и т.д.
- *комплексное сопровождение*, при котором на этапе траекторного сопровождения формируются усредненные параметры обнаруженных траекторий на основе данных, полученных по нескольким каналам наблюдения.

На выходе типовых алгоритмов траекторного сопровождения объекта вырабатываются факт сопровождения объекта на основных этапах траекторного анализа и следующие параметры [4,5]:

- *мощностные*: усредненные оценки отношения сигнал/помеха обнаруженного сигнала I , мощности сигнала S в полосе рабочих частот и среднеквадратическое отклонение (СКО) их оценок dI, dS ;
- *координатные*: усредненные оценки пеленга α , угла места β и СКО их оценок $d\alpha, d\beta$;
- *межцикловые*: величина изменения пеленга (ВИП) $\Delta\alpha$, величина изменения мощности сигнала ΔS и СКО их оценок $d\Delta\alpha, d\Delta S$.

Цель работы заключается в создании модели формирования выходных данных алгоритмов траекторного анализа на основе следующих входных данных:

- спектр мощности $P_{clutter}(f)$ помехи в точке размещения ГАС, в который могут входить различные составляющие, такие как ветровой, собственный, гидродинамический и иные шумы;
- положение шумящего объекта, задаваемое координатами $\mathbf{r} = \{\alpha_{obj}, \beta_{obj}, d\}$, где α_{obj} и β_{obj} – курсовой угол и угол места на источник шума, а d – дистанция до источника;

- передаточная функция волновода в лучевом приближении: $\{\beta_{ray.in}, g_{ray}, T_{ray}\}(i_{ray}) = f(\mathbf{r}, \mathbf{\Gamma})$, где $\mathbf{\Gamma}$ – гидрологические параметры волновода, i_{ray} – индекс луча, $\beta_{ray.in}$ – угол места луча на входе антенной решётки ГАС, g_{ray} – коэффициент усиления по мощности сигнала, распространяющегося по лучу ($g_{ray} < 1$), T_{ray} – время распространения сигнала по лучу.

Среди параметров ГАС задаются следующие параметры антенной решётки и параметры функционирования алгоритмов обнаружения и сопровождения:

- рабочий диапазон частот: f_{min}, f_{max} ;
- коэффициент концентрации антенной решетки: $k_{conc}(f)$;
- ширина характеристики направленности (ХН) в горизонтальной плоскости: $h_{DC.hor}(\alpha, \beta)$;
- вероятность ложной тревоги обнаружения $P_{dctd.lie}$;
- время накопления (т.е. некоторое число периодов спектрального анализа) в алгоритмах обнаружения T_{HAS} .

Модель траекторного сопровождения в гидроакустической системе. Процедура траекторного сопровождения начинается с «завязки» траектории, при которой выдача данных не производится.

Следующим этапом, в случае выполнения условия необходимого числа обнаружений, является «сопровождение» цели. Отметим, что минимальное число необходимых для завязки траектории обнаружений N_{det} и число тактов за которые они производятся N_{an} задаются в качестве параметров модели. На этом этапе рассчитываются усредненные оценки параметров траектории и выдача их потребителю.

Вероятность обнаружения шумового сигнала с учетом изменения её пеленга рассчитывается согласно выражению:

$$P = \left(1 - \prod_{r=0}^R (1 - P_{r.dctd})\right) \cdot P_{VIP} \quad (1)$$

где P – вероятность обнаружения шумового сигнала (для формирования траектории); $P_{r.dctd}$ – вероятность обнаружения шумового сигнала объекта в r -ом канале наблюдения; P_{VIP} – коэффициент учета изменения пеленга источника шума; R – число объединяемых каналов наблюдения.

Вероятность обнаружения в конкретном канале наблюдения рассчитывается согласно [6], и зависит от следующих входных данных и параметров модели:

$$P_{r.dctd} = P_{r.dctd}(P_{clutter}, \mathbf{r}, b_{ray.in}, g_{ray}, T_{ray}, f_{min}, f_{max}, k_{conc}, h_{DC.hor}, P_{dctd.lie}, T_{HAS}) \quad (2)$$

В случае если траекторный анализ производится в отдельных каналах наблюдения:

$$P = P_{r.dctd} \quad (3)$$

Величина изменения пеленга источника шума с учетом фактической ВИП $\Delta\alpha_{obj}$ и её оценки на предыдущем такте обработки $\Delta\alpha(t-1)$ вычисляется как:

$$P_{VIP}(\Delta\alpha_{obj}, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_p} \cdot \exp\left(-\frac{(\Delta\alpha_{obj} - \Delta\alpha(t-1))^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (4)$$

где t – такт обработки (время); σ_p – коэффициент, отражающий максимально допустимый ВИП шумящего объекта, задаваемый в базе данных.

Модель усредненных оценок параметров сопровождаемых траекторий задана формирующим фильтром первого порядка вида:

$$\widehat{X}(t) = \left(1 - \sqrt{\frac{T_{HAS}}{T_{acc}}}\right) \cdot \widehat{X}(t-1) + \sqrt{\frac{T_{HAS}}{T_{acc}}} \cdot X(t) \quad (5)$$

где $\widehat{X}(t)$ – усредненная оценка параметра X на t -ый такт обработки; $X(t)$ – мгновенная оценка параметра X ; T_{acc} – постоянная времени фильтра, задаваемая в базе данных.

Мгновенная оценка параметра $X(t)$ формируется как случайная величина с нормальным законом распределения:

$$X(t) = norm(X_{obj}(t), \sigma_{R.X}(t)) \quad \sigma_{R.X}(t) = \sqrt{\frac{I}{\sum_{r=0}^R \sigma_{r.X}(t)}} \quad (6)$$

где $X_{obj}(t)$ – «фактическое» значение параметра X , рассчитанное на основе текущей моделируемой тактической обстановки; $\sigma_{r.X}$ – СКО оценки параметра X в канале наблюдения r на этапе первичной обработки информации, $\sigma_{R.X}$ – СКО усредненной оценки параметра X .

В случае потери физического контакта с источником шума (отсутствие обнаружения объекта), формируются экстраполированные оценки параметров траектории объекта.

В случае если число обнаружений N_{det} за период анализа N_{an} тактов обработки не превышает пороговое значения для этапа сопровождения, производится сброс траектории, последующее сопровождение вновь начинается с этапа завязки траектории. Пороговые значения для этапов завязки и сопровождения, как правило, отличаются и задаются в качестве параметров модели отдельно.

Заключение. Разработанная модель формирования выходных данных алгоритмов траекторного анализа позволяет моделировать работу ГАС для решения задач обучения операторов гидроакустической системы в учебно-тренировочном режиме и обработки программного-алгоритмического обеспечения вышестоящих уровней обработки информации ГАС.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Корякин Ю.А., Смирнов С.А., Яковлев Г.В.** Корабельная гидроакустическая техника. Состояние и актуальные проблемы. СПб.: Наука, 2004.
2. **Воронина Н.Г., Шафранюк А.В.** Проблемные вопросы решения задач при вторичной и третичной обработке данных в системах освещения обстановки // Материалы конференции «Управление в морских системах (УМС-2018) – 2018 – С. 215–221.
3. **Шафранюк А.В., Воронина Н.Г.** Алгоритм комплексного траекторного сопровождения и классификации // Материалы конференции XII мультиконференции по проблемам управления (МКПУ-2019) – 2019 – С. 208–210.
4. **Машошин А.И., Прокопович В.В., Шафранюк А.В.** Программный имитатор для создания и эксплуатации гидроакустического комплекса подводной лодки // Морская радиоэлектроника – 2021 – С.30-34
5. **Брага Ю.А., Машошин А.И., Подшивалов Г.А.** Алгоритм информационной поддержки оператора гидроакустического комплекса подводной лодки // Морская радиоэлектроника, 2018, №3 (65), с. 8-12

6. **Прокопович В.В., Шафранюк А.В.** Имитационная модель обнаружения сигналов в пассивной гидроакустической станции // Материалы XXIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием – 2011 – С. 280-282

V.V. Prokopovich (Concern CSRI Elektropribor, JSC). **Model of targets tracking in a hydro-acoustic station**

The report considers the problem of simulation modeling of the problem of trajectory tracking of objects detected by a phased antenna array of a hydroacoustic station. The structure of the model is presented as an ontology of the most practical approaches to solving problems of trajectory analysis. In particular, the main stages of solving the problem and mathematical expressions that describe the accuracy characteristics of the simulated algorithm are considered. In conclusion, an example of modeling is given and the results obtained are analyzed. The strengths and weaknesses of the proposed model are considered.

УДК 004.94

Д. А. ДОБРИКОВ, А. В. ШАФРАНИЮК
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ПРОГРАММА ИМИТАЦИИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИГНАЛОВ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ

Рассматривается задача имитационного обеспечения отработки модемов звукоподводной связи в условиях рефракгирующей морской среды при распространении сигналов от приёмника к передатчику. В качестве исходных данных используется акустическая запись сигнала, приведённого ко входу излучающей антенны, а в качестве выходных – акустическая запись сигнала, приведённого к датчикам принимающей антенны. Задача распространения решается для лучевого приближения во временной области. Приводятся общие выражения и структура имитационной модели.

Введение. В настоящее время одним из новых технологических направлений в научно-технической сфере является создание цифровых двойников разрабатываемых изделий. Они решают задачи сокращения стоимости процесса отладки программного и алгоритмического обеспечения. В области гидроакустики и радиолокации такая задача наиболее актуальна в виду высокой стоимости получения натуральных данных и проведения отработки программного обеспечения (ПО) в реальных условиях, особенно, если системы применяются в различных акваториях Мирового океана в разное время года. В докладе рассматривается задача построения имитатора распространения гидроакустического сигнала от передающего модема до приёмного в зависимости от заданной (достаточно произвольно) гидрологии. При этом в качестве входных данных используется звуковая запись сигнала на выходе излучателя передающего модема, а в качестве выходных – записи сигналов на входе гидроакустических датчиков приёмного модема.

Существует значительное число работ, посвящённых вопросам имитации в гидроакустике, как российских, так и зарубежных авторов [1–4]. В том числе, среди них немало работ посвящено имитации сигналов в приёмных каналах фазированных антенных решёток для различных источников звука [5, 6]. При этом нужно отметить, что существующие работы рассматривают кусочно-стационарную имитацию распространения сигнала, полагая приёмник и излучатель неподвижными для некоторых отрезков времени. В предлагаемом докладе приводятся краткие сведения о работе имитационного ПО. При этом описываемое ПО позволяет имитировать отдельные временные отсчёты сигнала на входе гидроакустических датчиков с учётом непрерывного перемещения и источника, и приёмника.

Схема решения задачи. Исходными данными в задаче является выборка временных отсчётов акустического входного сигнала звукоподводной связи на излучающей антенне, включающего как последовательность синхроимпульсов, так и сигнал, содержащий данные:

$$S_{out} = \{s_{out}(i_{TS})\},$$

где S_{out} – временный отсчёты излучённого сигнала, $s_{out}(i_{TS})$ – i_{TS} -й отсчёт сигнала на выходе излучателя гидроакустического модема.

Входная выборка представляется в виде звукового файла в формате wav. В результате работы ПО формируется выходной звуковой файл в формате wav, содержащий временную выборку сигнала, прошедшего через гидроакустический волновод:

$$S_{in}(i_{SR}) = \{s_{in}(i_{SR}, i_{TS})\},$$

где S_{in} – выборка сигнала на входе гидроакустического датчика приёмного модема, $s_{in}(i_{TS})$ – i_{TS} -й временной отсчёт сигнала, i_{SR} – индекс гидроакустического датчика антенны приёмного модема.

Общая схема процесса моделирования представлена на рисунке.

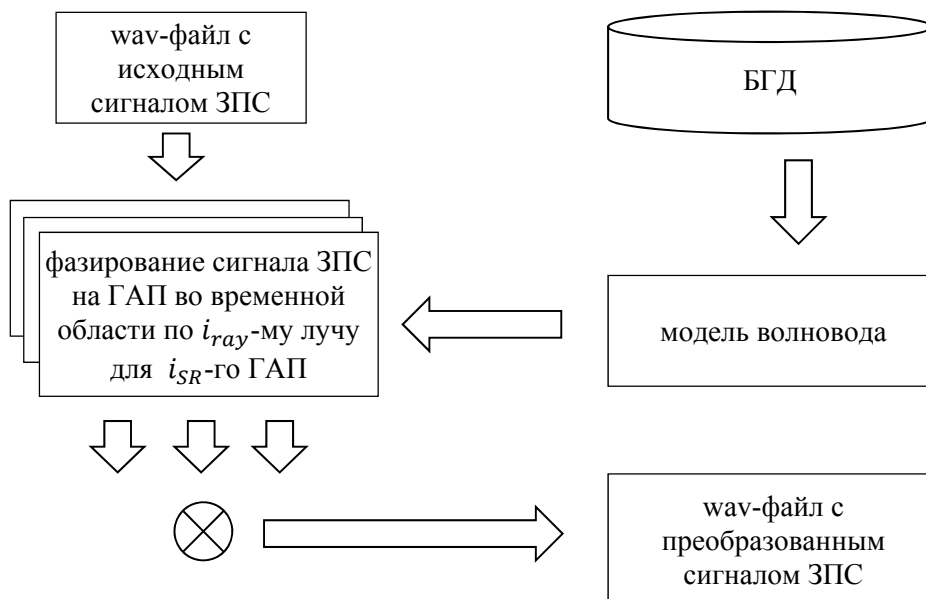


Схема решения задачи имитации распространения сигнала звукоподводной связи

На рисунке использованы следующие сокращения: ЗПС – звукоподводная связь, БГД – база гидрологических данных, ГАП – гидроакустический приёмник.

В качестве модели волновода используется лучевая, рассчитываемая с периодом 1 с имитационного времени. Причём интерполяция лучевой картины для моментов времени, соответствующим имитируемым временным отсчётам $S_{in}(i_{SR})$ производится в предположении однородности морской среды, т.е. прямолинейного распространения звука.

Заключение. В докладе представлена структура и краткое описание имитационного ПО, которое позволяет проводить отладку программного и алгоритмического обеспечения гидроакустических модемов. При этом построение имитационного ПО обеспечивает удобство работы путём проигрывания записанных звуковых файлов на входах гидроакустических датчиков реальных модемов. Необходимо отметить, что за рамками доклада остаётся вопрос калибровки уровня сигнала на входе приёмного модема, связанный как с характеристиками звуковой платы, так и с его воспроизведением в воздушной среде.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Etter, Paul C.**, Underwater acoustic modeling and simulation / Paul C. Etter/ Fifth edition. // Boca Raton : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018.
2. **Ainslie, M.A.** (2010) Principles of Sonar Performance, New York, NY: Springer Praxis.
3. **Arvelo, J.** (1998) Array response advanced model integrated simulator (ARAMIS) user's guide. John Hopkins APL, STX-98-010.
4. **Arisha Amr, Rashwan Wael.** Modeling of healthcare systems: past, current and future trends // Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference T. M. K. Roeder, P. I. Frazier, R. Szechtman, E. Zhou, T. Huschka, and S. E. Chick, eds. – 2016. Arlington, Virginia, USA. – P.1525-1534.
5. **Шафранюк А.В., Прокопович В.В.**, Модель распределённой помехи для фазированной антенной решётки//Навигация и управление движением. Материалы XXII конференции молодых ученых с международным участием. Санкт-Петербург, 2020. С. 327-329.
6. **Шафранюк А.В., Тимофеев В.Н., Копачёв О.А.**, Моделирование сигнала на выходах гидроакустических приёмников фазированной антенной решётки во временной области//Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2014). 7-я российская мультиконференция по проблемам управления: материалы конференции. ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор". 2014. С. 848-854.

D.A. Dobrikov, A.V. Shafranyuk, (Concern CSRI Elektropribor, JSC). **Program for simulation of propagation of hydro-acoustic communication signals**

The report considers the problem of simulation support for the testing of underwater communication modems. The paper considers the simulation of the propagation of acoustic underwater communication signals from a receiver to a transmitter in a refracting marine environment. Moreover, the acoustic recording of the signal from the emitting antenna is used as the initial data, and the acoustic recording of the signal from each of the sensors of the receiving antenna of the corresponding modem is used as the output data. The propagation problem itself is solved for the ray approximation in the time domain. The paper presents general expressions for the simulation model, as well as the results of the software. An analysis of the obtained results is given, as well as the scope of the simulation model and the restrictions imposed.

УДК 004.94

Д. А. ДОБРИКОВ, А. В. ШАФРАНИЮК
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ИМИТАЦИЯ РЕЖИМА ОСВЕЩЕНИЯ ЛЕДОВОЙ ОБСТАНОВКИ

Решается задача построения имитационной модели функционирования режима освещения ледовой обстановки. В частности, освещаются вопросы моделирования ледовой поверхности в соответствии с заданными параметрами и формирования выходных данных первичной обработки информации в гидроакустической системе, измеряющей параметры ледового покрова. Приводятся математические выражения для предложенных моделей, а также результаты работы программы. Анализируются полученные результаты и рассматриваются ограничения на применение предлагаемой имитационной модели.

Введение. В работе приводится решение задачи имитационного моделирования актуальной при формировании программного обеспечения стендов разработки и сопровождения гидроакустических систем и комплексов, обеспечивающих решение задач профилирования ледового покрова. Использование такого программного обеспечения позволяет отлаживать штатное программное обеспечение (ПО) без использования натуральных данных, что удешевляет и ускоряет процесс отладки. Существующие на текущий момент имитационные программы позволяют вырабатывать входные данные для различных уровней обработки информации в гидроакустических станциях [1, 2], однако вопрос имитации систем освещения ледовой обстановки в отечественной и иностранной литературе не рассмотрен. Полученное решение позволяет обеспечивать входными данными системы вторичной обработки и отображения в канале освещения ледовой обстановки для их отладки.

Постановка задачи. Используя начальные координаты и скорость носителя гидроакустической системы освещения ледовой обстановки (ГАСОЛО) необходимо сгенерировать сигналы в сформированных пространственных каналах (ПК). То есть необходимо сформировать выходную последовательность временных отсчетов, получаемую ГАСОЛО с заданного направления в пространстве. В свою очередь для этого нужно определить расстояние до пересечения заданного направления с ледовым покровом. При этом необходимо обеспечить повторяемость ледового рельефа при возвращении носителя в ранее наблюдавшиеся области. Модель льда определяется высотой верхней и нижней кромок относительно уровня моря.

Модель ледовой поверхности. К близким по тематике работам (генерации случайной ледовой поверхности с заданными параметрами) можно отнести следующие труды: [3, 4]. В силу различных причин (неудобная параметризация, быстроедействие и т.п.) был рассмотрен собственный режим генерации рельефа льда. Для обеспечения воспроизводимости рельефа для одной и той же географической точки воспользуемся свойствами псевдослучайных последовательностей, которые повторяются для одного и того же заданного зерна. Введём ряд допущений:

- форма рельефа для разного начального положения носителя будет различной. Т.е. воспроизводимость обеспечим только внутри одного модельного эпизода;
- рельеф льда будет задаваться без учёта кривизны Земли.

Модель льда определим следующим набором параметров:

$$P_{ice} = \{R_{crr}, \sigma_{width}, h_{width}\},$$

где R_{crr} – радиус корреляции (гладкость) ледовой поверхности, σ_{width} – среднеквадратическое отклонение (СКО) толщины льда (изрезанность), h_{width} – математическое ожидание толщины льда. В начальный момент времени формируется множество узловых точек в виде круга, как показано на рисунке 1 (для удобства вычислений узловые точки рассчитываются на квадратной сетке). При этом радиус выбирается как $L + R_{crr} + \Delta$, где L – максимальная горизонтальная даль-

ность действия ГАСОЛО, Δ – некоторый запас на вычислительную ошибку. При движении носителя ГАСОЛО множество рассчитываемых узловых точек дополняется теми, которые попадают в расчётный радиус корреляции, определяющий в метрах сглаженность ледового покрова. Шаг по осям Ox и Oy между узловыми точками Δ_{node} выбирается экспериментальным путём исходя из компромисса между качеством модели и вычислительными затратами. Для каждой узловой точки вычисляется высота нижней и верхней кромки льда относительно уровня моря:

$$h_{node.high} = norm\left(h_{width}\left(1 - \frac{\rho_{ice}}{\rho_{wtr}}\right), \sigma_{width}\right) \text{ и } h_{node.low} = -norm\left(h_{width}\frac{\rho_{ice}}{\rho_{wtr}}, \sigma_{width}\right),$$

где $norm(M, \sigma)$ – реализация случайного гауссового числа с математическим ожиданием M и среднеквадратической ошибкой (СКО) σ . Для обеспечения повторяемости ледового покрова для каждой узловой точки при вычислении реализации случайного числа выбирается зерно по формуле $s = y_{max}x + y$, где y_{max} – максимальное значение y .

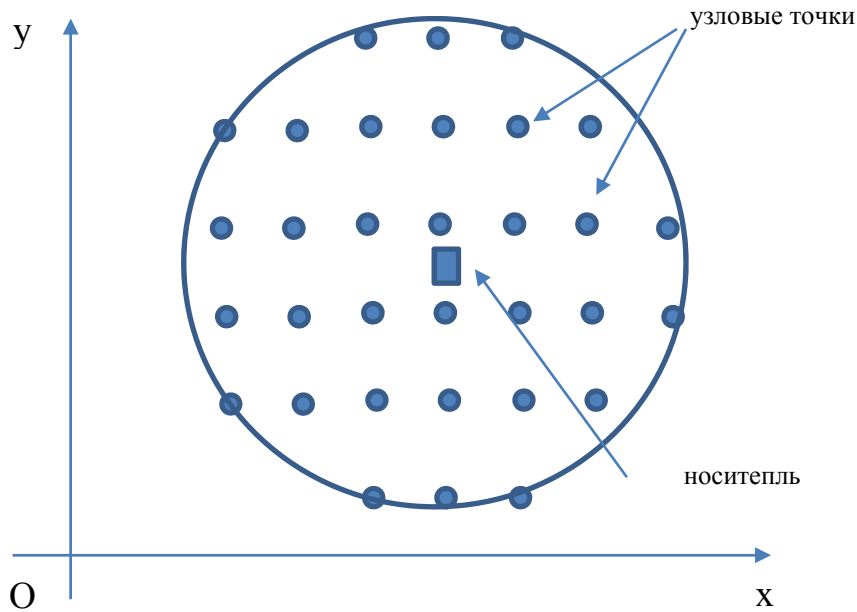


Рис. 1. Множество узловых точек

В таком случае для произвольной точки на расстоянии L от носителя можно вычислить значения высоты верхней и нижней кромки льда по выражению (аналогично для обоих параметров):

$$h_{high} = \frac{1}{\sum_{i_{node}} \omega(i_{node})} \sum_{i_{node}} \omega(i_{node}) h_{node.high}(i_{node}),$$

где i_{node} – индекс узловой точки, $\omega(i_{node}) = R_{crr} - R(i_{node})$, где $R(i_{node})$ – расстояние от i_{node} -й узловой точки до точки параметры ледового покрова в которой вычисляются.

Таким образом для нахождения временной задержки отражённого эхосигнала от верхней и нижней кромок льда можно воспользоваться выражением по расчёту проходимого сигналом расстояния (приводится для нижней, см. рис. 2):

$$l_{sgnl} = \sin(\beta)(h_{depth} + h_{low}),$$

где h_{low} – высота нижней кромки льда в точке где ось, определяемая направлением ПК (направление по которому производится оценивание параметров ледового покрова), пересекается с поверхностью уровня моря, h_{depth} – глубина расположения ГАСОЛО, а β – угол места ПК. К аналогичным алгоритмам относятся алгоритмы трассировки луча [5], однако, они требуют для расчёта спецпроцессоров, что не всегда возможно в рамках имитационного оборудования. Кроме того, учёт специфических условий позволяет снизить требования к производительности (например, большие значения углов места).

Для точек, в которых «верхняя» кромка льда ниже «нижней» кромки, можно положить наличие полыньи во льду (чистой водной поверхности).

При этом нужно отметить, что применимость приближённого расчёта расстояния (времени) пробега луча до кромки льда сохраняет достаточную точность только при больших значениях угла места для моделируемого ПК ГАСОЛЮ (рис. 2). Причём чем больше изрезанность льда и меньше его сглаженность тем больше углы места β , для которых сохраняет применимость рассматриваемая модель.

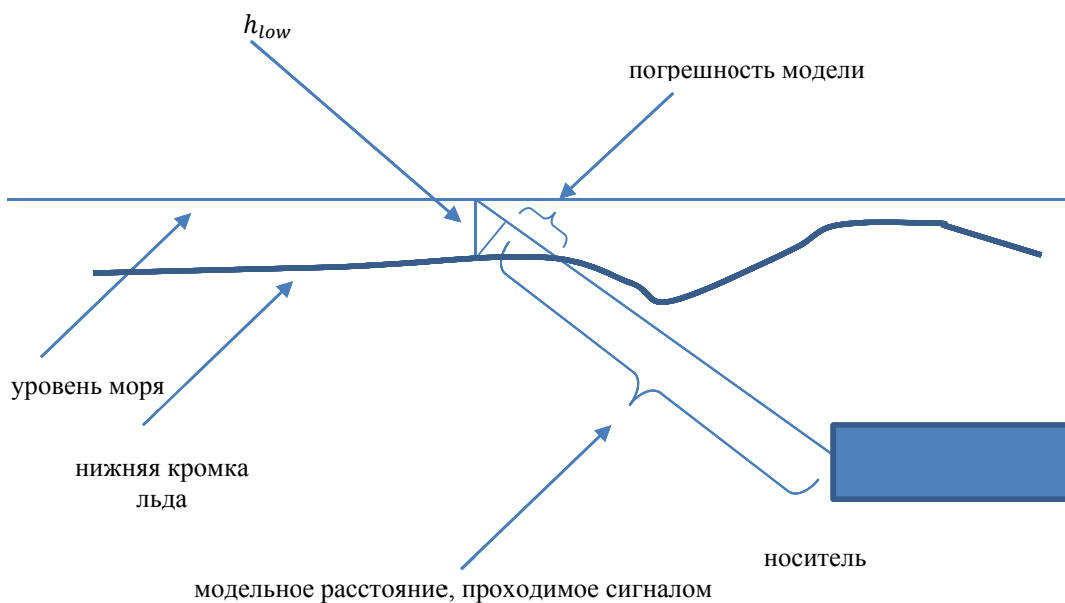


Рис. 2. К расчёту пробега эхосигнала

Результат работы имитатора приведён на рисунке 3 (по оси абсцисс отложены азимуты ПК, а по оси ординат время).

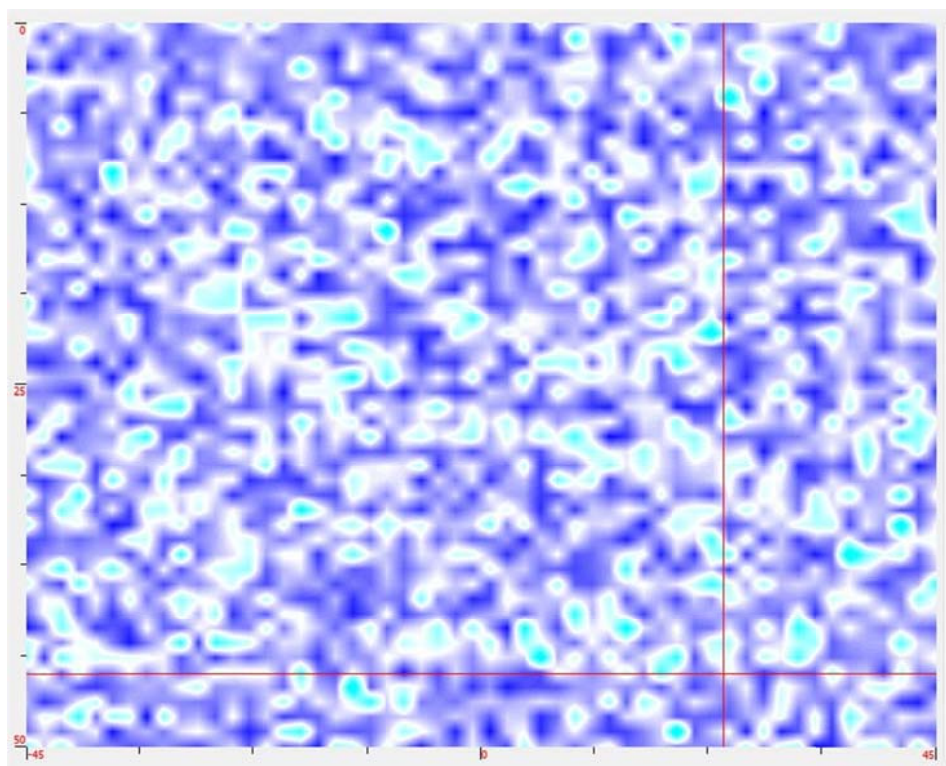


Рис. 3. К расчёту пробега эхосигнала

Заключение. В рамках работы была получена модель, которая позволяет описать ледовую поверхность. Для рассмотренной модели применимость в результате использованных приближений ограничивается углами места от 45 до примерно 90 градусов. В дальнейшем в рамках моделирования ледового покрова предполагается расширить диапазон углов места в части применимости модели вплоть до 0 градусов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

ЛИТЕРАТУРА

1. Имитационно-моделирующий комплекс для обеспечения жизненного цикла систем освещения подводной и надводной обстановки, **Шафранюк А.В.**, Труды всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» (см. в книгах). 2016. № 13. С. 314-316.
2. Построение стенда моделирования гидроакустических систем, **Шафранюк А.В., Прокопович В.В.**, в сборнике: Десятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2021). Труды конференции (электронное издание). Редакторы Плотников А.М., Долматов М.А., Смирнова Е.П., Санкт-Петербург, 2021. С. 511-519.
3. <https://habr.com/ru/post/322504/>
4. <https://www.ixbt.com/video/3dterrains-generation.shtml>
5. <https://habr.com/ru/post/342510/>

D.A. Dobrikov, A.V. Shafranyuk, (Concern CSRI Elektropribor, JSC). **Imitation of ice observing mode**

The report considers the problem of simulation modeling of the functioning of the ice conditions lighting mode. In particular, the following questions are considered: modeling the ice surface in accordance with the given parameters and generating the output data of the primary processing of information in a hydroacoustic system that measures the parameters of the ice cover. The paper presents mathematical expressions for the proposed models, as well as the results of the simulation software model. At the end of the report, the obtained results are analyzed and limitations on the use of the proposed simulation model are considered.

УДК 681.51

И. С. НАЛБАТ, В. С. МЕЛЬКАНОВИЧ
 (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ТРЕХМЕРНЫХ ДАННЫХ ОБЗОРА ПРОСТРАНСТВА НА ЭКРАНЕ МОНИТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦВЕТОВОЙ КОДИРОВКИ

Рассматривается вопрос об отображении данных обзора пространства на экране монитора для оператора-гидроакустика. Описаны различные подходы к визуализации трехмерных данных с целью эффективного распознавания трасс целей оператором-гидроакустиком.

Введение. Данные обзора пространства в гидроакустических системах принципиально являются многомерными. В частности, четырехмерные выходные данные системы обзора шумопеленгатора в качестве размерностей имеют номера вертикальных и горизонтальных направлений наблюдения, номер частотного диапазона и номер реализации.

Естественным вариантом представления оператору полной информации о таком четырехмерном объекте на плоском экране монитора является отображение совокупности его двумерных срезов, формируемых для каждого из значений угла места (УМ), в виде "водопадных" графиков в координатах горизонтальный угол обзора (абсцисса) - время (ордината) [1]. Такое представление является полным, но трудно воспринимаемым [2], т.к. требует от оператора одновременного восприятия большого количества графических полей, а также ограничивает объем анализируемых данных числом пикселей экрана.

Одним из приёмов отображения трехмерных объектов на плоском экране является использование цветовой кодировки данных по одной из размерностей. В работах [3-5] цветовая кодировка тремя цветовыми плоскостями применяется для отображения частотного состава сигналов. Использование такой кодировки позволяет оператору не только визуально объединять данные обзора нескольких частотных диапазонов, но и делать выводы о классе цели и дистанции до них.

Применение аналогичной цветовой кодировки для отображения информации о вертикальном угле прихода сигнала затрудняется тем обстоятельством, что данные обзора по УМ являются более анизотропными, чем данные о спектральном составе, что не позволяет детально кодировать информацию о распределении энергии в угломестной плоскости лишь тремя значениями интенсивностей базовых цветов задачи.

Задача настоящей работы состоит в поиске путей визуализации на основе цветовой кодировки сигналов локальных источников, приходящих с разных углов по вертикали на единой двумерной рекордерной развертке в координатах, задаваемых только углом прихода по горизонтали и номером реализации.

На рис. 1а приведен пример отображения данных обзора в виде двумерных срезов по УМ для следующих вариантов тестовых сигналов локальных источников:

- 1) сигнал с отношением сигнал шум (ОСШ), которое на интервале наблюдения плавно возрастает от нуля до 1.5;
- 2) сигнал с ОСШ = 3, номер направления прихода которого по УМ изменяется от 5 к 6;
- 3) сигнал с ОСШ = 3, номер направления прихода которого по УМ равен 9;
- 4) сигнал с ОСШ = 3, номер направления прихода которого по УМ изменяется от 3 к 4;
- 5) сигнал с ОСШ = 3, номер направления прихода которого по УМ изменяется от 6 к 8;

Рассмотрены следующие варианты решения поставленной задачи:

1. На рис. 1б представлены результаты объединения данных рис. 1а путем суммирования данных обзора по УМ;
2. На рис 1в объединение данных рис 1а осуществляется путем отображения локальных максимумов с применением цифровой обработки изображения, обеспечивающей понижение цветового шума.
3. На рис 1г объединение данных рис 1а осуществляется путем разделения поля обзора по УМ на сектора, отбора для отображения максимальных значений в каждом секторе и отображения данных каждого из секторов в своей цветовой плоскости.

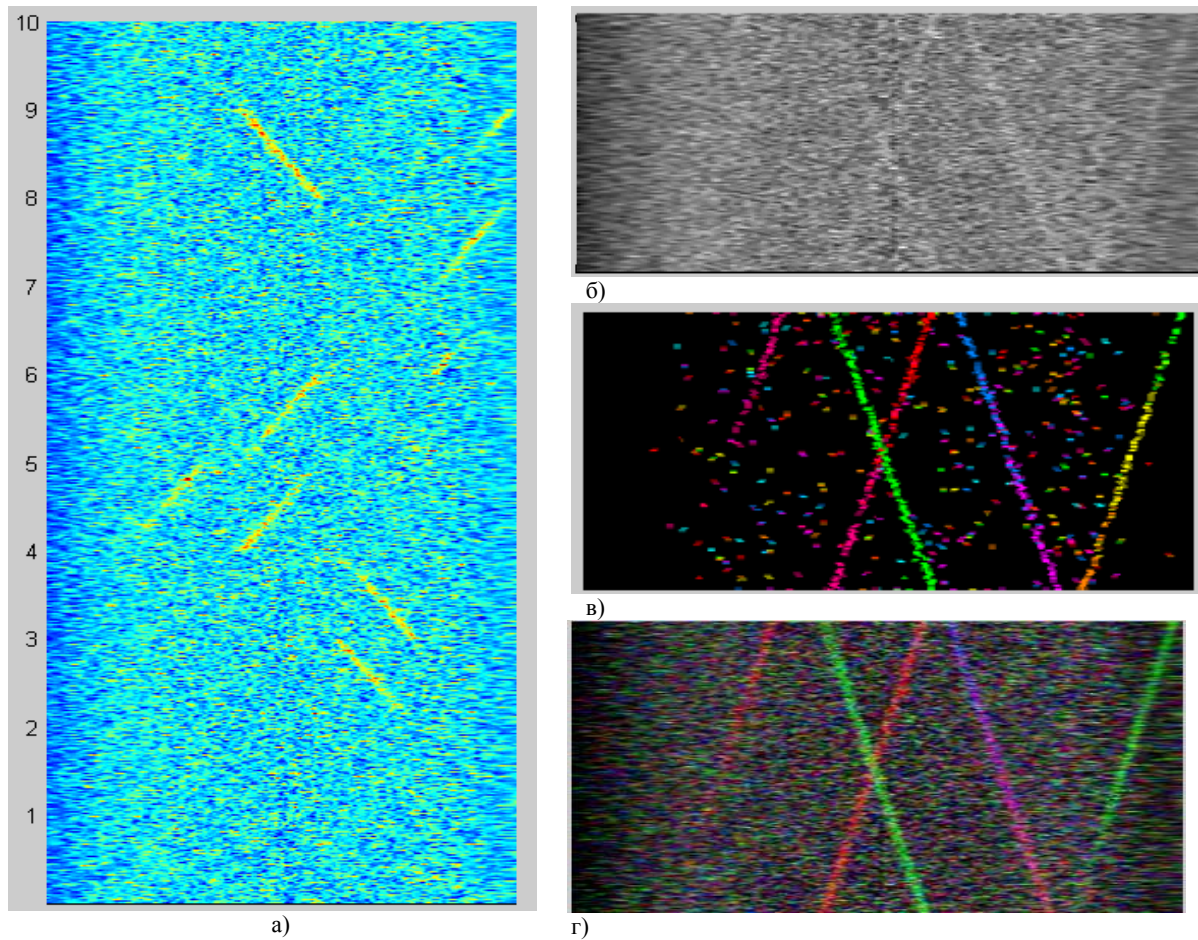


Рис 1. а) водопадный график выходных данных тракта обзора; б) Суммирование данных обзора по УМ; в) отображение локальных максимумов с понижением цветового шума г) отображения максимальных значений энергий по УМ.

Заключение. Найденное решение визуализации трехмерных данных обзора пространства на двумерную плоскость, основанное на цветовой кодировке максимальных значений в секторах обзора, различающихся по УМ, обеспечивает одновременное отображение всей совокупности сигналов, приходящих одновременно по разным УМ, в том числе сигналов, существенно изменяющих УМ прихода на интервале наблюдения. Преимуществом найденного подхода является возможность различения оператором слабых сигналов за счет визуального выделения цветовых трасс.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ, проект № 20-08-00130.

ЛИТЕРАТУРА

1. Антипов В.А., Железный В.Б., Ковалев В.Н., Макаручук Ю.И. Отображение информации шумопеленгования в корабельных гидроакустических системах // Гидроакустика. 2018. № 34(2). С. 87-99.
2. Волкова А.А., Консон А.Д., Сопина О.П. Процедура гидроакустической классификации в человеко-машинной системе поддержке принятия решения // Гидроакустика. 2018. № 34(2). С. 67-75.
3. Консон А.Д., Волкова А.А., Никулин М.Н. Цветовое кодирование информации в гидроакустическом шумопеленговании // Морская радиоэлектроника. 2015. № 4(54). С. 42-47.
4. Волкова А.А., Консон А.Д., Никулин М.Н. Экспериментальные исследования видеоинформационного обеспечения в шумопеленговании // Гидроакустика. 2016. № 25(1). С. 79-86.
5. Волкова А.А., Консон А.Д. Оценка расстояния до источника шумового сигнала при цветовой RGB-кодировании его спектра // Гидроакустика. 2019. № 38(2). С. 37-46.

I.S.Nalbat, V.S.Melkanovich, (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg). **Visualization of three-dimensional space survey data on the monitor screen using color coding.**

The paper considers the issue of displaying space survey data on the monitor screen for a hydroacoustic operator. Different approaches to the visualization of three-dimensional data are presented in order to effectively recognize target traces by a hydroacoustic operator.

УДК 004.94

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

МОДЕЛЬ КЛАССИФИКАЦИИ НАБЛЮДАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Рассматривается модель решения задачи классификации в гидроакустической станции. Задача классификации рассматривается в виде отнесения наблюдаемого объекта к одному из классов заданного алфавита, на основе некоторого множества измеренных параметров объекта – классификационных признаков. Описывается подход к расчёту вероятности отнесения объекта к каждому классу алфавита в зависимости от вероятности обнаружения и точности измерения классификационных признаков.

Введение. Задача классификации является задачей верхнего уровня обработки информации в гидроакустических станциях (ГАС). В рамках доклада рассматривается модель работы классификации в пассивных ГАС в одной из трёх её возможных реализациях. Областью применения таких моделей могут быть как учебно-тренировочный режим работы ГАС, так и тренажёры и математические модели.

Постановка задачи. Входными данными алгоритмов классификации являются значения классификационных признаков для каждого наблюдаемого объекта [1,2], используемых для разделения наблюдаемых объектов на классы заданного алфавита:

$$\mathbf{P}_{cl.p} = \left\{ \pi_{cl.p}(1), \dots, \pi_{cl.p}(i_{cl.p}), \dots, \pi_{cl.p}(N_{cl.p}) \right\}^T, \quad (1)$$

где $\mathbf{P}_{cl.p}$ – вектор классификационных признаков размерностью $N_{cl.p}$, $\pi_{cl.p}(i_{cl.p})$ – значение $i_{cl.p}$ -го классификационного признака. Отметим, что некоторые из классификационных признаков могут отсутствовать.

Выходные данные при этом имеют различные представления, и в наиболее общем виде для каждого наблюдаемого объекта формируется вектор:

$$\mathbf{P} = \left\{ P(1), \dots, P(i_{cl.alph}), \dots, P(N_{cl.alph}) \right\}^T, \quad (2)$$

где \mathbf{P} – вектор вероятностей принадлежности объекта к каждому из классов алфавита размерностью $N_{cl.alph}$ различаемых классов, $P(i_{cl.alph})$ – вероятность принадлежности объекта $i_{cl.alph}$ -му классу алфавита.

Целью работы является анализ возможных подходов к построению модели классификации наблюдаемых объектов, а также разработка упрощённой модели классификации, позволяющей рассчитать вероятность правильной и ложной классификации объекта.

Подходы к построению моделей. Специфика задачи классификации состоит в том, что существует значительное число подходов к построению алгоритма её функционирования, вследствие чего написание обобщённой модели достаточно затруднено.

В связи с этим рассматривается три возможных подхода:

- использование штатных алгоритмов классификации объектов совместно с имитационными моделями, формирующими для них входные данные. Такой подход является императивным [3] и обеспечивает высокую адекватность модели и упрощение разработки. Однако необходимость наличия собственно штатного ПО, либо для моделируемой системы, либо существующей подобной ограничивает применение такой модели на ранних этапах разра-

ботки. При использовании аналогичного штатного ПО существующей ГАС дополнительно появляется требование совместимости номенклатуры как входных, так и выходных данных. Такой подход наиболее применим в тренажёрах и учебно-тренировочном режиме работы ГАС;

- использование вместо штатного ПО нейронной сети, обученной на штатном ПО для различных ситуаций [4,5]. К плюсам такого подхода можно отнести достаточную универсальность такой модели и более низкие требования к номенклатуре входных/выходных данных. Кроме того, использование нейронной сети, которая обладает хорошими экстраполирующими свойствами, позволяет получить достаточно универсальную модель. При этом минусы использования нейронной сети в целом соответствуют предыдущему варианту построения, а именно ограниченностью модели и невозможностью использования её для моделирования широкого круга классифицирующих алгоритмов;
- построение упрощённой модели классификации [6], с использованием ряда предположений. Рассмотрим такой подход ниже.

Упрощённая модель классификации будет иметь следующие ограничения:

- классификация производится для алфавита классов состоящего непосредственно из перечня моделируемых объектов, т.е. вычисляется вероятность отнесения объекта к классу указанному во входных данных модели;
- классификационные признаки всех объектов не пересекаются и детерминированы, т.е. не может быть ситуации, когда по одному и тому же признаку объект может быть отнесён к разным классам.

Вследствие вышеописанного предлагаемая модель классификации будет иметь алфавит классов, состоящий из каждого объекта. Сама модель не сможет отнести несколько моделируемых объектов (с различными параметрами шумоизлучения) к одному общему классу. Такое объединение нужно будет производить в программном коде для каждой конкретной ГАС имея априорную информацию о том, какие объекты относятся к какому классу. Например, два гражданских корабля с различным числом лопастей относить к более общему классу кораблей. Также в выражении (2) становится невозможным корректно рассчитать вероятность отнесения наблюдаемого объекта к каждому другому классу алфавита. Для решения этой задачи возможен расчет вероятности ложной классификации объекта как $P_{lie} = 1 - P(i_{cl.alph.obj})$, с последующим разделением полученной вероятности на число моделируемых классов объектов.

В выражении (1) вектор классификационных признаков состоит из параметров сигнала пространственно-частотного спектра и спектра мощности шумового сигнала [1], например:

- количество дискретных составляющих (ДС) в спектре мощности шумового сигнала $N_{sgnl.DS}$. В этом случае вероятность правильного обнаружения классификационного признака будет определяться правильным обнаружением всех ДС:

$$P_{cl.true} = (1 - P_{sgnl.DS.lie}) \prod_{i_{sgnl.DS}=1}^{N_{sgnl.DS}} P_{sgnl.DS}(i_{sgnl.DS}), \text{ где } i_{sgnl.DS} = 1 \dots N_{sgnl.DS} - \text{индекс ДС, } N_{sgnl.DS} -$$

общее число ДС в спектре, $P_{sgnl.DS}(i_{sgnl.DS})$ – вероятность правильного обнаружения $i_{sgnl.DS}$ -ой ДС, $P_{sgnl.DS.lie}$ – вероятность ложного обнаружения ДС;

- величина изменения пеленга. В этом случае вычисляется вероятность в зависимости от оценки параметра с некоторым среднеквадратическим отклонением (СКО), меньшим порогового:

$$P_{cl.true} = f(\sigma_{cl.p}), \quad (3)$$

где $\sigma_{cl.p}$ – СКО оценки классификационного признака, а $f(\bullet)$ – функциональная зависимость назначаемая экспертно, либо на основании статистической обработки модельных, либо натуральных данных с использованием штатного ПО классификации.

Таким образом, можно рассчитать вероятность правильной классификации как:

$$P(i_{cl.alph.true}) = \prod_{i_{cl.p}=1}^{N_{cl.p}} \left\{ C(i_{cl.p}) (1 - P_{cl.p.true}(i_{cl.p})) + P_{cl.p.true}(i_{cl.p}) \right\}, \quad (4)$$

где $i_{cl.alph.true}$ – индекс правильного класса наблюдаемого объекта, $C(i_{cl.p}) = 0 \dots 1$ – коэффициент значимости классификационного признака (чем больше, тем менее значим классификационный признак). Весовые значения выбираются аналогично функциональной зависимости (3) – либо экспертно, либо на основе статистических данных (при достаточном их количестве).

Заключение. Предложенная модель позволяет рассчитать вероятность правильной и ложной классификации объекта. Дальнейшие работы предполагается проводить в направлении разработки методики назначения весовых коэффициентов для (4) и определения функциональной зависимости в (3).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-00320).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Марасев С.В., Машошин А.И., Подшивалов Г.А.** Алгоритм классификации целей при совместном использовании активного и пассивного режимов работы гидроакустического комплекса // Гидроакустика – 2021 – С.85-90
2. **Машошин А.И.** Учет гидроакустических условий при разработке алгоритмов классификации морских объектов // Известия Южного федерального университета. Технические науки – 2016 – С.256-260
3. **Бродский Ю.И.** Декларативная и императивная парадигмы программирования в описании поведения сложных распределенных имитационных моделей // Труды Международной суперкомпьютерной конференции. Издательство: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова – 2012 – С.82-87
4. **Пятакович В.А., Василенко А.М., Мироненко М.В.** Нейросетевые архитектуры для решения задач классификации информационных полей морских объектов, методика их обучения // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №2 2017
5. **Пятакович В.А., Василенко А.М., Мироненко М.В.** Обучение нейронной сети как этап разработки экспертной системы для классификации источников физических полей при мониторинге акваторий // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета – 2017 №3(32) – С.138-149
6. **Шафранюк А.В.** Имитационно-моделирующий комплекс для обеспечения жизненного цикла систем освещения подводной и надводной обстановки // Труды всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики» – 2016 – С.314-316

V.V. Prokopovich (Concern CSRI Elektropribor, JSC). **Classification model of observed objects in a hydroacoustic station**

The report considers a model for solving the classification problem in a hydroacoustic station. The classification problem is considered in the form of assigning an observed object to one of the classes of a given alphabet based on a certain set of measured object parameters - classification features. At the same time, an approach is given to calculating the probability of assigning an object to each class of the alphabet, depending on the probability of detection and the accuracy of measuring classification features.

УДК 681.51

И. С. НАЛБАТ, В. С. МЕЛЬКАНОВИЧ
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОТРАБОТКИ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ АНТЕННЫХ УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КООРДИНАТНОГО УСТРОЙСТВА

Производится моделирование методики замеров характеристик направленности антенных устройств с использованием измерительного координатного устройства. Разработан программный комплекс для отработки этой методики. Описаны аспекты моделирования гидрофонов антенны, которые необходимо учитывать.

Введение. При анализе качества функционирования гидроакустических средств одной из основных электроакустических характеристик антенны является её характеристика направленности (ХН). Для измерения ХН в морских условиях используется измерительное координатное устройство (ИКУ). ИКУ представляет собой поворотную ферму, на конце которой размещен излучатель. Процесс замера ХН с использованием ИКУ происходит путём изменения угловых координат излучателя относительно антенны. Однако для антенн с большими размерами длины фермы ИКУ недостаточно для измерения ХН в дальнем поле. В реальных условиях необходимо производить пересчет ХН из ближнего поля в дальнее с учетом направленности каждого из гидрофонов антенны. Известны различные подходы к решению рассматриваемой задачи [1-3]. В частности: может быть осуществлен прямой пересчет по результатам замера ХН, выполненного при размещении источника на разных дальностях; может быть осуществлен замер ХН отдельных фрагментов антенны с пересчетом к полной апертуре. Наиболее точным, по-видимому, вариантом решения задачи является расчет ХН антенны, исходя из замеров ХН каждого из гидрофонов антенны в отдельности. Ещё одной проблемой являются возможные ограничения на перемещение фермы ИКУ, обусловленные геометрическими особенностями размещения антенны и оси поворотного устройства. Сложность решаемой задачи требует осуществления большого объема работ по разработке и настройке таких алгоритмов, а также по отработке методик измерения ХН в натуральных условиях.

Цель работы заключается в разработке технологического программного комплекса для отработки методики оценки параметров антенных устройств с использованием ИКУ.

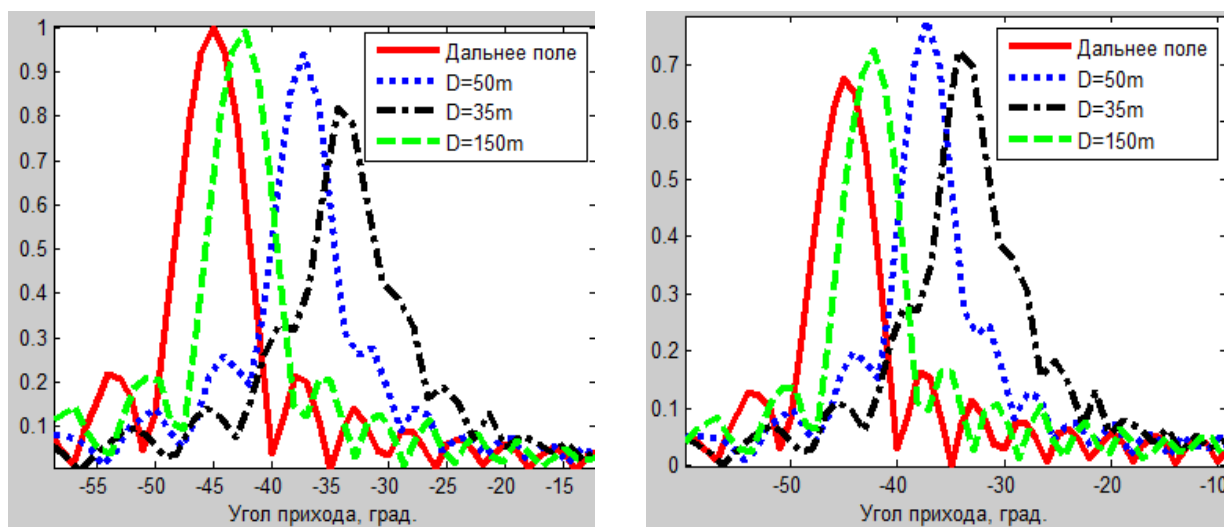
Программный комплекс обеспечивает решение следующих задач:

- имитация сигнала излучателя с заданным спектром;
- задание произвольной формы антенн;
- задание конструктивных особенностей ИКУ (координат оси вращения, размеров фермы и границ секторов вращения);
- расчет ХН для заданных антенных устройств;
- пересчета ХН из ближнего поля в дальнее, исходя из полученного модельного замера;
- задание направленности гидрофонов в двух плоскостях, их индивидуального расположения и ориентации;
- реализацию комплекса алгоритмов расчета ХН;
- имитацию процесса осуществления замера ХН;
- конвертация модельных данных на вход целевого вычислительного комплекса.

При моделировании сигналов учитываются следующие факторы:

- индивидуальное направление прихода сигнала для каждого из гидрофонов;
- направленность каждого гидрофона;
- индивидуальная ХН каждого гидрофона;
- индивидуальное значение мощности сигнала на каждом из гидрофонов в соответствии со сферическим законом распространения.

Результаты моделирования. На рис.1 представлены примеры модельных замеров ХН для горизонтальной цилиндрической антенной решетки на дистанциях до источника 150м, 50м и 30м, без учета направленности гидрофонов (а) и с учётом (б).



а) Гидрофоны имеют равномерную направленность

б) Гидрофоны имеют направленность в виде трапеции

Рис. 1. ХН для горизонтальной цилиндрической антенной решетки

Рис.1 демонстрирует явление углового смещения максимума ХН, обусловленное различием направлений на источник от фазового центра антенны и от поворотной оси ИКУ. Из рисунка видно что, чем больше удаление источника, тем ближе снятая ХН к идеальной, хотя вариант с удалением источника на 150м не является физически реализуемым. Сопоставление рис. 1 а) и рис. 1 б) позволяет судить об изменении направленности антенны, обусловленной учетом направленности отдельных гидрофонов.

Заключение. Разработанный программный комплекс может быть использован для отработки методик замера ХН антенных устройств с учетом разнообразных аспектов, обусловленных геометрией взаимного расположения антенн и ИКУ, и индивидуальных характеристик расположения направленности гидрофонов.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ, проект № 20-08-00130.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности проведения измерений электроакустических характеристик гидроакустических комплексов подводных лодок в условиях бассейна заводской акватории с использованием метода «ближнего поля». Годзишвили Г.Ю. Гидроакустика. 2020. №42 (2). С. 16-22.
2. Расчет пространственного распределения поля гидроакустических антенн, работающих в зоне Френеля. Махонин Г.М., Черепанцев С.Ф., Черниковская Г.Л., Ершова О.В. Известия ТРТУ. 2004. №5 (40). С. 57-64
3. Отраслевой стандарт «Аппаратура гидроакустическая. Антенна и преобразователи. Методы измерений электроакустических параметров в измерительных бассейнах». РД5Р.8361-86.

I.S.Nalbat, V.S.Melkanovich, (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg). **Technological software package for testing the methodology for estimating the parameters of antenna devices using a measuring coordinate device.**

Abstract. In this work, the method of measuring the directivity characteristics of antenna devices is simulated using a measuring coordinate device. A software package has been developed for testing this technique. The aspects of antenna hydrophone modeling that need to be taken into account are given.

УДК 681.51

Б.Х. НГУЕН¹

(Университет ИТМО, Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург)

УПРАВЛЕНИЕ МНОГОКАНАЛЬНЫМИ ЛИНЕЙНЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ГАРАНТИЕЙ НАХОЖДЕНИЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПЕРЕМЕННЫХ В ЗАДАННЫХ МНОЖЕСТВАХ

Предложен метод синтеза управления многоканальными линейными объектами с гарантией нахождения значений выходных сигналов в заданных множествах. Для решения задачи использовано преобразование координат, позволяющее свести задачу с ограничениями к задаче без ограничений. Для расчета параметров регулятора используется техника линейных матричных неравенств. Результаты моделирования иллюстрируют эффективность предложенного метода.

Введение. На практике нередко встречаются задачи управления объектами с гарантией нахождения регулируемых переменных в заданных множествах [1-4]. В [5-7] приведен обзор решений таких задач, а также предложен новый базовый метод на основе специального преобразования координат, позволяющий перейти от задачи с ограничениями к новой задаче без ограничений. Однако применение базового метода [5-7] рассмотрено только для одноканальных систем, а параметры в алгоритме управления выбираются «вручную». Предлагаемый доклад посвящен обобщению метода [5-7] на многоканальные системы. Получены новые условия расчета параметров регулятора с помощью метода линейных матричных неравенств.

Постановка задачи. Рассмотрим линейную динамическую систему

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Df, \\ y &= Lx, \end{aligned} \quad (1)$$

где $x \in \mathbb{R}^n$ – измеряемый вектор состояния, $u \in \mathbb{R}^m$ – сигнал управления, $y \in \mathbb{R}^v$ – выходной сигнал, $f \in \mathbb{R}^l$ – неизвестное ограниченное возмущение такое, что $|f(t)| \leq \bar{f}$ для любых $t > 0$, матрицы $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $L \in \mathbb{R}^{v \times n}$, $D \in \mathbb{R}^{n \times l}$ известны.

Целью является разработка закона управления, гарантирующего нахождение выходного сигнала $y(t)$ объекта (1) в следующем множестве

$$\mathcal{Y} = \{y \in \mathbb{R}^v: \underline{g}_i(t) < y_i(t) < \bar{g}_i(t), i = 1, \dots, v\} \text{ для любых } t \geq 0 \quad (2)$$

где $\underline{g}_i(t)$ и $\bar{g}_i(t)$ – непрерывные по времени функции ограниченные вместе со своими первыми производными.

Метод решения. Рассмотрим специальное преобразование координат [5-7] вида

$$y(t) = \Phi(\varepsilon(t), t), \quad (3)$$

где $\varepsilon(t) \in \mathbb{R}^v$ – непрерывно-дифференцируемая по времени функция .

Теорема 1 [8]. Пусть для системы (1) существует преобразование (3) с условиями $\frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial \varepsilon} > 0$ и $\left| \frac{\partial \Phi(\varepsilon, t)}{\partial t} \right| < \gamma$ для любых ε и t . Если для заданного $c > 0$ существует симметричная положительно-определенная матрица $K \in \mathbb{R}^{v \times v}$ и положительные коэффициенты $\tau_i > 0$, $i = 1, \dots, v$ такие, что выполнены следующие линейные матричные неравенства

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} -K + \tau_{v+1}I & -\frac{1}{2} \text{diag}\{\tau_1, \dots, \tau_v\}LD & \frac{1}{2} \text{diag}\{\tau_1, \dots, \tau_v\} \\ * & -\tau_{v+2}I & 0 \\ * & * & -\tau_{v+3}I \end{bmatrix} \leq 0, \\ -2c\tau_{v+1} + \bar{f}^2\tau_{v+2} + \gamma^2\tau_{v+3} \leq 0, \end{aligned} \quad (4)$$

Научный руководитель Д.т.н., профессор, Фуртат Игорь Борисович.

где “*” определяет симметричный блок соответствующей матрицы, I, O – единичная и нулевая матрицы соответствующей размерности.

Тогда закон управления

$$u = -(LB)^{-1}[K\varepsilon + LAx]. \quad (5)$$

обеспечивает выполнение целевого условия (2).

Численное моделирование. Рассмотрим объект (1) со следующими параметрами:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0,1 & 2 & -3 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$f(t) = 0.1 + \sin(3t) + \text{sat}(d(t)),$$

где сигнал $d(t)$ – белый шум с мощностью 0,1 и временем выборки 0,1, $\text{sat}\{\cdot\}$ – функция насыщения, определенная как

$$\text{sat}(d(t)) = \begin{cases} 0,3 & \text{при } d(t) > 0,3 \\ d(t) & \text{при } -0,3 \leq d(t) \leq 0,3 \\ -0,3 & \text{при } d(t) < -0,3 \end{cases} \quad (7)$$

Пусть $\Phi(\varepsilon, t) = \text{col}\{\Phi_1(\varepsilon_1, t), \Phi_2(\varepsilon_2, t)\}$, где функции $\Phi_i(\varepsilon_i, t)$ заданы, как

$$\Phi_i(\varepsilon_i, t) = \frac{\bar{g}_i(t)e^{\varepsilon_i} + \underline{g}_i(t)}{e^{\varepsilon_i} + 1}, i = 1, 2. \quad (8)$$

Параметры функции $\Phi(\varepsilon, t)$ зададим в виде

$$\begin{aligned} \bar{g}_1(t) &= (g_0 - g_1)e^{-kt} + g_1, & \bar{g}_2(t) &= (g_0 - g_2)\cos(kt) + g_4, \\ \underline{g}_1(t) &= (g_0 - g_2)e^{-kt} + g_3, & \underline{g}_2(t) &= \cos(kt) + g_5, \end{aligned} \quad (9)$$

где $g_0 = \sqrt{y^T(0)y(0)} + 0,01, g_1 = 0,1, g_2 = 2, g_3 = -0,2, g_4 = g_0 - 2,1, g_5 = 0,8$ и $k = 0,5$.

При $c = 50$ найдем $K = \begin{bmatrix} 1,49 & 0,20 \\ 0,20 & 1,49 \end{bmatrix}$. При $c = 0,05$ найдем $K = \begin{bmatrix} 174,64 & 8,91 \\ 8,91 & 174,64 \end{bmatrix}$. Переходные процессы при двух различных значениях $c = 50$ и $c = 0,05$ по $y_1(t), y_2(t)$ при $x(0) = \text{col}\{\frac{5}{3}, \frac{2}{3}, -1\}$ приведены на рис. 1

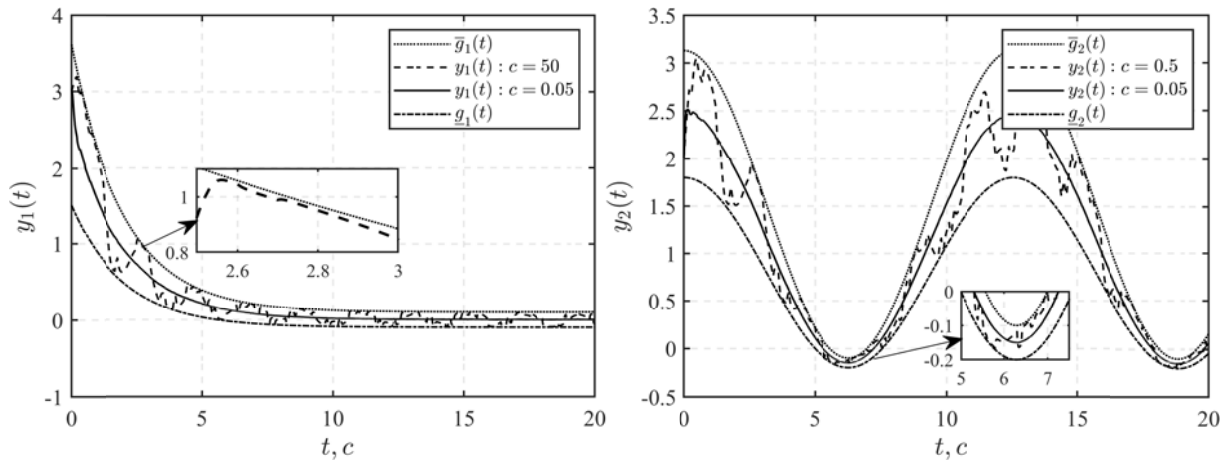


Рис. 1. Переходные процессы по $y_1(t), y_2(t)$ при $c = 50$ и $c = 0,05$ в замкнутой системе.

Заключение. В работе предложен новый метод синтеза закона управления многоканальными линейными объектами с гарантией нахождения регулируемых переменных в заданных множествах на основе базового метода [5-7]. Предложенный метод позволяет рассчитывать параметры регулятора с помощью техники линейных матричных неравенств. Полученные результаты, проверенные моделированием, подтвердили аналитические выводы и доказали эффективность разработанного метода.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-79-10104, <https://rscf.ru/project/18-79-10104/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Furtat I., Nekhoroshikh A., Gushchin P.** Synchronization of multi-machine power systems under disturbances and measurement errors // International Journal of Adaptive Control and Signal Processing. 2022. DOI: 10.1002/acs.3372
2. **Веревкин А.П., Киришин О.В.** Управление системой поддержания пластового давления с использованием моделей конечно-автоматного вида // Территория Нефтегаз 2008, № 10. С. 14–19.
3. **Буяхияуи К., Григорьев Л.И., Лаауад Ф., Хелласи А.** Оптимальное нечеткое управление для снижения энергопотребления в дистилляционных колоннах // АиТ. 2005 № 2. С. 36–45
4. **Ruderman M., Krettek J., Homann F., Bertram T.** Optimal State Space Control of DC Motor // Proc. 17th World Congress The International Federation of Automatic Control, Seoul, Korea, 2008. P. 5796–5801
5. **Фуртат И.Б., Гушин П.А.** Управление динамическими объектами с гарантией нахождения регулируемого сигнала в заданном множестве // Автоматика и телемеханика. 2021. № 4. С. 121–139.
6. **Furtat I., Gushchin P.** Nonlinear feedback control providing plant output in given set // International Journal of Control. 2021. <https://doi.org/10.1080/00207179.2020.1861336>
7. **Furtat I., Gushchin P.** Control of Dynamical Systems with Given Restrictions on Output Signal with Application to Linear Systems // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53, no. 2. P. 6384–6389.
8. **Нгуен Б.Х., Фуртат И.Б.** Управление многоканальными линейными объектами с гарантией нахождения регулируемых переменных в заданных множествах // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 2. С. 232–238. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-232-238

B.H. Nguyen, ITMO University, IPME RAS, Saint Petersburg. Control of multi input multi output linear plants with a guarantee of belonging of outputs to a given sets

We propose a new method for synthesizing the control of multiple input multiple output linear plants with a guarantee of finding outputs in given sets. To solve this problem, a well-known coordinate transformation is used to reduce a problem with constraints to the problem without constraints. The calculation of control law parameters is based on solving linear matrix inequalities. The simulations illustrate the efficiency of the proposed method.

СЕКЦИЯ 5. ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

УДК 681.51

П. В. АБРАМОВ, Е. А. КЕЛЛЕР, А. П. БОНДАРЧУК

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

КИНЕМАТИКА МОБИЛЬНОГО РОБОТА С ПОЛНЫМ ПРИВОДОМ И ПОЛНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Рассматривается кинематика робота с полным приводом и полным управлением, которая должна обеспечить независимое управление всеми колесами робота. Схематически и аналитически описано решение обратной задачи кинематики для построения системы рулевого управления. Приводится сравнение кинематики с полным приводом и полным управлением с кинематикой Аккермана и кинематикой роботов на базе дифференциального привода.

Введение. В настоящее время в сферах робототехники и автоматики большое распространение получили мобильные роботы. Производственные предприятия, логистические компании, военные производства, медицинские учреждения, исследовательские лаборатории и многие другие отрасли стремятся к повышению эффективности работы, увеличению производительности, точности и безопасности. Все это возможно благодаря инновационному внедрению мобильных роботов во все сферы жизни человека [1-2]. Мобильный робот представляет собой сложный механизм, который способен самостоятельно передвигаться в пространстве. Самый важный раздел для всех движущихся объектов – это кинематика, так как от правильно выбранной кинематики робота будет зависеть его дальнейшая эффективность и функциональные возможности. Существует множество различных вариантов построения кинематики колесных роботов, которые имеют как свои плюсы, так и минусы. Например, система с дифференциальным приводом и характерной для него кинематикой, которая широко используется благодаря низкой стоимости, простоте программирования и контроля. Такая система является голономной, то есть обладает неограниченной подвижностью [3-4]. Известна кинематика Аккермана, которая обеспечивает определенные углы поворота для передних колес. Ее недостатком на практике является сильно ограниченный радиус поворота. Кроме того, роботы с кинематикой Аккермана имеют голономные ограничения, то есть не могут двигаться в любом направлении [5-6]. Ограничения, связанные с кинематикой Аккермана преодолевает разработанная технология 4WS4WD (4 Wheel Steer, 4 Wheel Drive, 4; кинематика с полным приводом и полным управлением). Целью работы является решение схематически и аналитически обратной задачи кинематики для построения системы рулевого управления.

Описание системы 4WS4WD. Система 4WS4WD – это технология, которая обеспечивает независимое управление всех четырех колес мобильного робота. Изначально эта методика использовалась в спецтехнике, военной и строительной технике, но из-за своего удобства и большой эффективности начинает получать большое распространение во всех отраслях. Выделим основные плюсы, которые имеет эта система: возможность без ограничений изменять радиус кривизны траектории и возможность перемещения центра вращения по всей горизонтальной плоскости [7-9]. При выборе системы с дифференциальным приводом и характерной для него кинематикой или кинематикой Аккермана, управление мобильным роботом осуществляется двумя параметрами: линейной и угловой скоростями. Для того чтобы покрыть весь спектр возможностей кинематики технологии 4WS4WD необходимо задавать управление тремя параметрами: линейной скоростью, направлением и угловой скоростью (либо радиусом поворота).

Решение обратной задачи кинематики. Для построения рулевой системы мобильного робота необходимо решить обратную задачу кинематики. На рис. 1 схематично показано решение для 4WS4WD робота при произвольно заданных курсе θ , радиусе кривизны траектории R (угловой скорости ω) и скорости V .

На рис.1 приведены следующие условные обозначения: (x, y) – система координат; M – центр масс робота; O – центр вращения; $\delta_{FL}, \delta_{FR}, \delta_{RL}, \delta_{RR}$ – углы отклонения переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес соответственно; $r_{FL}, r_{FR}, r_{RL}, r_{RR}$ – радиусы вращения переднего левого, переднего правого, заднего левого и заднего правого колес соответственно.

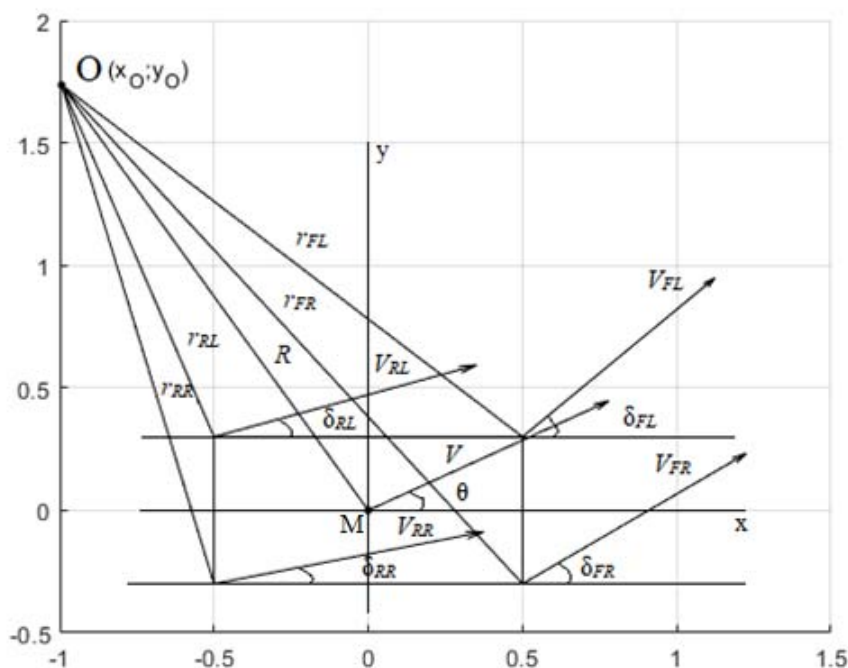


Рис. 1. Схема решения обратной задачи кинематики для 4WS4WD робота

Из рисунка видно, что каждое колесо совершая поворот проезжает разное расстояние: внешние колеса проезжают большее расстояние, чем внутренние. Очевидно, что во избежание бокового скольжения все колеса должны поворачивать на разные углы: внутренние колеса должны иметь больший угол поворота, чем внешние.

Определим способ решения обратной задачи кинематики для углов, радиусов и скоростей всех колес. Выбрав на плоскости точку O , как центр вращения робота, необходимо из нее провести прямые к центрам колес, это будут их радиусы вращения. Колеса поворачиваем перпендикулярно к этим прямым, так как направления движения и скорости при повороте будут касательными к окружности. Это будет соответствовать углам отклонения колес $\delta_{FL}, \delta_{FR}, \delta_{RL}, \delta_{RR}$.

Сначала необходимо определить координаты центра масс и центра вращения робота, затем координаты всех колес. Зная координаты центра вращения и колес, можно определить длины радиусов окружностей, по которым будут двигаться колеса. Углы вращения колес определяются для двух разных случаев: при положительной и отрицательной угловых скоростях. Далее, считая, что весь робот движется с одной угловой скоростью, будет нетрудно определить скорости всех четырех колес.

Заключение. В работе описано решение обратной задачи кинематики, создающее предпосылку к разработке комплекса программного обеспечения для рулевой системы независимого управления всеми четырьмя колесами мобильного робота в конфигурации 4WS4WD. Следует отдельно отметить, что каждое колесо такого робота должно быть оснащено приводным и рулевым двигателями, например, бесколлекторным двигателем постоянного тока для приведения во вращения колеса и шаговым двигателем для его поворота. Вся система должна быть осна-

щена датчиками обратной связи для синхронизации скоростей и углов поворота в каждый момент времени. В противном случае возможно возникновение боковых сил, действующих на колеса, которые могут затруднить перемещение и ускорить износ двигателей и колес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bodrenko A. "New Method of Using Mobile Robots for Moving Cargo in Warehouse," *Bulletin of Science and Practice*. 2019. 5(6). pp. 192-211;
2. Кизилов С.А., Бойцова М.С. "Мобильный робот для применения в трубопроводах," *Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения*. 2015. с. 291-295;
3. Рассадин Ю.М., Шинкарьюк А.Г. "Адаптивное управление мобильным колёсным роботом с дифференциальным приводом," *Устойчивость и колебания нелинейных систем управления (конференция Пятницкого)*. 2018. с. 353-355;
4. Кутафин А.А., Захаркина С.В. "Разработка системы управления дифференциальным приводом робота," *Сборник научных трудов кафедры автоматизации и промышленной электроники*. 2021. с.76-80;
5. Frankovský P., Gmitterko A., Dominik L., Hroncová D., Virgala I., Miková L. "The use of geometric mechanics concept to modeling of Ackerman steered car-like vehicle," *EAN 2017 - 55th conference on experimental stress analysis*. 2017. pp. 748-751;
6. Иоффе М.Л. "Принцип Аккермана и его реализации в современных автомобилях," *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2021. с. 40-47;
7. Spentzas K.N., Alkhozali I., Demic M. "Kinematics of four-wheel-steering vehicles," *Forschung im ingenieurwesen*. 2001. pp. 211-216;
8. Itoh H., Oida A., Yamazaki M. "Numerical simulation of a 4wd-4ws tractor turning in a rice field," *Journal of teramechanics*. 1999. pp. 91-115;
9. Верзун А.Н., Савинов Н.А., Коробкин В.В., Ступаков Э.П., Бажутин Д.В., Мирошник Д.Н., Захаров А.В., Вережкин А.В. "Разработка мобильного робота с четырехколесным рулевым механизмом и полным приводом," *Инновационные перспективы Донбасса*. 2021. с. 139-143.

P. V. Abramov (SPbSETU "LETI", the city of St. Petersburg), E. A. Keller (SPbSETU "LETI", the city of St. Petersburg), A. P. Bondarchuk (SPbSETU "LETI", the city of St. Petersburg). **Kinematics of a Mobile Robot with All-Wheel Drive and Full Control**

The kinematics of a robot with all-wheel drive and full control is considered, which should provide independent control of all the wheels of the robot. The solution of the inverse kinematics problem for the construction of a steering system is schematically and analytically described. The kinematics with all-wheel drive and full control are compared with Ackerman kinematics and kinematics of robots based on differential drive.

УДК 681.51

Д. П. МИХАЙЛОВ, А. А. КИМ, А. Н. ЛУКИЧЕВ, С. А. ГРИНИШЕНА
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова
 (Ленина), г. Санкт-Петербург

ТОРМОЗНАЯ СИСТЕМА АВТОНОМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

В работе рассматривается разработанная система электропривода тормоза автономного транспортного средства: структурная и функциональная схемы, принцип работы, а также результаты ее реализации.

Введение. Актуальность повышения безопасности движения транспортных средств обусловлена их развитием и повсеместным использованием. Тормозная система транспортного средства является одним из ключевых факторов безопасности движения. Современные тормозные системы сочетают в себе различные датчики и исполнительные механизмы [1]. Предлагаемый доклад посвящен разработке электропривода тормоза автономного транспортного средства.

Структурная схема. Структурная схема тормозной системы представлена на рис. 1, где РПТ – ручной привод тормоза, СУЭП – система управления электропривода, ЭП – электропривод, БСДУ – блок создания дополнительного усилия, ДТ – дисковый тормоз.

Как видно из рисунка 1 система торможения может функционировать в двух режимах - ручном и автономном [1]. РПТ позволяет оператору, при необходимости, вручную осуществлять торможение. С помощью ЭП осуществляется торможение в автономном режиме по сигналу системы управления верхнего уровня или по дистанционной команде оператора.

БСДУ осуществляет нагнетание рабочей гидравлической жидкости через трубопроводы к колесным цилиндрам. В свою очередь, поршни колесных цилиндров прижимают тормозные колодки к дисковым тормозам. При увеличении дополнительного усилия давление жидкости повышается, следовательно тормозящий момент возрастает [2].

Принцип работы. Принцип работы предложенной тормозной системы поясняется на схеме, представленной на рисунке 2, где ТК – тормозная колодка, ТД – тормозной диск, ГТЦ – главный тормозной цилиндр, СУ – система управления, ДКП – датчик крайнего положения, ДПТ – двигатель постоянного тока, Р – редуктор.

В ручном режиме нагнетание жидкости осуществляется согласно направлению, изображенному на рис. 2.

При торможении в автономном режиме линейный привод осуществляет перемещение поршня главного тормозного цилиндра до тех пор, пока не будет получен сигнал с ДКП1. При этом поршень цилиндра заблокирует гидравлическую линию ручного тормоза и нагнетание дополнительной рабочей жидкости при воздействии на ручной тормоз будет невозможно [3].

Определение крайних положений осуществляется с помощью ДКП1 и ДКП2. Прямое и обратное перемещение осуществляется с помощью «Н» моста [4].

Схема подключения двигателя постоянного тока линейного привода представлена на рис. 3.

Как видно из рисунка 3 управление электроприводом тормозной системы осуществляется подачей управляющих сигналов на соответствующие ключи. Формирование управляющих сигналов осуществляется с использованием широтно-импульсной модуляции [5]. Сигнал на торможение поступает в систему управления электроприводом тормоза от системы верхнего уровня.

В аварийной ситуации срабатывает электромагнитное реле КМ, подключая электродвигатель на клеммы аккумулятора. При достижении крайнего закрытого положения, сработает ДКП и разомкнет цепь питания ДПТ.

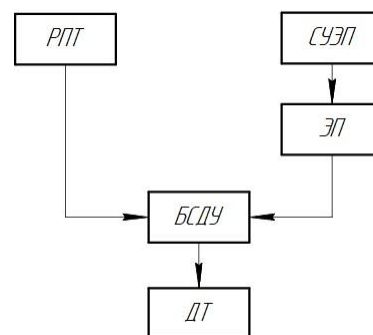


Рис. 1. Структурная схема тормозной системы

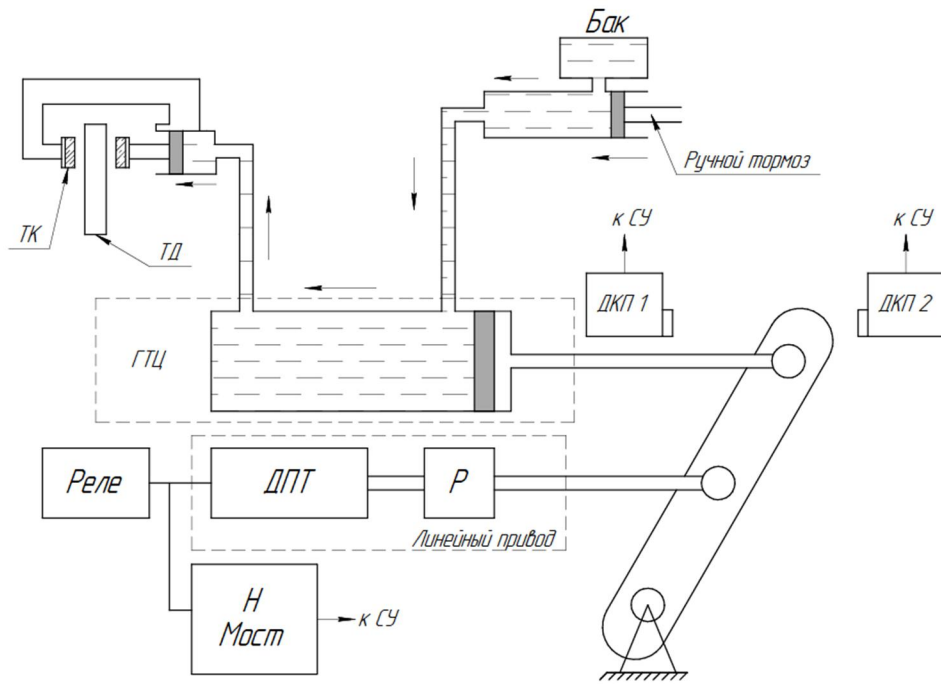


Рис. 2. Схема тормозной системы

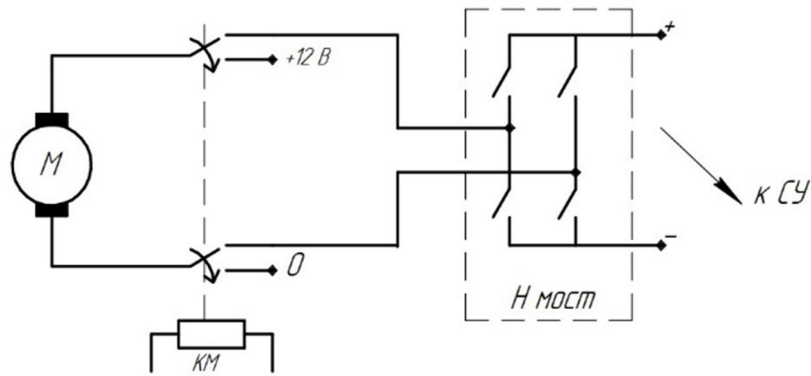


Рис. 3. Схема подключения электродвигателя

Разработанная система представлена на рис. 4.

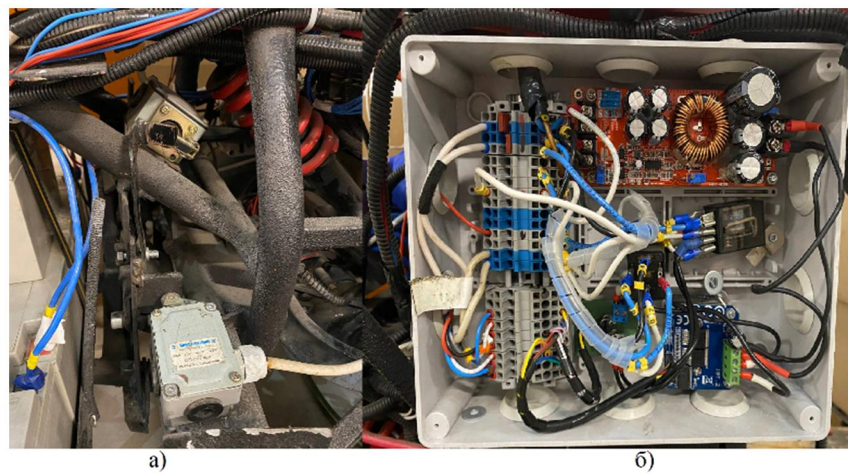


Рис. 4. Разработанная система а) вид сбоку на механическую часть
б) вид спереди на электрическую часть

Заключение. Представлены результаты разработки тормозной системы автономного транспортного средства. Разработанная система позволяет осуществлять торможение автономного транспортного средства при работе в штатном и аварийном режимах. Система обладает возможностью управления как в ручном, так и в автономном режиме. Проведенные испытания системы в составе мобильного исследовательского беспилотного транспортного средства «LETIGRA» на полевых испытаниях беспилотных робототехнических систем «РОБОКРОСС-2021» показали полную работоспособность тормозной системы. Дальнейшие исследования будут направлены на реализацию антиблокировочной системы.

1. ЛИТЕРАТУРА

1. H. Raza, Z. Xu, B. Yang, and P. A. Ioannou, "Modeling and control design for a computer-controlled brake system," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 279–296, 1997, doi: 10.1109/87.572126.
2. C. Li, C. He, Y. Yuan, and J. Zhang, "Braking evaluation of integrated electronic hydraulic brake system equipped in electric vehicle," *Proc. 2019 IEEE 3rd Inf. Technol. Networking, Electron. Autom. Control Conf. ITNEC 2019*, no. Itnec, pp. 2361–2365, 2019, doi: 10.1109/ITNEC.2019.8729155.
3. L. Yagmur and E. F. Bagli, "CHARACTERIZATION OF A PROTOTYPE PISTON-CYLINDER UNIT DESIGNED AND MANUFACTURED WORKING IN THE PRESSURE RANGE 0 . 5-35 MPA HYDRAULIC MODE."
4. K. Kumar, T. Padmavathy, N. Mahitha, V. S. Sowmya, and V. K. T, "Reduction of torque ripple in DC motor drive based on cascading three H-bridge chopper topology," in *2016 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*, 2016, pp. 1–5, doi: 10.1109/SCEECS.2016.7509357.
5. L. Petru and G. Mazen, "PWM Control of a DC Motor Used to Drive a Conveyor Belt," *Procedia Eng.*, vol. 100, pp. 299–304, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.01.371>.

D.P. Mikhailov, A.A. Kim, A.N. Lukichev, S.A. Grinishena (Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI', Saint-Petersburg). **Braking system of an autonomous vehicle**

The abstract presents the development of an electric brake drive for an autonomous vehicle. The block diagram of the brake is considered, the principle of its operation is described. The implementation of the described system is presented.

УДК 681.51

Н. В. ОРЛОВА, А. В. ДРОЗДОВА
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина))

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ. МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ

Рассматриваются задача оценки состояния железнодорожного пути с использованием распределенной мобильной информационно-измерительной системы, а также вопросы оценки достоверности полученных результатов. Предлагается подход к определению метрологических характеристик измерительных каналов по результатам определения дефектов железнодорожного пути.

Введение. Распределенные мобильные информационно-измерительные системы (РМИИС), как правило, используются для контроля характеристик распределенных в пространстве объектов, которые могут носить как природный (например, территориальные экосистемы), так и техногенный характер (например, транспортные системы, промышленные объекты).

РМИИС оценки состояния железнодорожного пути применяются для контроля состояния железнодорожного пути и позволяют определять величины нескольких видов дефектов и их координаты. Для этого в состав системы включены измерительные каналы на основе микромеханических датчиков и навигационной подсистемы, позволяющие определять линейные и географические координаты. В настоящей работе рассматриваются порядок обработки результатов оценки состояния железнодорожного пути с использованием РМИИС и вопросы оценки достоверности полученных результатов [1].

Измерительная задача. Измерительные подсистемы РМИИС оценки состояния железнодорожного пути, передвигаясь по заданным маршрутам, производят измерения физических величин (значений дефектов железнодорожного пути) в заданных точках, в заданное время при каждом проезде. При этом формируется множество результатов измерений (база контрольных измерений) $X_l = \{x_{li}\}$, привязанных к координатам места нахождения дефекта, где l – номер дефекта, имеющий свои координаты, i – номер проезда (результата измерения). Важным для анализа величины дефекта является точность измерения его значения, которая определяется методической и инструментальной составляющими. В качестве измерительного датчика в системе используется микромеханический акселерометр, для которого методическая составляющая определена (сведена к минимуму) на этапе проектирования, а инструментальная определяется аппаратной реализацией. При этом по мере эксплуатации с течением времени изменяются как метрологические характеристики средств измерений, так и значения контролируемых величин [2].

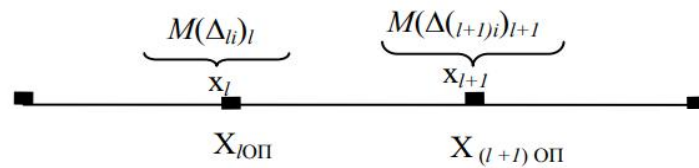
Аналізу подвергаются значения отклонения результатов измерения x_{li} относительно опорных значений $x_{ЮП}$, $\Delta_{li} = x_{li} - x_{ЮП}$. Опорные значения $x_{ЮП}$, определяются на основе нормативной базы или в результате проведения измерений образцовыми средствами [3].

Результат измерения Δ_{li} содержит значение изменения как самой физической величины, так и метрологические характеристики средств измерений.

В результате по l проездам по каждому дефекту железнодорожного пути x_l отклонение результата измерений контролируемой величины от опорного значения представляет собой случайную величину с математическим ожиданием $M(\Delta_{li})_l$ и дисперсией $D(\Delta_{li})_l$

$$M(\Delta_{li})_l = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \Delta_{li}, \quad D(\Delta_{li})_l = \frac{1}{I-1} \sum_{i=1}^I (\Delta_{li} - M(\Delta_{li})_l)^2. \quad (1)$$

Пример схемы участка железнодорожного пути представлен на рисунке.



Пример схемы участка железнодорожного пути

Отклонение по каждому дефекту математического ожидания $M(\Delta_{li})_l$ от опорного значения $x_{ЮП}$ по всему участку с учетом всех дефектов также будет случайной величиной с математическим ожиданием M_y и дисперсией D_y ,

$$M_y = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L M(\Delta_{li})_l, D_y = \frac{1}{L-1} \sum_{l=1}^L (M(\Delta_{li})_l - M_y)^2, \quad (2)$$

где L – общее число дефектов.

Считая, что значения величин дефектов железнодорожного пути являются величинами независимыми, предполагается, что математические ожидания отклонений имеют случайный характер и, в случае незначительных изменений метрологических характеристик измерительного канала, имеют значение близкое к нулю. В случае изменения метрологических характеристик измерительного канала математическое ожидание отклонений результатов измерений на всем участке будет значительно отличаться от нуля.

Таким образом, систематическая составляющая отклонения результатов измерений от опорных значений позволяет регистрировать изменение величины дефекта, или, если ее значение изменяется для всех измерений участка железнодорожного пути, характеризует изменение метрологических характеристик измерительного канала и может быть использовано как поправка для результатов измерений.

Заключение. В докладе рассмотрены особенности получения и обработки измерительной информации о величинах и координатах дефектов железнодорожного пути, полученных с использованием распределенной мобильной информационно-измерительной системы. Представлен подход к определению метрологических характеристик измерительных каналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ метрологических характеристик средств измерения распределенной мобильной измерительной системы на основе опорной модели объекта / Алексеев В.В., Королев П.Г., Орлова Н.В., Пименов Д.В.// XXII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. SCM'2020, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2020, С. 79–82.
2. Бортовая информационно-измерительная система оценки состояния железнодорожного пути. Метрологическое сопровождение / Алексеев В.В., Боронахин А.М., Королев П.Г., Орлова Н.В.// XXII Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. SCM'2019, Санкт-Петербург, 23–25 мая 2019, С. 21–24.
3. Опорная модель линейного участка железнодорожного полотна / Алексеев В.В., Орлова Н.В., Седунова Е.Н.// XX Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. SCM'2017, Санкт-Петербург, 24–26 мая 2017, С. 256–259.

Drozдова A.V., Orlova N.V. (Saint-Petersburg Electrotechnical University ETU “LETI”, Saint-Petersburg). **On-board information and measurement system assessment of the condition of the railway track. Metrological support.**

The report discusses the problem of assessing the condition of the railway track using a distributed mobile information and measurement system, as well as issues of assessing the reliability of the results obtained. An approach is proposed to determine the metrological characteristics of measuring channels based on the results of determining railway track defects.

УДК 681.51

Э. Д. ЧУРЯЕВ, А. В. БОЛЬШАКОВА, Р. В. ШАЛЫМОВ, НГУЕН ЧОНГ ИЕН
(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт Петербург)

АЛГОРИТМ ПОИСКА КОРОТКИХ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ КАТАНИЯ РЕЛЬСА ПО ПОКАЗАНИЯМ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ С НЕ ЭКВИДИСТАНТНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЗАПИСЬЮ

Рассматривается алгоритм поиска коротких дефектов поверхности катания рельса по показаниям акселерометров с не эквидистантной пространственной записью. Особое внимание уделяется частям алгоритма, посвященным приведению сигналов акселерометров, установленных на следующих друг за другом колесах тележки вагона, к единой путевой координате, и определению длины интервала, на котором, предположительно, определяется дефект.

Введение. Одной из значимых тенденций развития средств диагностики состояния рельсового пути является переход к комплексным мобильным малообслуживаемым системам [1]. Среди традиционно используемых в области мониторинга железнодорожной инфраструктуры, но не отвечающих этому современному тренду, измерителей можно выделить акустические средства и инерциальные системы. Первые широко применимы в области ультразвукового контроля внутренних дефектов рельсов [2]. Они основаны на анализе особенностей отраженного от неоднородностей рельса (трещин, полостей) акустического сигнала. Вторые используются как построители траектории движения вагона при контроле геометрии рельсового пути. Поиск дефектов поверхности катания рельсов системой измерения и расчета «Коротких и импульсных неровностей на поверхности катания рельсовых нитей» (КИН) [3] основан на измерениях вертикальной составляющей ускорения, приобретаемого колесом при прохождении дефекта. Акселерометры, в составе КИН, установлены на буксовых узлах тележки вагона [4]. Таким образом, при прохождении колесом дефекта в сигнале акселерометра, установленном на данном колесе, будет наблюдаться значительное увеличение амплитуды. Для однозначного определения факта наличия дефекта необходимо, чтобы увеличение амплитуды наблюдалось в сигналах обоих акселерометров, установленных на следом-идущих колесах, проходящих по одному рельсу. С целью определения дефекта сигналы акселерометров сначала необходимо привести к одной путевой координате, для чего сигнал второго акселерометра смещается на величину равную длине базы тележки. После чего производится корреляционный анализ. Если сигналы коррелируют, вычисляются параметры дефекта. При приведении сигналов к единой путевой координате необходимо использовать не только априорную информацию о базе тележки, но и о скорости движения состава. Аналогично при проведенному корреляционному анализу [5] сигналов датчиков, установленных на следом идущих колесах, длина участка для анализа составляет максимальную длину короткой неровности – 25 см [6].

Целью настоящей работы является разработка алгоритма поиска дефектов поверхности катания рельса по показаниям акселерометров, установленных на буксовых узлах тележки вагона при не эквидистантной пространственной записи.

Алгоритм поиска дефектов поверхности катания рельса. Сигналы показаний акселерометров, установленных на впереди идущем колесе и следом идущем за ним, привязываются к путевой системе координат с помощью одометра и нормируются по скорости движения состава, чтобы исключить влияние скорости на амплитуду сигнала. Для приведения сигналов к единой путевой координате необходимо найти номер отсчета начала предполагаемого дефекта в сигнале акселерометра, установленного на впереди идущем колесе n_1 . Затем необходимо вычислить номер отсчета начала этого же дефекта в показаниях акселерометра, установленного на следом идущем колесе n_2 по формуле:

$$n_2 = n_1 + \frac{Sf}{v_{cp}}, \quad (1)$$

где S – база тележки, f – частота съема данных, $v_{ср}$ – средняя скорость на участке. Зная точки начала дефекта в показаниях двух акселерометров, можно привести сигналы к единой путевой координате (рис. 1). Далее необходимо вычислить длину участка (в отсчетах), на котором, предположительно, находится дефект N_{Lmax} (рис. 2). Для этого используем величину $L_{max} = 25$ см – максимальную длину короткой неровности.

$$N_{Lmax} = \frac{L_{max} f}{v_{н1нач}}, \quad (2)$$

где $v_{н1нач}$ – скорость состава в момент начала прохождения дефекта первым колесом (считается, что при прохождении дефекта скорость не изменяется). Так, например, при скорости 18 км/ч необходимо рассматривать интервал 1500 отсчетов, а при 30 км/ч – 950 отсчетов.

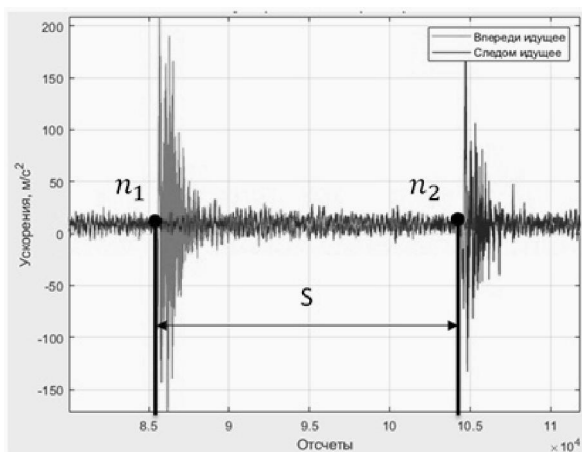


Рис. 1. Отсчеты начала дефекта в сигналах акселерометров, установленных на следом идущих колесах

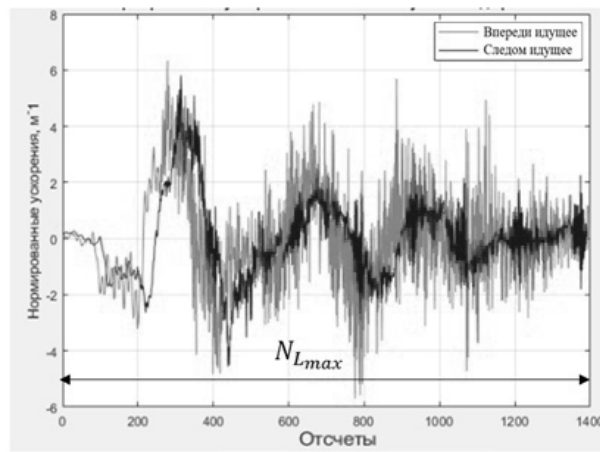


Рис. 2. Сигналы акселерометров приведенные к единой путевой координате на интервале, равном максимальной длине короткой неровности

Из рис. 2 видно, что в сдвиге на расчетное число отсчетов между началом дефекта в сигналах двух акселерометров присутствует ошибка. Для ее устранения были построены коэффициенты корреляции с последовательным сдвигом на 1 отсчет в одну и другую сторону (рис. 3). В данном случае видно, что необходимо внести дополнительный сдвиг на 80 отсчетов, в результате получены синхронизированные сигналы (рис. 4).

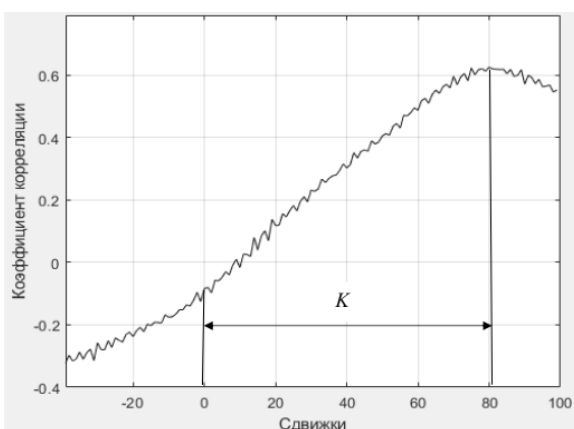


Рис. 3. Коэффициенты корреляции сигналов акселерометров, установленных на следом идущих колесах

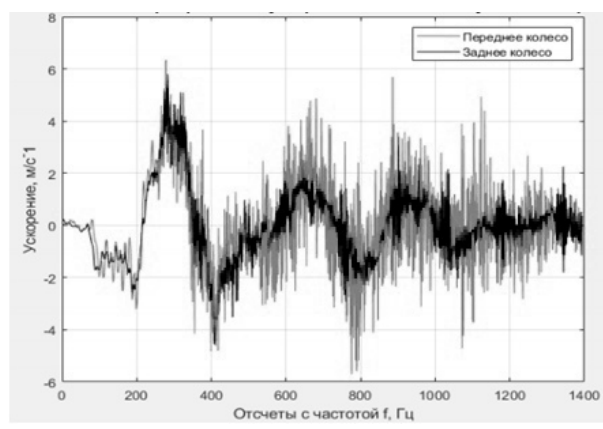


Рис. 4. Синхронизированные сигналы акселерометров

Критерием определения дефекта является корреляция сигналов акселерометров, установленных на следом идущих по одному рельсу колесах. На рис. 5 представлен график коэффициентов корреляции сигналов акселерометров в случае, когда дефект есть. Длина дефекта λ опре-

деляется как расстояние между минимумами рядом с центральным максимумом корреляции (рис. 5).

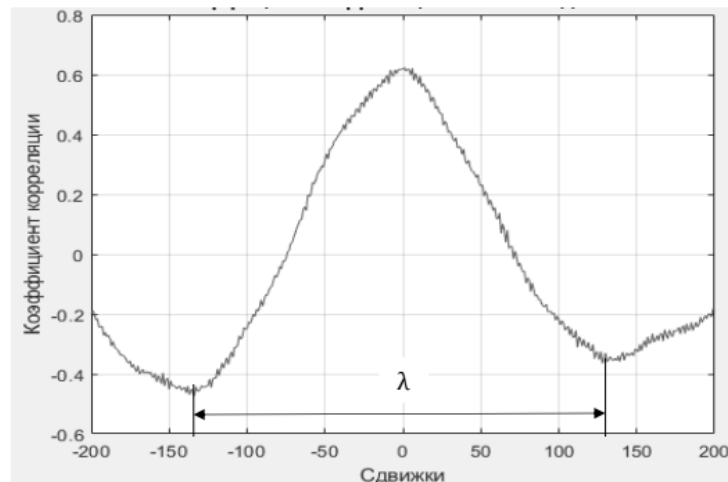


Рис. 5. Коэффициенты корреляции сигналов акселерометров, установленных на следом идущих колесах, и длина дефекта

Таким образом, блок-схема алгоритма поиска коротких дефектов поверхности катания рельса по показаниям акселерометров с не эквидистантной пространственной записью будет иметь следующий вид (рис. 6).

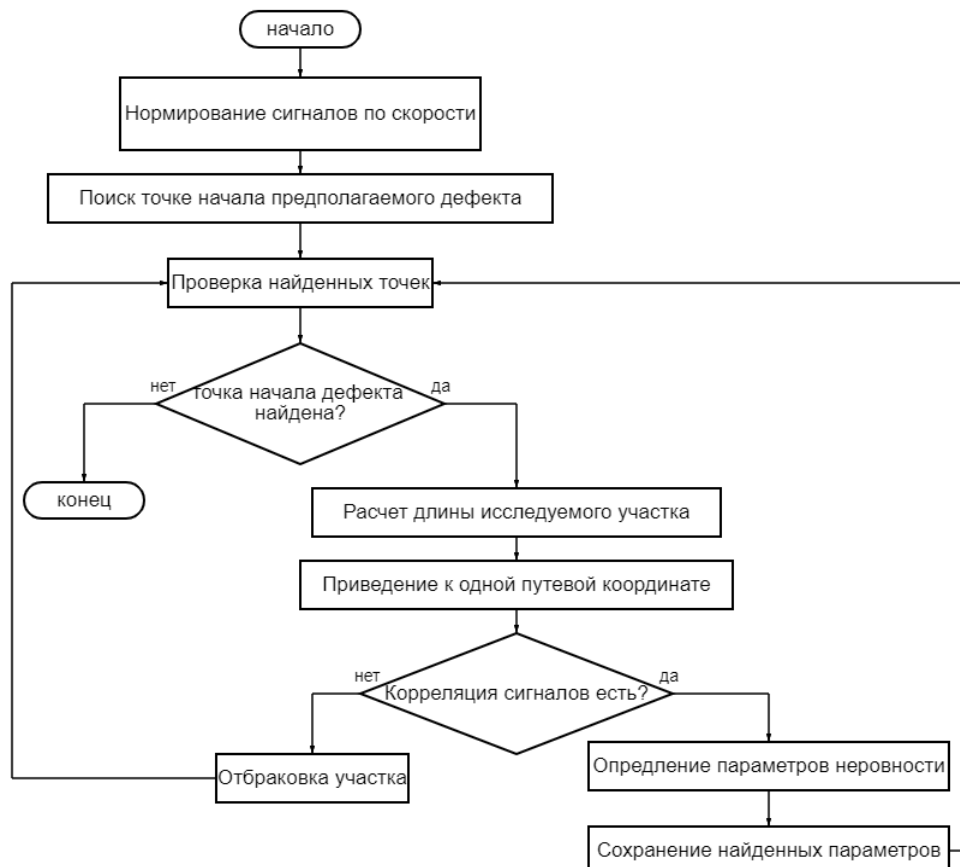


Рис.6. Блок-схема алгоритма поиска коротких дефектов

Заключение. В работе представлен алгоритм поиска коротких неровностей поверхности катания рельса по показаниям акселерометров с не эквидистантной пространственной записью. Для этого учитывается скорость при прохождении составом расстояний, равных базе тележки и максимальной длине дефекта, что позволяет более точно находить точки начала дефекта в сиг-

налах пространственно разнесенных датчиков, а затем совмещать их сигналы и далее определять параметры дефектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распоряжение ОАО "РЖД" от 27.04.2016 N 777р "Об утверждении Концепции развития систем диагностики и мониторинга объектов путевого хозяйства на период до 2025 года" (<https://docs.cntd.ru/document/420365526?marker=6540IN>).
2. **А.А. Markov, Е.А. Maximova**, "Analyzing ultrasonic signal parameters during high-speed rail inspection," Russian Journal of Nondestructive Testing. 2021. Т. 57. № 3. pp. 181-194.
3. **Большакова А.В., Боронахин А.М., Ларионов Д.Ю., Подгорная Л.Н., Ткаченко А.Н., Шалымов Р.В.** «Особенности испытаний и выбора микромеханических акселерометров для задачи диагностики рельсового пути» Материалы XXXII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова. Санкт-Петербург, 2020.
4. **Подгорная Л. Н.** "Разработка и исследование интегрированной инерциальной системы диагностики рельсового пути на микромеханических чувствительных элементах", Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург – 2010. С. 54-65
5. **E. D. Bokhman, A. M. Boronahin, Yu. V. Filatov, D. Yu. Larionov, L. N. Podgornaya, R. V. Shalymov**, "Inertial System for Railway Track Diagnostics", Proc. on Symp. Inertial Sensors and Systems, Germany, 18–19 Sept, 2012, Karlsruhe, pp. 17.1-17.20.
6. Распоряжение ОАО "РЖД" № 2499р от 23.10.2014 Об утверждении и введении в действие инструкции "Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов".

E.D. Churyaev, A.V. Bolshakova, R.V. Shalymov, Nguyen Trong Yen. **Algorithm rail surface short defects searching of the according using accelerometers with non-equidistant spatial data recording**

The paper considers an algorithm rail surface short defects searching using accelerometers with non-equidistant spatial data recording. Particular attention is paid to the parts of the algorithm devoted to bringing the signals of accelerometers mounted on the following wheels to a single track coordinate, and determining the length of the interval under consideration, at which, presumably, the defect is determined.

УДК 681.5.015

В. В. ВОРОБЬЕВ, К. Н. КАЛИНИЧЕВ, А. А. ШУРКОВА
(Тульский государственный университет, г. Тула)

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ВЫСОКОТОЧНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ

Предложена методика динамических испытаний высокоточной системы телеуправления подвижного объекта на заданном классе входных сигналов. Методика направлена на снижение трудоемкости экспериментальной оценки диапазона мгновенной ошибки систем телеуправления, функционирующих в условиях произвольного характера входных сигналов из заданного класса.

Введение. На всех этапах создания систем телеуправления (СТУ), от научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ до контроля готовой продукции, проводятся лабораторно-стендовые испытания. Для динамических испытаний оптикоэлектронной СТУ, функционирующей в условиях кинематических возмущений, шумов аппаратуры и подвижных световых помех, разработан полунатурный стенд [1]. Стенд представляет собой комбинированную (физико-математическую) модель замкнутого контура управления. Стенд содержит натурную наземную аппаратуру управления, математические (компьютерные) модели части элементов контура (в т.ч. подвижного объекта), и физические модели рулевого привода, оптического канала связи и подвижных световых помех.

Полунатурный стенд воспроизводит физическую природу процессов, протекающих в СТУ, которые определяют её динамику, точность и помехозащищенность. Таким образом стенд в полной мере моделирует критические ситуации в управлении объектом, которые могут возникать при сочетании ряда факторов, например, когда при высоком уровне шумов наземной и бортовой аппаратур размах колебаний объекта управления относительно линии визирования близок к предельно допустимому.

В процессе стендовых испытаний на СТУ воздействуют типовыми тестирующими сигналами (например, равноускоренным, гармоническим и др.). Результаты диагностики с контролем точности СТУ при этом имеют локальный характер, так как производятся на узких классах регулярных воздействий. Статистические испытания СТУ предусматривают использование случайных воздействий. Оценки точности получают усреднением реализаций ошибки регулирования либо по множеству, либо по времени. Статистические испытания требуют большого объема экспериментов и, как следствие, характеризуются значительными затратами труда, времени, и снижением ресурсов изделия и стенда [2].

Целью исследования является разработка рациональной методики экспериментальной оценки диапазона мгновенной ошибки высокоточной СТУ в условиях стенда, направленной на уменьшение требуемого объема испытаний.

Методика динамических испытаний высокоточных СТУ. Точность СТУ будем оценивать отклонением объекта от линии визирования в окрестности цели. В качестве критерия точности СТУ предлагается использовать предельную ошибку на заданном классе входных сигналов. Такой подход позволяет контролировать диапазон динамической ошибки. Заметим, что известный критерий интегральной среднеквадратичной ошибки оценивает точность СТУ «в среднем», т.е. не позволяет контролировать диапазон ее мгновенной ошибки [2]. Указанный диапазон является важным критерием эффективности СТУ, функционирующих в условиях произвольного характера входных сигналов.

В основу развиваемой методики испытаний положен метод предельных отклонений, который в настоящее время используется для задач анализа и синтеза стационарных линейных и некоторых типов нелинейных высокоточных следящих систем (СС) [3]. Для определения предельной на заданном классе сигналов V ошибки слежения используется т.н. расширенная система. Вводится понятие гарантированной точности (ГТ), которая

понимается как максимум модуля ошибки слежения за сигналами $v(t)$ из класса V на заданном интервале времени T , который может быть и бесконечным:

$$\Gamma(V, T) = \max_{v(t) \in V} (e(v(t), T)) = \max_{v(t) \in V} \max_{0 \leq t \leq T} |e(t)|. \quad (1)$$

Критерий ГТ имеет ясный содержательный смысл. Это наибольшая (предельная) ошибка СС, которая может возникнуть: в детерминированной постановке задачи – на заданном классе регулярных входных сигналов с заданными предельными скоростью и ускорением; в стохастической постановке – на множестве реализаций случайного входного сигнала с заданной спектральной плотностью мощности.

Для экспериментальной оценки ГТ используется расширенная система, реализованная на базе виртуального или полунатурного стенда. Она содержит линейное динамическое задающее устройство (ЗУ) с постоянными коэффициентами, последовательно соединённое с испытуемой стационарной СС. Предполагается, что вход ЗУ ограничен по модулю, $|u_{\text{зу}}(t) \leq 1|$, начальные условия нулевые. Определение структуры и параметров ЗУ производится известными методами [4].

Экстремальный сигнал, который подается на вход ЗУ имеет релейную форму:

$$u^0 = \text{sign}[w_{eu}(T - t)], \quad (2)$$

где: $w_{eu}(t)$ – весовая функция расширенной системы от входа u до выхода по ошибке e ; $w_{eu}(t) = L^{-1}(W_{eu}(p))$; L – преобразование Лапласа. Результатом воздействия сигнала (2) является накопление ошибки слежения в рассматриваемой расширенной линейной стационарной системе [5]. Предельная (максимальная по модулю) на заданном классе сигналов V ошибка слежения, т.е. ГТ, достигается в конечный момент времени наблюдения T . Причем время наблюдения (например, время интегрирования в виртуальном стенде) можно ограничить временем затухания весовой функции $w_{eu}(t)$.

Стенд содержит блок формирования импульсов (БФИ), который генерирует экстремальный тест-сигнал (2) для входа ЗУ. БФИ и ЗУ реализуются алгоритмически с помощью персонального компьютера, входящего в состав автоматизированного полунатурного стенда. В процессе испытаний БФИ в совокупности с ЗУ формирует на входе СС экстремальный гладкий сигнал $v^*(t) \in V$, который обеспечивает накопление ошибки слежения до ГТ в конечный момент времени наблюдения. Значение функционала ГТ зависит от класса V и длительности наблюдения T , а также вектора параметров регулятора системы. При этом может быть сформулирована задача численной параметрической оптимизации регулятора по критерию минимума ГТ.

Заметим, что метод предельных отклонений разработан для линейных стационарных систем. Однако в нашем случае, испытуемая СТУ и ЗУ являются существенно нестационарными, т.к. их параметры зависят от времени и могут изменяться скачкообразно. Несмотря на это, понятие ГТ сохраняет смысл и для данного случая, поскольку оно основано на использовании весовой функции системы, которая сохраняет смысл и для систем нестационарных. Однако для нелинейных систем использование указанного алгоритма не имеет строго обоснования. Поскольку в стенде предполагается использование натуральных блоков СТУ, которые не могут быть линейными, хотя и близки к линейным, и параметры которых точно не известны, в данной работе предлагается использовать модифицированный алгоритм. Суть его состоит в получении исходного сигнала вида (2) по линейной стационарной модели СТУ с дальнейшей её оптимизацией путём малых вариаций моментов переключений.

Предлагается рациональная методика статистических испытаний СТУ, которая позволяет оценивать диапазон динамической ошибки системы. Методика предусматривает использование в стенде специальных, близких к экстремальным по критерию максимума ГТ, тестирующих сигналов. Эти сигналы формируются с помощью БФИ и ЗУ и подаются на вход испытуемой СТУ с целью накопления динамической ошибки на заданном классе входных сигналов.

Расширенная программа испытаний СТУ предусматривает использование трех разновидностей тест-сигналов, которые подаются от БФИ на вход ЗУ: 1) детерминированного

релейного сигнала вида (2); 2) стохастического сигнала релейной формы; 3) «типового входного случайного сигнала следящей системы» [2]. При этом оба типа стохастических тест-сигналов формируются алгоритмически на базе средней частоты переключений сигнала (2).

Заключение. Предложена рациональная методика лабораторно-стендовых динамических испытаний СТУ. Методика предусматривает использование специально формируемых на входе СТУ тестирующих сигналов, реализующих процесс накопления системой динамической ошибки. Методика предназначена для экспериментальной оценки диапазона мгновенной ошибки СТУ, которая функционирует в условиях произвольного характера входных сигналов из заданного класса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воробьев В.В. Методика стендовых испытаний высокоточных систем телеуправления. / В.В. Воробьев, О.В. Горячев, Н.Н. Макаров // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: труды [Электронный ресурс] / Под общ. ред. Д.А. Новикова. – Электрон. текстовые дан. (617 файлов: 219 МБ). – М.: ИПУ РАН, 2019. – 3290 с. – С. 2856 – 2861.
2. Пугачев В.С. (ред.) Основы автоматического управления. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1974. — 720 с.: ил.
3. Воробьев В.В. Метод гарантированной точности для релейных следящих систем / В.В. Воробьев, Н.Н. Макаров, А.А. Парамонова // Мехатроника, автоматизация, управление. 2011. № 10 (127). С. 32 – 38.
4. Макаров Н.Н. Синтез регулятора методом гарантированной точности / Н.Н. Макаров, Н.Н. Макарова // Известия ТулГУ. 2000. т. 2, вып. 3. С. 41 – 51.
5. Булгаков Б.В. О накоплении возмущений в линейных колебательных системах с постоянными коэффициентами // Доклады АН СССР. 1946. Т. 51. Вып. 5. С. 339 – 342.

V.V. Vorobyov, K.N. Kalinichev, A.A. Shurkova (Tula State University, Tula). **Development of a method for dynamic testing of a high-precision motion control system**

A technique for dynamic testing of a high-precision telecontrol system for a moving object on a given class of input signals is proposed. The technique is aimed at reducing the labor input of experimental estimation of range of instantaneous error of telecontrol systems operating under conditions of arbitrary nature of input signals from given class.

В АВТОРСКОЙ ПЕЧАТИ

УДК 681.2

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

ВЫБОР КОМПОНЕНТОВ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО МОДУЛЯ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ТЕХНИКИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАВЫКА ХОДЬБЫ

Доклад посвящен выбору компонентов системы для задачи оценки техники ходьбы человека с точки зрения уменьшения габаритных размеров. Основными компонентами измерительной системы являются: микроконтроллер, датчик, микросхема зарядки аккумулятора, микросхема защиты аккумулятора, USB-TTL преобразователь, микросхема памяти. Определены критерии для выбора микроконтроллера и микромеханического датчика. Планируется проведение исследований с точки зрения сравнения значений неопределенностей различных семейств и исполнений микромеханических датчиков.

Введение. Анализ кинематики движения и его обработка – одна из наиболее перспективных и быстро развивающихся технологий, благодаря которой появляются новые разработки в области навигации, робототехники, а также в области медицины с целью контроля тенденции развития текущего состояния человека в процессе реабилитации [1-3].

Для оценки параметров движения человека используются устройства инерциального измерения, основанные на микроэлектромеханических системах (МЭМС). В данный момент эти системы получили широкое распространение из-за малых размеров, больших функциональных возможностей и высокой надежности, низкого энергопотребления и низкой стоимости.

Предлагаемый доклад посвящен выбору компонентов системы с точки зрения уменьшения габаритных размеров для реализации измерительных модулей на базе инерциальных датчиков.

Постановка задачи. Целью работы является уменьшение габаритных размеров измерительных модулей с возможностью передачи информации по Wi-Fi на базе МЭМС для оценки информативных параметров степени восстановления навыка ходьбы. Основными компонентами измерительной системы являются: микроконтроллер, датчик, микросхема зарядки аккумулятора, микросхема защиты аккумулятора, USB-TTL преобразователь, микросхема памяти. На выбор микроконтроллера влияют следующие критерии: характеристики микроконтроллера, такие как архитектура, разрядность микроконтроллера, потребляемый ток и напряжение питания, объемы оперативно-запоминающего устройства и памяти программ, наличие периферийных устройств (например, SPI, I2C, UART, АЦП), максимальная тактовая частота процессора; стоимость; габариты.

Выбор микроконтроллера. Из наиболее популярных и доступных в современном мире микроконтроллеров можно выделить три семейства - это семейство микроконтроллеров STM32, семейство микроконтроллеров AVR и семейство Espressif. Сравнивая характеристики и стоимость данных микроконтроллеров, явным преимуществом обладают микроконтроллеры STM и Espressif, но так как в реализуемой системе необходима поддержка Wi-Fi для передачи данных и настройки устройства было принято решение выбрать для реализации МК контроллер фирмы Espressif, а именно ESP32-PICO-D4. Выбор данного микроконтроллера обоснован его ключевыми характеристиками: обеспечивает полный набор функций Wi-Fi и Bluetooth; стоимость микроконтроллера ESP32-PICO-D4, наличие устройства прямого доступа к памяти, высокая тактовая частота процессора (240 МГц, при этом, например, у микроконтроллеров AVR максимальная тактовая частота составляет всего 20 МГц, а у подобного микроконтроллера семейства STM – 72 МГц) и наличие необходимых для устройства периферии (SPI, UART, I2C).

Микромеханический датчик. Для решения задач ориентации целесообразно применять микромеханические измерительные системы на базе МЭМС-технологий. Выбор датчика будет

Научный руководитель д.т.н., профессор, Королёв Павел Геннадьевич.

обусловлен оценкой следующих критериев: наличие дополнительных возможностей, например, дополнительный процессор обработки движения; характеристики датчика, такие как потребляемый ток и напряжение питания, интерфейс общения; стоимость; габариты; погрешность. На данный момент в мире существует много вариаций исполнения датчиков. При этом их габариты и стоимость находятся примерно в одном ценовом диапазоне. Погрешность измерений напрямую влияет на стоимость датчика. Таким образом, на данный момент по показателю цена/характеристики наибольшей популярностью пользуются датчики фирмы TDK InvenSense, а именно датчик ICM-20948 (усовершенствованный MPU9250).

Дополнительные компоненты измерительных модулей. Для питания измерительной системы предполагается использование li-ion аккумулятора. Данный тип аккумулятора требует к правильному заряду (зарядка по схеме CV-CC постоянное напряжение-постоянный ток). Для реализации правильной зарядки принято решение применять контроллер TP4057. Он отличителен маленьким размером корпуса (sot23-6) и обеспечивает зарядный ток до 1 А. Также для более безопасного использования аккумулятора необходимо защищать от коротких замыканий. Для этого используется самая распространенная на рынке микросхема DW01, которая обеспечивает отключение аккумулятора при большом токе.

Самым распространенным интерфейсом связи устройства с компьютером является USB для прошивки микроконтроллера. Протокол USB может быть использован, в качестве транспорта для других интерфейсов, например, Ethernet, UART и др. Для регистрации USB устройства необходимо покупать лицензию и получать VID и PID идентификаторы (VID — идентификатор производителя, PID — идентификатор устройства), что очень дорогостояще, поэтому наиболее подходящий вариант для связи — это USB-UART мост. Одним из самых качественных и поддерживаемых решений в данном случае — это микросхема фирмы Silicon Labs CP2102.

Для хранения больших выборок данных необходима дополнительная область памяти больших размеров. В выбранном микроконтроллере недостаточно памяти, объем памяти ESP32-PICO-D4 составляет всего 4 МБ. Для расширения памяти можно использовать внешние карты или микросхемы памяти. Использование внешних карт увеличивает габариты устройства, а также усложняет задачу в герметизации корпуса для защиты от попадания влаги. Поэтому было принято решение использовать микросхему памяти MKDV4GCL. Данная микросхема имеет маленькие габариты и обладает распространенным быстрым интерфейсом SDIO.

Заключение. Согласно цели были выбраны компоненты измерительного модуля. Представленные компоненты системы позволили уменьшить вес измерительного модуля в 1.8 раза. Авторы планируют проведение исследований с точки зрения сравнения значений неопределенностей различных семейств и исполнений микромеханических датчиков, в том числе на базе разрабатываемой лаборатории системы видеозахвата движения СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексеев В.В., Иванова Н.Е., Королёв П.Г., Соколова Ф.М., Царёва А.В. Исследование кинематики движений пациентов нейрохирургического профиля на стационарном этапе // СТМ, 2019, том 11, номер 3, стр. 81–88.
2. Алексеев В.В., Королёв П.Г., Царёва А.В. Иванов А.А., Соколова Ф.М., Иванова Н.Е. Опыт и анализ результатов измерений динамики движения нижних конечностей // XVII Всероссийская научно-практическая конференция нейрохирургов с международным участием «Поленовские чтения», СПб, 23–25 апреля 2018 г. – С. 14–15.
3. Алексеев В.В., Королёв П.Г., Царёва А.В. Иванов А.А., Соколова Ф.М., Иванова Н.Е. Исследование возможности количественной оценки результативности реабилитационных мероприятий // XVIII Всероссийская научно-практическая конференция нейрохирургов с международным участием «Поленовские чтения», СПб, 16–18 апреля 2019 г. С.196–197.

I.A.Tokareva, A.V.Tsareva, (Saint- Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg). **Selection of components for the measuring module of the assessment system for the recovery of walking skill**

The report is devoted to the selection of system components for the task of evaluating a person's walking technique in terms of reducing overall dimensions. The main components of the measuring system are: microcontroller, sensor, battery charging chip, battery protection chip, USB-TTL converter, memory chip. The criteria for choosing a microcontroller and a micromechanical sensor are defined. It is planned to conduct research in terms of comparing the uncertainty values of various families and versions of micromechanical sensors.

В АВТОРСКОЙ РЕДАКЦИИ
УДК 629.78

А.Ю. ФЕДОРИНОВ, В.В. ПЕРЛЮК
(Государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург)

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ В ГРУППЕ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматривается задача математического моделирования оптимального метода группировки малогабаритных летательных аппаратов. Процесс моделирования осуществляется в среде Matlab на примере CubeSat. Поставлена задача обеспечить безопасный и эффективный групповой полет для множества микроспутников на низко-земной орбите, связь между спутниками осуществляется по средству радио-видео сигналов.

Введение. В последнее десятилетие наблюдался значительный рост числа запусков микроспутников в космос для его исследования и решения всевозможных технических задач. Широкое распространение получил CubeSat- формат малых (сверхмалых) искусственных спутников Земли для исследования космоса, имеющих габариты 10x10x10 см при массе не более 1,33 кг. Этому обстоятельству способствует прежде всего их низкая цена и малое время разработки и вывода по сравнению с традиционными космическими аппаратами. В широком использовании микроспутников видится огромный потенциал, позволяющий на новом уровне решать широкий спектр образовательных, прикладных и научных задач [1].

Актуальность развития такого направления подтверждается множеством исследований [1, 2].

Для более эффективного использования такого подхода требуется решение комплексной научно-технической задачи взаимоориентации микроспутников друг с другом [3]. В настоящей статье будет предложена возможная концепция решения задачи управления микроспутников в группе.

Постановка задачи. Рассматривается задача обеспечения полёта группы малых космических аппаратов (микроспутников) с учётом небольших взаимных расстояний между ними. Моделирование будет проводиться в среде MATLAB. Главной задачей исследования будет разработка и анализ алгоритмов по взаимоориентации малых летательных аппаратов, а точнее управлением их движением и формирования определенной системы построения в групповом полете. Связь между отдельными объектами чаще всего осуществляется по средству радио-видео связи [2]. Сформированная структура используемых каналов связи должна обеспечить высокую динамику в передаче данных, возможность оперативной реконфигурации каналов связи с помощью разделённых друг относительно друга космического и наземного сегмента.

В процессе полёта спутника потребуются постоянное изменение ориентации приёмо-передающих антенн каналов связи ЗЕМЛЯ-ОРБИТА и ОРБИТА-ЗЕМЛЯ. Поэтому было принято решение жёстко закрепить антенну на корпусе микроспутника и использовать для наведения антенны на наземный объект пространственную ориентацию самого малого космического аппарата. Такое упрощение системы связи серьёзно усложняет задачи навигации и ориентации микроспутников. Кроме того, близкое расположение траекторий МКА в группе накладывает дополнительные требования для снижения вероятности столкновения микроспутников друг с другом. Так как рассматривается строй (формация) из микроспутников, то необходимо обеспечить заданное взаимное положение космических аппаратов[3]. Эта необходимость обусловлена не только требованиями по изменению или поддержанию взаимного положения, но и отличиями в параметрах орбит близко летящих спутников.

Управление малыми космическими аппаратами в группировке. Одна из главных задач при групповом полёте – распределение заданий и действий, которые возлагаются на каждый спутник.

Управление включает в себя задачу измерения и задачу управления. Задача измерений ставится для определения расстояния между спутниками для того, чтобы поддерживать их заданное взаимное расположение[4]. Задача измерений включает в себя две части: ориентация и навигация. Навигационная задача рассматривается относительно Земли и между спутниками. Спутники должны быть выстроены в строго определённом порядке, потому что для решения задач с помощью строя из спутников необходима очень высокая точность[1,5].

Для определения относительного фазового состояния [3] аппаратов в группе используется обработка видеоизображений, получаемых при съёмке одного аппарата с помощью видеокамеры, установленной на другом аппарате. Используется метод, основанный на распознавании на снимке некоторых точек аппарата, положение которых известно в системе отсчёта, связанной с этим аппаратом[4].

Широко известны методы выделения (идентификации) характерных признаков в изображении сцены, которые используются в системах машинного зрения[5]. Суть метода, применительно к формированию геометрической модели микроспутника по изображению, состоит в селекции из полученного входного массива точек изображения некоторых локальных признаков, определяющих отличительные особенности формы и геометрических размеров именно того реального объекта, для которого создаётся данная геометрическая модель.

Данный метод относится к классу пространственно-временной селекции и позволяет оперировать непосредственно с информацией, полученной тем или другим способом путём сканирования трёхмерной сцены[8].

Заключение. Исследуемая технология имеет огромный потенциал для развития, так как сможет при своей малой себестоимости решать внушительный список задач, от простого зондирования поверхностей земли для уточнения карты местности и до поиска интересных объектов вокруг заданной области.

ЛИТЕРАТУРА

1. Станиславчик Ю.П., Чучуркина А.А., Беляков С.А. Большие Перспективы микроспутников // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2011. №7. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bolshie-perspektivy-mikrosputnikov>
2. Белоконов И.В., Тимбай И.А., Николаев П.Н. Анализ и синтез движения аэродинамически стабилизированных космических аппаратов нанокласса формата CubeSat // Гироскопия и навигация. Том 26, № 3 (102), 2018. С.69-91
3. Небылов А. В., Перлюк В. В., Леонтьева Т. С. Исследование технологии взаимной навигации и ориентации малых космических аппаратов в группе // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. — 2019. — Т.18. — №1. — С. 88-93.
4. Потюпкин А.Ю., Данилин Н. С., Селиванов А. С. Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. — 2017. — Т.4. — №4. — С.45-56.
5. Салимжан Касым Разработка и анализ системы наведения группировки малых космических аппаратов для дистанционного зондирования Земли // Молодой ученый. — 2019. — № 24 (262). — С. 139-140.
6. Nebylov A., Panferov A., Brodsky S., Knyazhsky A. Relative navigation and positioning of nanosatellites in formation // AIRTEC 2017 Congress. Germany, 2018. — Volume 2. — Issue 1. — 4 p.
7. Panferov A., Nebylov A., Brodsky S. Synthesis of a control system for relative motion of closely spaced satellites // Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering, 2017.
8. Иванский Ю.В., Сергеев А.Н. Распределенные алгоритмы отслеживания траекторий множества объектов массивом мобильных сенсоров. Навигация и управление движением. Сборник тезисов докладов Международного семинара. Под общей редакцией И.В. Белоконова. Самара, 2020. С. 22.

A.Y. Fedorinov, V.V. Perliouk, University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg. **Development of a motion control system for small spacecraft in the group based on simulation methods**

The problem of mathematical modeling of the optimal method of grouping small-sized aircraft is considered. The modeling process will be carried out in the Matlab environment using the CubeSat example. The task is to provide a safe and efficient group flight for a variety of microsatellites in low-Earth orbit, communication between the satellites is carried out by means of radio-video signals.

УДК 629.78

М.С. ЩЕРБАКОВ, С.А. МЕДВЕДЕВ
(Самарский университет, Самара)

ПОДХОД К ПОДДЕРЖАНИЮ ИНСПЕКЦИОННОГО ДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОДНОИМПУЛЬСНОЙ ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ НОРМАЛЬНОГО ПОЛЯ ПРИТЯЖЕНИЯ ЗЕМЛИ

В работе рассматривается инспекционное движение – один из видов группового полёта космических аппаратов. Анализируется воздействие нецентральной гравитационного поля Земли и погрешности формирования начальных параметров движения на разлёт инспекционной траектории. Для поддержания инспекционного движения на протяжении миссии необходимо проводить коррекцию траектории. В результате работы предложен одноимпульсный алгоритм для поддержания инспекционного движения, основанный на методе неопределённых множителей Лагранжа.

Введение. В последнее время искусственные спутники Земли массой от 1 до 10 кг - наноспутники (НС) все чаще используются в космических задачах наряду с крупногабаритными космическими аппаратами. Достоинствами НС является низкая стоимость, малые сроки разработки и создания, что обеспечивается развитием микроэлектроники и малой массой. Эти преимущества позволили использовать НС в решении широкого спектра задач и особенно эффективно при реализации технологии группового полёта. Одним из наиболее интересных вариантов использования технологии группового полёта является инспекционное движение, при котором НС-инспектор совершает облёт объекта инспекции (ОИ), которым может быть как элемент космического мусора, так и другой космический аппарат. Актуальным является применение инспекционного движения в миссиях, направленных на построение радиоинтерферометрической базы, а также для проведения технологических экспериментов, в которых необходимо проводить исследование интересующего космического аппарата.

Доклад посвящен исследованию вопроса поддержания инспекционного движения с помощью одноимпульсной программы управления, которая строится на основе метода неопределённых множителей Лагранжа [1].

Влияние возмущающих факторов. Периодическое инспекционное движение реализуется в орбитальной системе координат (ОСК), начало которой помещается в центр масс ОИ. При этом номинальной траекторией движения НС-инспектора является квазипериодический инспекционный эллипс, центр которого совпадает с началом ОСК. Под действием возмущающих факторов, таких как нецентральность гравитационного поля Земли и остаточное сопротивление атмосферы, орбиты НС-инспектора и ОИ изменяются. Как следствие, инспекционная траектория принимает вид циклоиды, которая смещается систематически. Смещение инспекционной траектории рассматривается только в плоскости орбиты, как показано на рисунке 1.

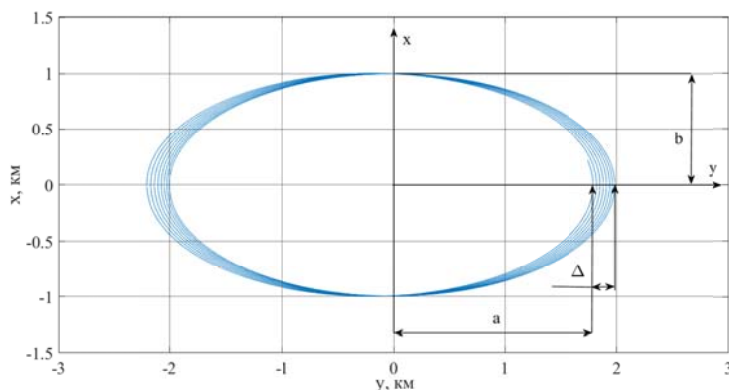


Рис. 1. Инспекционная траектория в ОСК с учётом воздействия возмущающих факторов

В работе рассматривается влияние только нецентральности гравитационного поля Земли, под влиянием которой орбиты НС-инспектора и ОИ поворачиваются в пространстве. Так как НС-инспектор и ОИ находятся в одной орбитальной плоскости, а их орбиты близки, то поворот орбит происходит практически синхронно, вследствие чего внеплоскостное движение инспекционной траектории крайне мало и им можно пренебречь.

Систематическое смещение может привести к опасному сближению НС-инспектора и ОИ или невыполнению целевой задачи космической миссии вследствие увеличения относительного расстояния на длительных интервалах времени. Допустимое отклонение инспекционной траектории от номинальной в ОСК оценивается с помощью критерия деформации, характеризующегося формулой [2]:

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta(i_0, \theta_0, H_0, e_0, q_{H0}, t^*)}{a} \leq \bar{\Delta}_{\max} \quad (1)$$

где t^* – интервал времени, на котором выполняется условие (1) при $\bar{\Delta}_{\max} = 0,05$ в работе называется временем технической устойчивости, с; Δ – отклонение инспекционной траектории, м; i_0 – начальное наклонение орбиты ОИ, рад; θ_0 – начальный аргумент широты ОИ, рад; H_0 – начальная высота полёта ОИ, м; e_0 – начальный эксцентриситет орбиты ОИ; q_{H0} – вектор начальных параметров движения НС-инспектора в ОСК [3]; a – большая полуось инспекционного эллипса, м; $\bar{\Delta}$ – относительное отклонение инспекционной траектории.

В предыдущих работах [1] было установлено, что погрешность начальных параметров движения, которая обусловлена ошибкой решения навигационной задачи, существенно влияет на скорость деформации номинальной траектории [4]. Таким образом, для поддержания инспекционного движения в окрестности номинального эллипса на протяжении всей миссии необходимо проводить корректирующие манёвры.

Формирование одноимпульсной программы управления. Для поддержания относительного расстояния и маневрирования на орбите используются двигательные установки, обеспечивающие импульсное приращение скорости. Из-за малых энергетических возможностей НС-инспектора возникают ограничения на величину и частоту приложения корректирующих импульсов. В связи с вышеперечисленными ограничениями время приложения и величину корректирующего импульса возможно определять с помощью метода неопределённых множителей Лагранжа [1]. Основная идея метода заключается в том, что величина корректирующего импульса минимизируется и определяется из условия обеспечения равенства орбитальных энергий после проведения коррекции, при рассмотрении движения в центральном поле притяжения. Минимальное значение корректирующего импульса находится с помощью нахождения минимума функции Лагранжа (2):

$$\Phi = \|\Delta v\|^2 + \lambda \cdot q(\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z, \Delta v_x, \Delta v_y, \Delta v_z, \bar{r}_f, a_l) \quad (2)$$

где λ – неопределённый множитель Лагранжа, q – функция ограничения, полученная из равенства орбитальных энергий, m^2/c^2 ; $\Delta v, \Delta v_x, \Delta v_y, \Delta v_z$ – вектор корректирующего импульса в ОСК и его проекции на оси ОСК, м/с; $\bar{v}_x, \bar{v}_y, \bar{v}_z$ – проекции скорости НС-инспектора до момента подачи корректирующего импульса, м/с; \bar{r}_f – радиус-вектор НС-инспектора в абсолютной геоцентрической системе координат, м; a_l – большая полуось орбиты ОИ, м.

Заключение. В работе проведен параметрический анализ процесса поддержания инспекционного движения и разработана одноимпульсная программа управления. Установлено, что величина корректирующего импульса, рассчитываемого по разработанной программе управления, не превышает 5,5 см/с для инспекционных эллипсов с большой полуосью до 10 км. Данная величина корректирующего импульса более чем в 3 раза меньше,

чем полученная в работе [5], что делает предложенную программу управления более выгодной для аппаратов нанокласса с точки зрения затрачиваемой энергии для выдачи одного импульса. К недостаткам такого подхода относится необходимость обеспечивать ориентацию НС-инспектора в пространстве относительно центра масс с применением активных систем стабилизации.

Работа выполнена в рамках проекта 0777-2020-0018, финансируемого из средств государственного задания победителям конкурса научных лабораторий образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Pini Gurfil** Relative Motion Between Elliptic Orbits: Generalized Boundedness Conditions and Optimal Formationkeeping, Journal of Guidance, Control, and Dynamics Vol. 28, No. 4, July–August 2005.
2. **Белоконов И.В., Щербаков М.С.** Выбор начальных условий движения, обеспечивающих техническую устойчивость группового полёта космических аппаратов. XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. (25-29 Мая 2020 г.), Санкт-Петербург, Россия, ЦНИИ Электроприбор, Сборник трудов 2020
3. **Ускова Е.А., Щербаков М.С.** Выбор орбитальных параметров и исследование устойчивости инспекционного движения по орбитам малой эллиптичности «Вестник молодых учёных и специалистов Самарского университета», 2020
4. **Белоконов И.В., Халецкая Е.В., Щербаков М.С.** Возможный подход к обеспечению инспекционного движения космического аппарата нанокласса. XIV Мультиконференция по проблемам управления. Дивноморское, Геленджик 2021 год.
5. **Белоконов И.В., Халецкая Е.В., Щербаков М.С.** Стратегия импульсного маневрирования для поддержания квазипериодического инспекционного движения наноспутника. «Космонавтика и ракетостроение» №2, 2022. С. 112-124.

M.S. Shcherbakov, S.A. Medvedev (Samara university, Samara). **Approach to maintaining inspection motion using a single-pulse control program in the Earth's normal field of gravity**

To implement space missions, they increasingly resort to inspection motion - one of the methods of group flight. Due to disturbing factors, it becomes necessary to correct the trajectory of the inspection spacecraft, which can be a nanosatellite. The control program is based on single-impulse corrections. To determine the magnitude and time of application of the impulse, the method of indefinite Lagrange multipliers is used. As a result of the work carried out, an algorithm was obtained to maintain the inspection motion.

УДК 681.51

А. Ю. ТОЛСТОНОГОВ
Институт проблем морских технологий, ДВО РАН, г. Владивосток

МЕТОД ОЦЕНКИ СКОРОСТИ НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ МАРШЕВЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Представлен метод оценки величины набегающего потока в установившемся режиме движения автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) по изменению параметров работы электропривода маршевых движителей. Приведены результаты оценки скорости движения предложенным методом в сравнении с данными доплеровского лага ММТ-3000, разработанного в Институте проблем морских технологий ДВО РАН. Расхождение оценки скорости продольной скорости составило менее 0,1 м/с в установившемся режиме движения.

Введение. Автономные необитаемые подводные аппараты всё больше используются при проведении исследований мирового океана для решения научных и промышленных задач [1, 2]. Для увеличения эффективности использования АНПА необходимо обеспечить точное движение аппарата по целевым траекториям и позиционирование в заданной точке. При этом в современных работах уделяют мало внимания точной модели исполнительных элементов движительно-рулевого комплекса, предполагая их статическими, и фокусируются на моделировании траекторного управления. В свою очередь характеристики исполнительных механизмов существенно зависят от разных параметров, в особенности от направления и скорости набегающего потока. Например, эффективность туннельных подруливающих устройств экспоненциально падает с увеличением скорости набегающего потока [3], а управляющие моменты рулевых устройств, полностью зависят от скорости набегающего потока. Доплеровский лаг, который обычно устанавливается на АНПА в случае сильных приливных или океанских течений, может создать ошибочное представление о скорости набегающего потока, т.к. измеряет скорость движения АНПА относительно донного грунта. При этом устанавливать дополнительные устройства для измерения величины набегающего потока, например, индукционный лаг на подводный аппарат нецелесообразно ввиду нерационального увеличения массогабаритных параметров подводного аппарата.

Доклад посвящен новому методу оценки скорости набегающего потока в установившемся режиме движения АНПА по изменению параметров работы электропривода маршевых движителей без дополнительного оборудования. Предлагаемый метод позволяет оценивать результирующую скорость набегающего потока с учётом скорости морского течения. Под установившимся режимом подразумевается движение с постоянной скоростью без изменения её направления.

Модель маршевого движителя. Величину упора T , создаваемого маршевым движителем, и соответствующего момента сопротивления вращению Q гребного винта можно записать следующим образом [4, 5]:

$$\begin{aligned} T &= K_T(J_0)\rho D^4 n |n|, \\ Q &= K_Q(J_0)\rho D^5 n |n|, \end{aligned} \quad (1)$$

где D – диаметр гребного винта, м; ρ – плотность воды, кг/м³; n – частота вращения гребного винта, с⁻¹; а $K_T(J_0)$ и $K_Q(J_0)$ – безразмерные коэффициенты упора и момента, J_0 – относительная поступь. Эта величина определяется как:

$$J_0 = \frac{v}{nD}, \quad (2)$$

где v представляет собой скорость набегающего потока, м/с.

Пользуясь линеаризованной аппроксимацией коэффициентов момента гребного винта $K_Q(J_0) = K_Q(0) - \beta J_0$ [6], и на основе модели электрического привода постоянного тока независимого возбуждения, который в подавляющем большинстве случаев используется при разработке подводных движителей, можно установить следующую зависимость для оценки скорости набегающего потока для маршевого движителя в проекции на его ось вращения:

$$v_t = \frac{1}{\beta} \left(K_Q(0)nD - \frac{K_m I}{\rho D^4 |n|} \right), \quad (3)$$

где $K_Q(0)$ – коэффициент момента рассчитанный во время швартовых испытаний движителя, β – безразмерный пропорциональный коэффициент линейной аппроксимации момента; K_m – коэффициент момента электродвигателя, Нм/А; I – ток, возникающий в его обмотках, А.

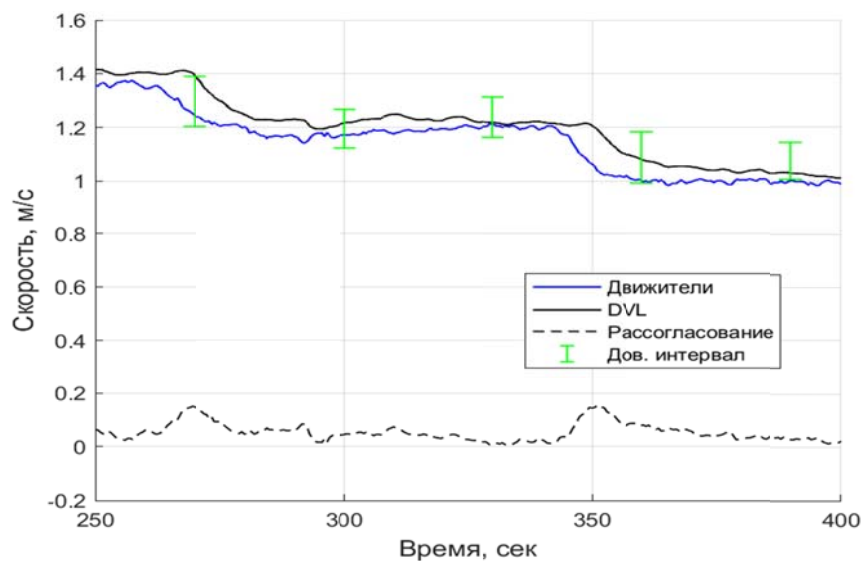
Если маршевый движитель отклонён от продольной оси АНПА, то скорость набегающего потока в связанной с аппаратом системе координат можно высчитать следующим образом:

$$v \approx \frac{v_t}{\cos \psi_t \cos \theta_t}, \quad (4)$$

где v_t – скорость потока, рассчитанная относительно маршевого движителя t (3), а ψ_t и θ_t – наклон продольной оси движителя в горизонтальной и вертикальной плоскостях, соответственно, рад. Выражение [4] представляет собой первичное линейное приближение без учета нелинейного взаимодействия между набегающим потоком и корпусом движителя.

Апробация метода. Предлагаемый метод оценки скорости был апробирован в результате анализа данных запуска АНПА «ММТ-3000» [7] в бухте Патрокл (г. Владивосток) в 2019 году. Подводный аппарат оснащен маршевой группой из трех движителей, расположенных под углом к его продольной оси. В виду того, что запуски проходили в закрытой бухте величиной морского течения можно пренебречь и в этом случае скорость набегающего потока равна скорости продольного движения АНПА измеренного относительно грунта при помощи доплеровского лага (DVL). На рисунке отображена средняя скорость набегающего потока, рассчитанная по изменению параметров работы электрических приводов маршевых движителей по сравнению с показаниями продольной скорости АНПА, полученной доплеровским лагом.

Пропорциональный коэффициент линейной аппроксимации момента β был предварительно рассчитан на основе калибровочных запусков АНПА.



Скорость продольного движения АНПА «ММТ-3000» полученная на основе обработки параметров работы движителей

Заключение. В работе представлен метод оценки скорости набегающего потока по изменению параметров работы электрического привода маршевого движителя. Метод основан на линеаризованной модели коэффициента момента гребного винта и модели электрического привода в устоявшемся режиме работы. Расхождение оценки скорости маршевого движения составило менее 0,1 м/с по сравнению с показаниями доплеровского лага в установившемся режиме движения, что приемлемо для качественного расчета влияния набегающего потока на эффективность работы исполнительных механизмов ДРК.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Dang F., Zhang F.** Distributed flow estimation for autonomous underwater robots using POD-based model reduction // *2018 IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. – IEEE, 2018. – С. 4453-4458.
2. **Page B.R. и др.** Highly maneuverable low-cost underwater glider: Design and development // *IEEE Robotics and Automation Letters*. – 2016. – Т. 2. – №. 1. – С. 344-349.
3. **Palmer A., Hearn G.E., Stevenson P.** Modelling tunnel thrusters for autonomous underwater vehicles // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2008. – Т. 41. – №. 1. – С. 91-96.
4. **Fossen T. I.** Guidance and control of ocean vehicles // University of Trondheim, Norway, Printed by John Wiley & Sons, Chichester, England, ISBN: 0 471 94113 1, Doctors Thesis. – 1999.
5. **Whitcomb L.L., Yoerger D.R.** Development, comparison, and preliminary experimental validation of nonlinear dynamic thruster models // *IEEE journal of oceanic engineering*. – 1999. – Т. 24. – №. 4. – С. 481-494.
6. **Fossen T.I., Blanke M.** Nonlinear output feedback control of underwater vehicle propellers using feedback from estimated axial flow velocity // *IEEE Journal of oceanic Engineering*. – 2000. – Т. 25. – №. 2. – С. 241-255.
7. **Горняк В.Е. и др.** ММТ-3000-новый малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат Института проблем морских технологий ДВО РАН // *Подводные исследования и робототехника*. – 2007. – №. 1. – С. 12-20.

A. Yu. Tolstonogov, (Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, Russia). **Method of Incoming Flow Evaluation Based on Propulsion System Observation**

The efficiency of an underwater vehicle propulsion system strongly depends on external conditions, in particular on the magnitude of the incoming flow. This is especially critical for the automatic control of tunnel thrusters and rudders of an autonomous underwater vehicle (AUV). This report presents a steady-state propulsion-based method for estimating the magnitude of the incoming flow.

The results of estimating the incoming flow velocity by the proposed method are presented in comparison with a Doppler log data obtained on the AUV "ММТ-3000" developed at the Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences. The difference in the longitudinal velocity estimate was less than 0.1 m/s in the steady-state motion.

УДК 681.51

А. Ю. ТОЛСТОНОГОВ
(Институт проблем морских технологий, ДВО РАН, г. Владивосток)

МЕТОД АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВИЖИТЕЛЬНО-РУЛЕВОГО КОМПЛЕКСА ПОДВОДНОГО АППАРАТА

Рассматривается метод анализа эффективности движительно-рулевого комплекса подводного аппарата, оснащенного избыточной группой маршевых и подруливающих движителей и рулевых устройств. Предлагается метод оценки области допустимых векторов управления движением автономных необитаемых подводных аппаратов, сформированных при заданных условиях движения и конфигурации элементов движительно-рулевого комплекса.

Введение. Современные многоцелевые автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) представляют собой новый класс подводных робототехнических объектов, с присущими ему новыми задачами. Такие АНПА оснащены сложным движительно-рулевым комплексом (ДРК), состоящим из маршевых движителей и рулевых устройств для развития высокой скорости (1.5 – 2 м/с) и маневрирования в данных условиях – это необходимо для выполнения широкого круга задач по мониторингу и океанографическому картографированию характеризующихся большой областью покрытия. Кроме того, для решения задачи высокоточного картографирования при помощи фотосистемы и акустического мониторинга многоцелевые АНПА оснащают подруливающими шахтами в дополнении к маршевому ДРК для реализации позиционирования АНПА в заданных координатах или движения малым ходом (менее 1 м/с).

Особенность подруливающих и рулевых исполнительных механизмов ДРК заключается в существенной зависимости их эффективности от скорости набегающего потока [1, 2], которую необходимо учитывать для корректного управления ДРК подводного аппарата в различных условиях движения и плавного переключения режимов управления.

Настоящий доклад посвящён разработке метода анализа эффективности ДРК, который учитывает гидродинамические особенности исполнительных механизмов. В рассматриваемом контексте под эффективностью понимается способность ДРК реализовывать целевые значения сил и моментов, формируемых системой управления при тех или иных внешних условиях. Метод позволяет формировать область допустимых значений векторов управления движением АНПА, которые могут быть реализованы ДРК при заданной конфигурации его исполнительных механизмов и текущих условиях движения. Это позволит плавно перестраивать траекторное управление движением АНПА в зависимости от эффективности исполнительных механизмов ДРК.

Метод анализа эффективности ДРК. Положим, что АНПА оснащен маршевой группой из m движителей, p подруливающими движителями и q рулевыми устройствами. Тогда взаимосвязь между воздействиями, создаваемыми всеми исполнительными механизмами ДРК (вектор управления ДРК) $\vec{u} = \{u_1, \dots, u_m, u_{m+1}, \dots, u_{m+p}, \dots, u_{m+p+q}\}$ и вектором управления движением аппарата $\vec{v} \in \mathbb{R}^n$, где n – число управляемых степеней свобод определяется следующим выражением [3]:

$$\vec{v} = C(v)\vec{u} = BD(v)\vec{u}, \quad (1)$$

где:

- $B \in \mathbb{R}^{n \times (m+p+q)}$ – матрица геометрии ДРК, которая определяет влияние исполнительных механизмов ДРК на [4];
- $D(v) \in \mathbb{R}^{n \times (m+p+q)}$ – матрица коэффициентов влияния набегающего потока [5], которая определяет, насколько падает эффективность исполнительных механизмов управления движением в зависимости от величины набегающего потока;
- v – скорость набегающего потока.

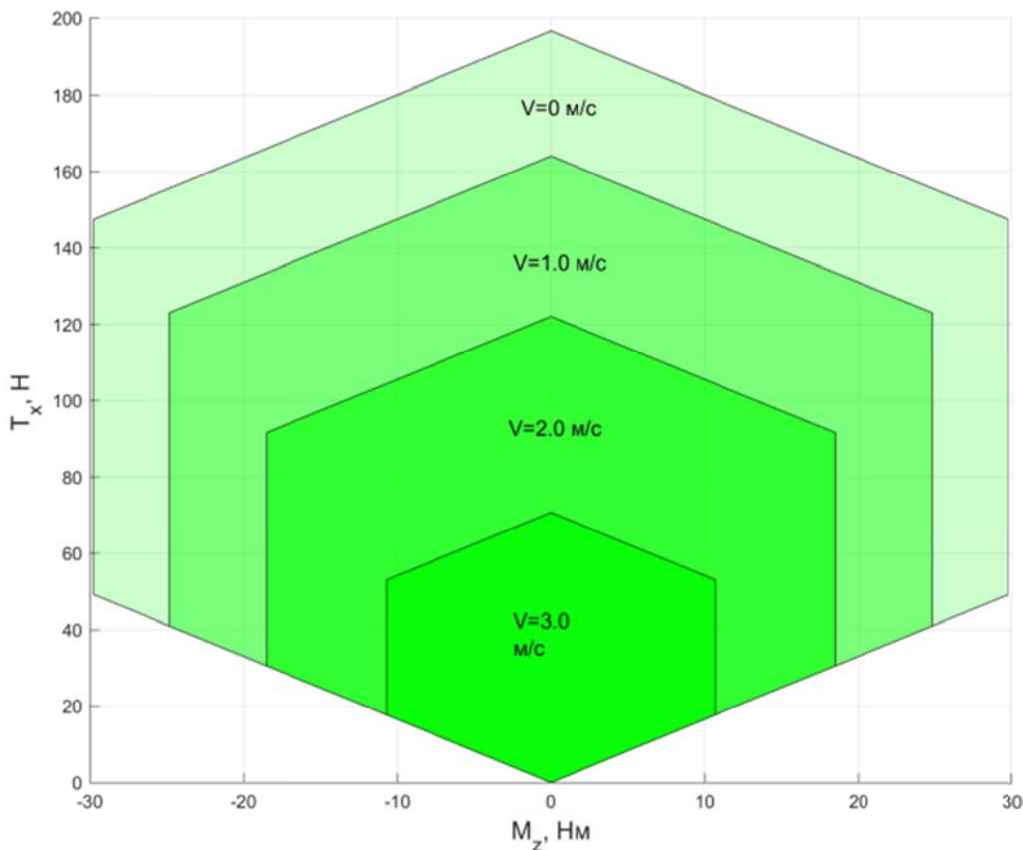
Научный руководитель к.т.н., зав. лаб. Костенко Владимир Владимирович.

Такой формализованный подход к взаимоотношению между \vec{u} и \vec{V} позволяет вычислять вектор управления ДРК при заданном векторе управления движением аппарата \vec{V}_c , который был выработан траекторной системой управления движением АНПА. Необходимый при этом \vec{u}_c определяется следующим образом:

$$\vec{u}_c = C^{-1}(v)\vec{V}_c. \quad (2)$$

Выражение 1 позволяет оценить область допустимых значений \mathbb{F}^n векторов управления движением АНПА \vec{V}_c в случае ограничений, накладываемых на исполнительные механизмы ДРК. \mathbb{F}^n будет представлять собой выпуклую оболочку для векторов, образованных линейным преобразованием матрицей $BD(v)$ вершин области допустимых значений $\mathbb{T}^{(m+p+q)}$, где $\mathbb{T}^{(m+p+q)}$ является гиперкубом с вершинами во всех таких векторах \mathbf{u}^l , где u_i^l принимают значения u_i^{\min} либо u_i^{\max} , которые, в свою очередь, определяют минимальное и максимальное допустимое значение управляющего сигнала для i -го исполнительного механизма ДРК.

Пример анализа эффективности. На рисунке представлена проекция области допустимых значений управления на оси T_x (продольная сила) и M_z (момент по курсу) для АНПА ММТ-200 [6] в зависимости от скорости набегающего потока. ДРК представленного аппарата состоит из четырех маршевых движителей, отклонённых от продольной оси аппарата на угол 22.5 градусов и вертикальной подруливающей шахты в передней части аппарата.



Область допустимых значений управления в проекции на оси T_x (продольная сила) и M_z (момент по курсу) для АНПА «ММТ-200».

Заключение. В докладе представлен метод анализа эффективности ДРК подводного аппарата. Метод заключается в формировании области допустимых значений векторов управления движением подводного аппарата на основе матрицы геометрии ДРК и матрицы гидродинами-

ческих особенностей исполнительных механизмов ДРК. Такой подход позволяет определять, какие вектора управления движением подводного аппарата при заданных условиях движения ДРК способен реализовать и соответствующим образом перестроить систему траекторного управления движением. В особенности такой подход важен для АНПА, оснащенного ДРК с большим количеством разнородных исполнительных механизмов. Приведен пример формирования такой области для АНПА «ММТ-200».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Palmer A., Hearn G.E., Stevenson P.** Modelling tunnel thrusters for autonomous underwater vehicles // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2008. – Т. 41. – №. 1. – С. 91-96.
2. **Stenson L.V. и др.** Control of an AUV from thruster actuated hover to control surface actuated flight. – 2011.
3. **Johansen T.A., Fossen T.I.** Control allocation—A survey // *Automatica*. – 2013. – Т. 49. – №. 5. – С. 1087-1103.
4. **Армишев, С.В.** Исследование структуры движительных комплексов подводных аппаратов // *Подводные аппараты и роботы*. — М. Ин-т океанологии им П.П. Ширшова АН СССР, 1986.
5. **Godhavn J.M., Fossen T.I., Berge S.P.** Non-linear and adaptive backstepping designs for tracking control of ships // *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*. – 1998. – Т. 12. – №. 8. – С. 649-670.
6. **Костенко В. В., Толстоногов А. Ю.** Задача декомпозиции управления движением АНПА с учетом изменяющихся ограничений маршевых движителей // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. – 2019. – №. 1 (203). – С. 210-222.

A. Yu. Tolstonogov (Institute of Marine Technology Problems FEB RAS, Vladivostok, Russia). **Dynamic analysis of an underwater vehicle propulsion system**

Modern multi-purpose autonomous underwater vehicles (AUVs) require special attention to the implementation of motion control algorithms. Due to the design specifics, this class of underwater vehicles is equipped with an over-actuated propulsion system. Such system allows the same control action to be implemented by a different combination of control actions of propulsion system elements. At the same time, it is important to take into account the effectiveness of propulsion system elements and their limitations in certain conditions of underwater vehicle movement.

This report proposes a method for dynamic analysis of the propulsion system of an underwater vehicle equipped with an over-actuated propulsion system. A method allows making a feasible set of vehicle control forces that can be formed by a propulsion system under dynamic limitations.

СЕКЦИЯ 6. ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ И СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.76.78

А. А. АРИСТОВ, М. А. ЕПРИНЦЕВ

(Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург)

ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМА «EFFICIENT-PERSPECTIVE-N-POINTS» ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ОПТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ МИКРОСПУТНИКОВ В ГРУППЕ

Для решения проблемы определения углового положения микроспутника относительно ведущего аппарата предлагается использовать алгоритм “Efficient-Perspective-n-Points”. Рассматриваемый алгоритм позволяет решить поставленную задачу при помощи лишь одной камеры, имеет линейную (относительно числа маркеров) сложность, но требует дополнительной фильтрации данных и точного знания параметров камеры.

Введение. В настоящее время благодаря тенденции миниатюризации космических аппаратов есть возможность использовать группу спутников вместо единого большого спутника. Это позволяет уменьшать стоимость проекта, заменять отдельные спутники в составе созвездия, добавлять новые спутники в группу. Для управления угловым положением ведомого микроспутника относительно ведущего аппарата в составе группы предлагается использовать оптический метод определения ориентации. В этом случае на ведомом спутнике устанавливаются оптические маркеры, а на ведущем — камера. По координатам маркеров на изображении определяются их координаты и ориентация ведомого спутника относительно ведущего.

К наиболее распространенным алгоритмам определения углового положения тела в пространстве с помощью оптических устройств относятся: Ansar-Daniilidis [1] (метод позволяет найти решение на основе общей процедуры линеаризации квадратичных систем, Clamped Direct Linear Transformation [2] (метод прямой линейной трансформации), ЛНМ [3] (метод, основанный на предположении о так называемой слабой перспективе), Efficient-Perspective-n-Points (EPnP) [4] (метод основан на определении координат с помощью трех и более точек).

Предлагаемый доклад посвящён изучению возможности применения алгоритма EPnP при использовании оптического метода определения (в целях последующего управления) ориентацией микроспутников в группе. В качестве маркеров предлагается использовать 4 инфракрасных светодиода при их известном расположении на видимой грани спутника.

Описание алгоритма EPnP. Алгоритм EPnP позволяет с помощью одной камеры определять положение объекта в трёхмерном пространстве, если известны характеристики камеры и расположение маркеров на поверхности объекта. В основе рассматриваемого алгоритма лежит уравнение [5]:

$$sp = A[C, t]P_w, \quad (1)$$

где s – коэффициент масштабирования, который не зависит от параметров камеры и является прямо пропорциональным расстоянию между камерой и наблюдаемым объектом;

$p = [u, v, 1]^T$; u, v – координаты маркера на изображении, выраженные в пикселях;

A – матрица внутренней калибровки камеры, характеризующая параметры камеры;
 C – матрица поворота системы координат, связанной с ведущим спутником, относительно мировой системы координат;

t – 3-мерный вектор, представленный в связанной с ведущим спутником системе координат и идущий от центра мировой системы координат к центру системы координат этого аппарата;

P_w – 4-мерный вектор координат маркеров в мировой системе координат и 1. Внутренняя матрица камеры описывает параметры камеры и имеет следующую структуру [5]:

$$A = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где f_x, f_y – фокусные расстояния камеры по двум осям;

c_x, c_y – координаты основной точки (точка пересечения плоскости изображения с оптической осью, совпадающая с центром фотографии).

Так как большинство матриц камер содержит четное количество пикселей, то в этих случаях не существует пикселя, находящегося непосредственно в центре изображения. Поэтому в качестве основной точки используется один из пикселей, максимально приближенных к центру изображения.

В качестве макета для оценки работы алгоритма используется спутник формата CubeSat, на каждой боковой грани которого расположены 4 инфракрасных светодиода. Положение диодов на каждой грани известны априорно. Коэффициент масштабирования s принимается равным расстоянию между камерой и макетом. Значения матрицы поворота C и вектора t устанавливаются до получения изображения. Для определения положения макета относительно камеры необходимо выразить из уравнения (1) координаты каждого маркера на изображении и учесть дефекты камеры. Для расчета положения тела в пространстве необходимо решить систему уравнений [6]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \left(\frac{X_{c_i}}{Z_{c_i}} \cdot \frac{1+k_1r_i^2+k_2r_i^2+k_3r_i^2}{1+k_4r_i^2+k_5r_i^2+k_6r_i^2} + 2p_1 \frac{X_{c_i}Y_{c_i}}{Z_{c_i}^2} + p_2 \left(r_i^2 + 2 \left(\frac{X_{c_i}}{Z_{c_i}} \right)^2 \right) + s_1r_i^2 + s_2r_i^4 \right) + c_x \\ f_y \left(\frac{Y_{c_i}}{Z_{c_i}} \cdot \frac{1+k_1r_i^2+k_2r_i^2+k_3r_i^2}{1+k_4r_i^2+k_5r_i^2+k_6r_i^2} + p_1 \left(r_i^2 + 2 \left(\frac{Y_{c_i}}{Z_{c_i}} \right)^2 \right) + 2p_2 \frac{X_{c_i}Y_{c_i}}{Z_{c_i}^2} + s_3r_i^2 + s_4r_i^4 \right) + c_y \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} X_{c_i} & Y_{c_i} & Z_{c_i} \end{bmatrix}^T = [C|t] \begin{bmatrix} X_{w_i} & Y_{w_i} & Z_{w_i} & 1 \end{bmatrix}^T, \quad i = \overline{1, N}, \\ (X_{c_i} - X_{c_j})^2 + (Y_{c_i} - Y_{c_j})^2 + (Z_{c_i} - Z_{c_j})^2 = l_{i,j}^2, \quad i = \overline{1, N-1}, j = \overline{i+1, N}, \end{array} \right. \quad (3)$$

где $i = \overline{1, N}$ – номер маркера;

N – количество маркеров, $N > 2$;

u_i, v_i – координаты i -го маркера на изображении, выраженные в пикселях;

$X_{w_i}, Y_{w_i}, Z_{w_i}$ – координаты i -го маркера в мировой системе координат;

$X_{c_i}, Y_{c_i}, Z_{c_i}$ – координаты i -го маркера в связанной с камерой системе координат;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ – коэффициенты радиальной дисторсии, зависящие от камеры;

p_1, p_2 – зависящие от камеры коэффициенты тангенциальной дисторсии;

s_1, s_2, s_3, s_4 – зависящие от камеры коэффициенты призматической дисторсии;

$r_i^2 = \left(X_{c_i}^2 + Y_{c_i}^2 \right) / Z_{c_i}^2$; $l_{i,j}$ – расстояние между i -м и j -м маркерами.

Дисторсия – это аберрация оптических систем, при которой коэффициент линейного увеличения изменяется при удалении отражаемых предметов от оптической оси. Влияние этого эффекта приводит к искажениям формы объекта на изображении, искривлению прямых линий [7]. Учет дисторсии важен для повышения точности измерений. Коэффициенты, характеризующие дисторсию, уникальны для каждой линзы, зависят от множества факторов (например, форма линзы, повреждения поверхности линзы) и должны быть определены при калибровке.

Значения параметров $k_1...k_6$, p_1 , p_2 , $s_1...s_4$ определяются при калибровке камеры. Значения $l_{i,j}$ зависят от расположения маркеров на боковой грани микроспутника и устанавливаются при сборке аппарата. Значения координат u , v для каждого маркера определяются в результате проведения измерений. Система уравнений (3) имеет единственное решение, в виде координат каждого маркера относительно мировой системы координат $X_{w_i}, Y_{w_i}, Z_{w_i}$ и относительно камеры $X_{c_i}, Y_{c_i}, Z_{c_i}$ в 3-мерной системе координат. На основании этих данных возможно определить угловое положение макета относительно камеры, расстояние между макетом и камерой. Решать систему уравнений (3) предполагается методом Гаусса. Таким образом, для функционирования системы достаточно одной камеры.

Преимущества алгоритма EPnP. Можно выделить следующие преимущества использования выбранного алгоритма, обеспечивающего решение задачи управления пространственной ориентацией микроспутников в группе:

- линейная (относительно числа маркеров) сложность алгоритма, что позволяет снизить требования к параметрам бортового компьютера, упростить решение задачи оптимизации программного обеспечения спутника;
- работоспособность при использовании лишь одной камеры.

Недостатки алгоритма EPnP. Можно выделить следующие недостатки использования выбранного алгоритма при решении навигационной задачи для группы спутников:

- необходимость дополнительной обработки и фильтрации результатов измерений [4];
- необходимость определения параметров камеры с высокой точностью.

Заключение. В предлагаемом докладе изучена возможность применения алгоритма EPnP (Efficient-Perspective-n-Points) при использовании оптического метода определения пространственной ориентацией микроспутников в группе, в целях их последующего управления. Рассматриваемый метод позволяет решить поставленную задачу, однако требует фильтрации данных и точного знания параметров камеры. В настоящее время разрабатывается программное обеспечение для проверки представленной математической модели на практике. Также ведутся исследования в следующих направлениях: адаптация метода для возможности использования нескольких камер с целью повышения точности результатов измерения, выбор метода фильтрации результатов измерения при условии обеспечения необходимых точности и быстродействия системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ansar and K. Daniilidis. Linear pose estimation from points or lines. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pages 578–589, 2003.
2. Y.I. Abdel-Aziz and H.M. Karara. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. *In Proc. ASP/UI Symp. Close-Range Photogrammetry*, pages 1–18, 1971.
3. C.-P. Lu, G. D. Hager, and E. Mjolsness. Fast and globally convergent pose estimation from video images. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pages 610–622, 2000.
4. V. Lepetit, F. Moreno-Noguer, P. Fua. EPnP: An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem. *In International Journal Of Computer Vision*, pages 155–166, 2009.
5. Skrypnuk and D. G. Lowe. Scene modelling, recognition and tracking with invariant image features. *In International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pages 110– 119, Arlington, VA, November 2004.

6. Camera Calibration and 3D Reconstruction [Электронный ресурс]. URL: https://docs.opencv.org/3.4/d9/d0c/group__calib3d.html (дата обращения - 15.12.2021).
7. Д. С. Волосов. Глава II. Оптические aberrации объективов // Фотографическая оптика. — 2-е изд. — М.,: «Искусство», 1978. — С. 91—234. — 543 с.

A.A.Aristov, M.A.Eprintcev, (Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, St. Petersburg). **Application of the "Efficient-Perspective-n-Points" algorithm when using the optical method for control of the spatial orientation of microsattellites in a group**

At present, it is possible to use a group of microsattellites instead of one large satellite. To solve the problem of relative spatial orientation, it is proposed to use the "Efficient-Perspective-n-Points" method.

The method under consideration makes it possible to solve the problem with only one camera, it has linear complexity, but the measurement results require additional processing.

УДК 629.056.8

Н.А. МОРЯКОВ, А.А. КУМАРИН
(Самарский университет, Самара)

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПО ВИДИМОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ

Существующие методы определения ориентации космического аппарата по двум векторным измерениям работают не во всех случаях. В данной работе предлагается метод, который определяет ориентацию по видимым навигационным спутникам. Подтверждена работоспособность метода с использованием данных формата RINEX.

Введение. Существуют методы определения ориентации космического аппарата (КА) с помощью различных датчиков. При определенных условиях сложно определить ориентацию на спутниках, так как для определения ориентации большинству методов необходимы два вектора. В качестве одного из них можно использовать, например, вектор индукции магнитного поля, измеряемый магнитометром [1]. В качестве второго можно взять направление на Солнце, однако его не всегда возможно определить. Кроме того, измерительные средства могут выйти из строя в процессе полета [2] и было бы полезно иметь резервный способ определения ориентации аппарата на такой случай. Для решения этой проблемы предлагается метод, который поможет с помощью приемника спутниковой навигации определить ориентацию КА по видимости навигационных космических аппаратов (НКА).

Метод определения положения видимых НКА. Методы для наземного и космического случаев отличаются, так как в них по-разному моделируется затенение сигнала Землей. Для наземного варианта видимыми считаются не затененные Землей НКА из верхней полусферы. Для космического также могут рассматриваться не затененные аппараты из нижней полусферы, поскольку возможно наличие второй навигационной антенны.

Преобразование орбитальных параметров из эфемерид в прямоугольные координаты реализовано формулой [3]:

$$r = r_{SMA} \begin{bmatrix} \cos(u) \cos(\Omega) - \sin(u) \sin(\Omega) \cos(i) \\ \cos(u) \sin(\Omega) + \sin(u) \cos(\Omega) \cos(i) \\ \sin(u) \sin(i) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где: r – радиус-вектор от центра Земли до НКА; r_{SMA} – радиус орбиты НКА; i – наклонение орбиты; u – аргумент широты; Ω – долгота восходящего узла орбиты.

В работе использовались исходные данные из [4], представленные в формате RINEX. Это формат обмена данными спутниковых навигационных приемников. Он позволяет пользователям производить пост-обработку полученных данных для выполнения более точных вычислений – обычно с помощью других данных, неизвестных приемнику, например, за счет применения более точной модели атмосферных параметров в момент измерений.

Метод определения ориентации. Вектор V , идущий от фазового центра антенны приемника в сторону главного лепестка ее диаграммы направленности, в системе координат, связанной с Землей, оценивается как

$$\hat{V} = \sum_{i=1}^n (r_i - V_{RCV}), \quad (2)$$

где r_i – радиус-вектор, идущий от центра Земли к i -му НКА, V_{RCV} – радиус-вектор, идущий от центра Земли к антенне полученный по данным приемника.

Вычислительный эксперимент на модельных данных. Для эксперимента данные о положении НКА (для примера системы GPS, но метод может работать и с любой другой, которую способен обработать приемник) были получены с помощью наземного приемника, подключенного к базе CDDIS NASA [4]. Результат представлен на рисунке 1(а), где звездочками указаны все положения НКА, а линии проведены от наземной антенны только к видимым. Видимость определяется попаданием в верхнюю полусферу. На рисунке 1(б) представлен результат работы метода определения ориентации антенны. Для определения полной ориентации приемника необходим также второй вектор, например, от магнитометра или датчика освещенности, либо наличие не менее двух навигационных антенн.

Требование к точности определения ориентации КА зависит от решаемой им задачи. Например, для оптических наблюдений обычно требуется точность порядка градусов и менее, для ориентирования направленных телеметрических антенн требуется точность порядка 10-30 градусов в зависимости от диаграммы направленности [5]. Данный метод не позволит получать приемлемые точности для первого случая, однако в аварийном случае для второй задачи точности может быть достаточно. Точность самого метода определяется прежде всего количеством видимых спутников. При видимости 3-5 спутников точность может быть хуже 30 градусов, при видимости более 10 спутников точность может быть значительно лучше, однако для приемника на космическом аппарате такие ситуации не часты.

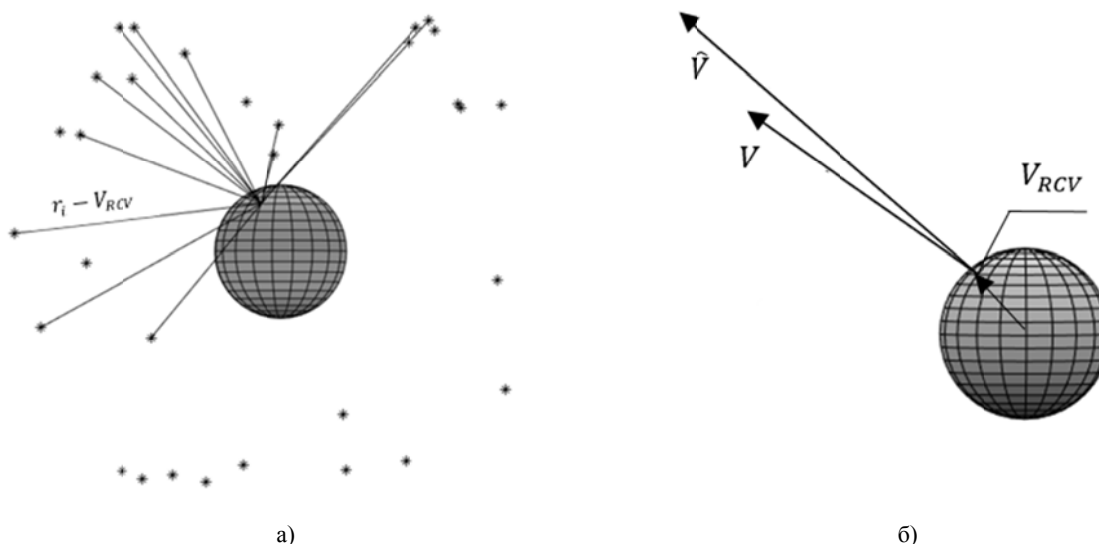


Рис. 1. Результаты работы методов по определению видимых НКА (а) и определению ориентации (б).

Заключение. В работе был апробирован метод определения ориентации по видимости навигационных космических аппаратов. С помощью данных, полученных из [4], были определены местоположения всех НКА, а затем, с наложением ограничений на видимость, местоположение видимых НКА. В программной модели был получен вектор ориентации навигационной антенны, но с большой погрешностью, поэтому в будущем планируется рассмотреть метод наименьших квадратов для уменьшения величины погрешности или иные методы. Отметим, что для определения полной ориентации необходим также второй вектор, полученный иным способом, например, с помощью магнитометра или датчиков освещенности. Разработанный в данной работе метод может рассматриваться как метод грубой оценки ориентации при отказе основных измерительных средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоконов И. В., Крамлих А. В. Методика восстановления ориентации космического аппарата при комплексировании магнитометрических и радионавигационных измерений // Вестник СГАУ. 2007. №1. С. 1-9.
2. Kramlikh A.V., Lomaka I.A., Shafran S.V. Estimation Method for Nanosatellite Orbital Parameters in Case of Abnormal Operation of Navigation Equipment, collection of articles and reports "Integrated inertial and satellite navigation systems", St. Petersburg, CSRI Elektropribor 2020. P. 1-4.

3. Дударев В.И. Преобразование основных систем координат, в применяемых в космической геодезии. М.: Наука, 2010. С. 1-9.
4. National Aeronautics and Space Administration. URL: <https://cddis.nasa.gov>.
5. Belokonov I.V., Kramlikh A.V., Melnik M.E. Estimation of the nanosatellite attitude and angular rate by analyzing the navigation spacecraft geometrical visibility using the controllable pattern of navigation antenna, collection of articles and reports "Integrated inertial and satellite navigation systems", St. Petersburg, CSRI Elektropribor 2017. P. 1-4.

N.A. Moryakov, A.A. Kumarin, (Samara University, Samara). **Development of a method for determining the attitude of a spacecraft by navigation satellites visibility**

Existing methods for determining the attitude of a spacecraft from two vector measurements is not always applicable. In this paper, an alternative method is proposed that determines the attitude by navigation satellites visibility. Using RINEX format data, the coordinates of all satellites were obtained, their visibility was determined. As the result, the performance of the algorithm was confirmed.

УДК 629.78

А.А. КУМАРИН, А.Н. СОБОРНИЦКАЯ
(Самарский университет, Самара)**ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ НА АППАРАТАХ ФОРМАТА POKETCUBE**

Для решения многих задач на спутниках формата PocketCube требуется обеспечение ориентации. В данной работе рассмотрена реализация метода обеспечения ориентации с помощью магнитных катушек. Оценены моменты внешних сил, действующих на аппарат на низких околоземных орбитах, и момент, который должны создавать катушки для изменения ориентации аппарата. Установлен магнитный момент катушки. Показано, что его можно создать плоскими печатными катушками в рамках возможностей бортовой системы питания.

Введение. Аппарат формата PocketCube представляет собой уменьшенную в два раза по линейным размерам версию стандартного CubeSat [1]. По причине малых размеров он интересен в первую очередь как более бюджетный способ доставки компактной полезной нагрузки на орбиту, либо как образовательный проект, который могут себе позволить не только самые крупные ВУЗы. Основной проблемой столь малых аппаратов является малая генерация энергии солнечными панелями [2], которые имеют меньший КПД и площадь, чем большинство CubeSat. Решить эту проблему возможно с помощью раскрываемых солнечных панелей, однако такое решение потребует обеспечения ориентации их на Солнце. На столь малом аппарате эта задача вызывает сложности. Применение маховиков возможно, но требует слишком много полезного пространства [3].

Доклад посвящен исследованию применимости альтернативного метода ориентации аппарата – с помощью магнитных катушек. Ключевые вопросы, на которые будут даны ответы в работе: какой момент должны создавать магнитные катушки, возможно ли сделать их плоскими, какой ток от бортовой системы питания они могут при этом потреблять.

Расчет моментов, действующих на аппарат. Для расчетов использовались исходные данные для планируемого образовательного пикоспутника MiniSat [1] формата PocketCube-2P. Данные приведены в таблице 1:

Т а б л и ц а 1

Исходные данные для расчетов			
Параметр	Значение	Параметр	Значение
Масса (m), кг	0,5	Высота орбиты (h), км	400
Длина (b), мм	100	Продольный момент инерции (I_z), кг·м ²	$5,2 \cdot 10^{-4}$
Ширина/глубина (a), мм	50	Поперечный момент инерции (I_x), кг·м ²	$2 \cdot 10^{-4}$

Движение аппарата относительно центра масс обусловлено в основном двумя моментами: гравитационным и аэродинамическим. Для оценки момента, который должны создавать магнитные катушки для обеспечения нужной ориентации, необходимо оценить максимальные значения этих моментов. Для упрощения будем считать, что движение происходит в плоскости орбиты, поскольку вращение аппарата вокруг продольной оси не вносит принципиальной разницы в моменты и для оценочного моделирования может быть опущено.

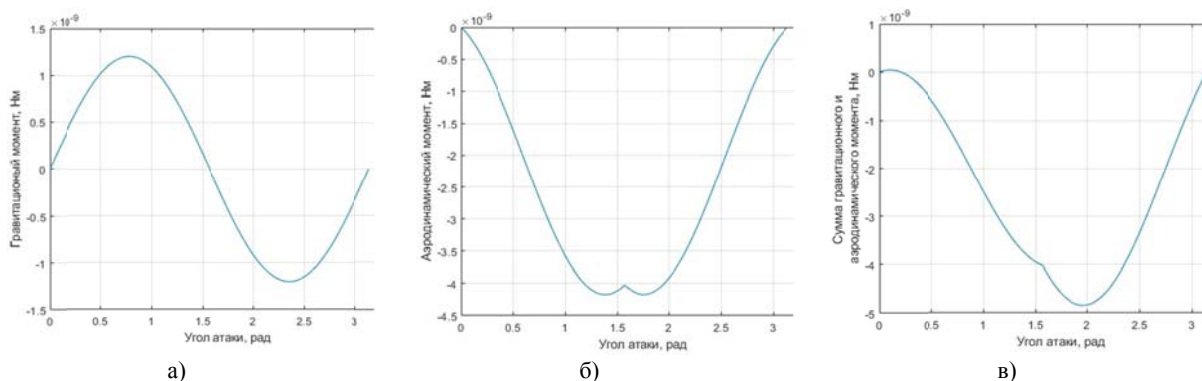
Гравитационный момент вычислялся по формуле (1), а аэродинамический по формуле (2) [4]:

$$M_g = \frac{3k(I_x - I_z)}{2(R + h)^3} \sin(2\alpha), \quad (1)$$

$$M_a(\alpha) = -c_{xa} \left(\left| \cos \alpha \right| + \frac{b}{a} \frac{4}{\pi} \left| \sin \alpha \right| \right) a^3 \Delta x \rho \frac{v^2}{2} \sin \alpha, \quad (2)$$

где k – гравитационный параметр Земли, α – угол атаки, ρ – плотность атмосферы, Δx – запас характеристической устойчивости, v – скорость набегающего потока. c_{xa} – баллистический коэффициент, R – радиус земли

В зависимости от угла атаки моменты распределяются как показано на рисунке.



Моменты, действующие на спутник: а) гравитационный, б) аэродинамический, в) суммарный

Максимальный суммарный момент внешних сил по модулю (M_{ag}), таким образом, составляет порядка $5 \cdot 10^{-9} \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Расчет магнитного момента и параметров катушки. Для того чтобы гарантировать управляемость, момент, создаваемый катушками, должен быть хотя бы на порядок больше суммарного момента внешних сил. Момент силы взаимодействия одной катушки с магнитным полем Земли равен векторному произведению индукции поля и магнитного дипольного момента катушки, а, значит, пропорционален синусу угла между ними.

При использовании релейного управления катушки включаются на полную мощность, либо выключаются, причем для экономии энергии может активироваться только одна из трех взаимно перпендикулярных катушек одновременно. В этом случае переключение между катушками происходит при угле текущей активной катушки с магнитным полем порядка 45° . Таким образом, величина магнитного дипольного момента катушки должна рассчитываться с запасом в $\sqrt{2}$ раз. В данной работе для упрощения вычислений принят двухкратный запас. При использовании всех катушек с изменяемой мощностью для формирования результирующего магнитного момента такой запас не требуется.

Индукция магнитного поля на орбите с высотой 400 км и наклоном 50° лежит в диапазоне от $B_{\min} = 25$ мкТл до 45 мкТл. Для оценочного расчета взято минимальное значение, поскольку оно дает наименьший момент:

Исходя из вышеизложенного, магнитный дипольный момент катушки вычислялся по формуле

$$m_m = 20M_{ag} / B_{\min} . \tag{3}$$

Его значение составляет $3,9 \text{ мА} \cdot \text{м}^2$.

Предположим, что катушка представляет собой многослойную печатную плату с несколькими печатными витками (например, 40 витков). Для формата PocketCube можно изготовить катушку с квадратными витками с эффективной стороной 40мм. Тогда требуемый ток, протекающий через катушку, составит порядка 60мА.

Заключение. В работе проведен оценочный расчет моментов, создаваемых внешними силами на спутник формата PocketCube-2P. Найден максимальный момент, который придется преодолевать с помощью магнитных катушек, он составил порядка 5 нНм. Проведена оценка момента, который должны быть способны создавать катушки, а также магнитного момента катушек – 4 мАм^2 . Оценен ток, который должна создавать система питания в катушках для получения такого момента – 60 мА. Напряжение для создания такого тока зависит от сопротивления катушки. Технически возможно сделать катушку, в которой напряжение не

превысит 5В. Таким образом, потребляемая мощность не превысит 300мВт. Такое потребление является приемлемым. Отметим, что данное значение является оценкой сверху, в реальности будет применяться широтно-импульсная модуляция питания катушки, которая обеспечит нужный момент в соответствии с алгоритмом управления, например, алгоритмом Bdot [5].

Таким образом, полученные результаты показывают, что ориентация спутников формата PocketCube с помощью плоских магнитных катушек возможна. Это открывает широкие перспективы для реализации различных миссий пико-класса. В дальнейшем планируется проектирование высокоэффективных в массо-габаритном плане плоских катушек, обеспечивающих обозначенные моменты.

Работа проводилась при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (Программа «УМНИК»).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кумарин А.А.** Разработка образовательного пикоспутника MiniSat. Первая международная конференция по космическому образованию "Дорога в космос" (5-8 октября 2021). С. 146-147
2. **Sable M., Gadgil J., Mhatre S.** Development of Modular Space Grade Solar Panels for PocketCube Standard Satellite. SSRN Electronic Journal (May 7, 2021)
3. Battista D., Fabri S., Bugeja M. PocketCube Pico-Satellite Attitude Control: Implementation and Testing. IEEE Journal on Miniaturization for Air and Space Systems. 2020. Vol. 1 №2. P. 90-102.
4. Белоконов И.В., Тимбай И.А. Движение наноспутника относительно центра масс на околоземных орбитах. Изд. Самарского университета, 2020. 126 С.
5. Николаев П.Н., Леонов А.И. Трехосная стабилизация CubeSat 3U, базирующаяся на алгоритме B-dot. Материалы XXIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением». 2021. С. 148-150

A.A. Kumarin, A.N. Sobornitskaya (Samara university, Samara). **Applicability assessment of magnetic attitude control system for PocketCube picosatellites**

A great number of PocketCube missions require attitude control. This paper focuses on applicability assessment of magnetic coils as a means for this task. We have assessed moments of external forces for satellites in low Earth orbits, minimal magnetic moment. We have shown that such moment can be created using flat printed coils with respect to electrical power supply capabilities.

УДК 004.021

К.С. ЛЕЛЬКОВ
(Московский авиационный институт, Москва)

КОМПЛЕКСНАЯ НАВИГАЦИОННАЯ СИСТЕМА НАЗЕМНОГО КОЛЁСНОГО РОБОТА

Предложен состав и алгоритм комплексной навигационной системы наземного колёсного робота на основе сигма-поинт фильтра. Особенностью алгоритма комплексной системы, содержащей одометрическую и спутниковую подсистемы, а также курсовой гироскоп, является учёт ошибок, порождаемых поперечным проскальзыванием колёс робота, что позволяет сохранять точность навигационного решения в случае кратковременного отсутствия сигналов от спутников. Представлены результаты моделирования предложенного алгоритма.

Введение. При построении навигационных систем наземных колёсных роботов (НКР) одной из основных измерительных систем является одометрическая система, позволяющая использовать алгоритмы счисления пути для определения навигационных параметров робота. Однако измерения одометрической системы содержат большое количество погрешностей, поэтому на практике часто используются дополнительные измерительные системы, такие как спутниковая навигационная система (СНС), или системы технического зрения для коррекции навигационного решения. Основными компонентами погрешности одометрических систем являются: дискретность энкодера, деформация окружности колеса, проскальзывание колёс относительно подстилающей поверхности. Дискретность энкодера определяет минимальный поворот колеса, который может измерить датчик. Деформация окружности колеса приводит к появлению систематической ошибки расчёта при использовании алгоритмов счисления пути. Проскальзывание колёс определяется коэффициентом их сцепления с подстилающей поверхностью и может носить случайный характер.

В Московском авиационном институте (МАИ) разрабатывается наземный колёсный робот для автоматизированного технического осмотра наружной поверхности воздушного судна (ВС) на предмет наличия дефектов. Специфика работы такого НКР заключается в том, что он должен осуществлять автономное перемещение вблизи ВС, а в некоторых случаях – под ним. Для реализации навигационного решения НКР разработана комплексная навигационная система (КНС), содержащая одометрическую подсистему, приёмник СНС и курсовой гироскоп. Подобные системы широко известны [1, 2]. В условиях перемещения в непосредственной близости от ВС коррекция одометрической подсистемы по измерениям СНС не всегда возможна из-за кратковременного отсутствия сигналов от СНС. Существенным фактором, влияющим на точность навигационного решения, является проскальзывание колёс НКР относительно подстилающей поверхности. Целью работы является разработка алгоритма навигационной системы, учитывающего проскальзывание колёс и кратковременное отсутствие информации от СНС. Анализ процедуры осмотра наружной поверхности ВС и соответствующих экспериментальных результатов показывает, что для эффективной автоматизации этой процедуры ошибка позиционирования НКР не должна превышать 0.5 м., а ошибка его ориентации – 3 град.

Математическая модель. Будем полагать, что НКР обладает тремя степенями свободы (двумя поступательными и одной вращательной) и осуществляет перемещения, порождаемые вращением его колёс по относительно ровной подстилающей поверхности. Будем полагать также, что при перемещениях НКР возможны поперечные проскальзывания его колёс относительно подстилающей поверхности в точках их соприкосновения с ней. Таким образом, проскальзывания колёс порождают углы $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ отклонения векторов линейных скоростей

каждого из колёс от их продольных осей $O_{b1}X_{b1}, O_{b2}X_{b2}, O_{b3}X_{b3}, O_{b4}X_{b4}$ (рисунок 1). В общем случае возможны также продольные проскальзывания колёс НКР, которые также можно учесть [3], но в данной работе сделано допущение, что они отсутствуют.

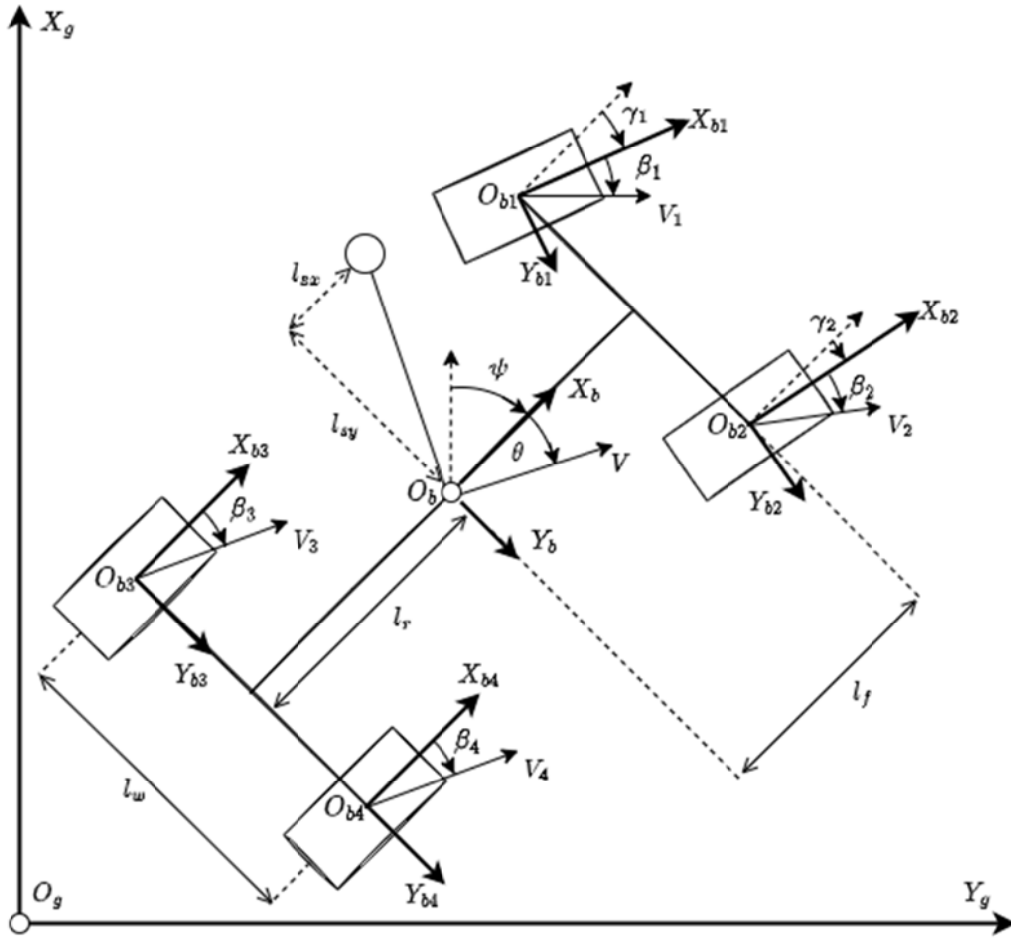


Рис. 1. Кинематические параметры движения НКР

В этом случае математическую модель НКР с учётом результатов работы [4] можно представить в виде упрощённых кинематических соотношений:

$$\begin{aligned}
 V_{xg} &= 0.25[V_1 \cos(\beta_1 + \gamma_1) + V_2 \cos(\beta_2 + \gamma_2) + V_3 \cos \beta_3 + V_4 \cos \beta_4] \cos \psi - \\
 &- \frac{1}{4}[V_1 \sin(\beta_1 + \gamma_1) + V_2 \sin(\beta_2 + \gamma_2) + V_3 \sin \beta_3 + V_4 \sin \beta_4] \sin \psi; \\
 V_{yg} &= 0.25[V_1 \cos(\beta_1 + \gamma_1) + V_2 \cos(\beta_2 + \gamma_2) + V_3 \cos \beta_3 + V_4 \cos \beta_4] \sin \psi + \\
 &+ \frac{1}{4}[V_1 \sin(\beta_1 + \gamma_1) + V_2 \sin(\beta_2 + \gamma_2) + V_3 \sin \beta_3 + V_4 \sin \beta_4] \cos \psi; \\
 \theta &= \tan^{-1} \left(\left(l_f \tan \left(\frac{\beta_3 + \beta_4}{2} \right) + l_r \tan \left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2 + \beta_1 + \beta_2}{2} \right) \right) / (l_f + l_r) \right); \\
 \psi &= \frac{V \cos \theta}{l_f + l_r} \left(\tan \left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2 + \beta_1 + \beta_2}{2} \right) - \tan \left(\frac{\beta_3 + \beta_4}{2} \right) \right); \\
 V &= \sqrt{V_{xg}^2 + V_{yg}^2}; \\
 V_1 &= \omega_1 r_w; V_2 = \omega_2 r_w; V_3 = \omega_3 r_w; V_4 = \omega_4 r_w,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где: V_{xg}, V_{yg} – северная и восточная составляющие линейной скорости перемещения НКР; ψ – угол курса; V_1, V_2, V_3, V_4 – линейные скорости каждого из колёс НКР; γ_1, γ_2 – углы поворота первого и второго колёс; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – углы проскальзывания колёс НКР; V – вектор линейной скорости движения НКР; θ – угол сноса, характеризующий отклонение вектора скорости V от продольной оси $O_b X_b$; l_f, l_r – смещение передней и задней осей колёсных пар от центра масс O_b НКР; $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ – угловые скорости вращения соответствующих колёс НКР; r_w – радиус колёс НКР.

Алгоритм навигации. Задачей КНС является определение навигационных параметров НКР (координат местоположения x_g, y_g и угла курса ψ) в процессе его перемещений. Определение этих параметров будем осуществлять на основе измерений одометрической системы (угловых скоростей $\omega_{1o}, \omega_{2o}, \omega_{3o}, \omega_{4o}$ вращения колёс и угла $\gamma_o = \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}$ поворота передней колёсной пары), приёмника СНС ($x_{gs}, y_{gs}, \dot{x}_{gs}, \dot{y}_{gs}$) и курсового гироскопа ($\dot{\psi}_{avs}$).

Эти измерения поступают на вход фильтра Калмана. В этом фильтре формируются оценки кинематических и навигационных параметров НКР. Оценки навигационных параметров НКР могут быть в дальнейшем использованы системой автоматического управления (САУ) для осуществления автономного перемещения НКР по заданной траектории.

Вектор состояния \mathbf{X} имеет вид:

$$\mathbf{X} = [x_g, y_g, \psi, \gamma_1, \gamma_2, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4]^T \quad (2)$$

Уравнения динамики вектора состояния и вектора измерения \mathbf{Z} (состав которого поясняется ниже) определяются как

$$\mathbf{X}_k = f(\mathbf{X}_{k-1}) + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{Z}_k = h(\mathbf{X}_k) + \mathbf{v}_k, \quad (3)$$

где k – дискретные моменты времени; $f(\cdot), h(\cdot)$ – нелинейные вектор-функции; \mathbf{w}, \mathbf{v} – вектора белых шумов с нулевыми математическими ожиданиями. При этом для первых трёх компонент вектора \mathbf{X}_k уравнения динамики имеют вид $x_{gk} = f_1(\mathbf{X}_{k-1}) = x_{gk-1} + V_{xg}(\mathbf{X}_{k-1})dt$, $y_{gk} = f_2(\mathbf{X}_{k-1}) = y_{gk-1} + V_{yg}(\mathbf{X}_{k-1})dt$, $\psi_k = f_3(\mathbf{X}_{k-1}) = \psi_{k-1} + \dot{\psi}(\mathbf{X}_{k-1})dt$; dt – интервал дискретности; $V_{xg}(\mathbf{X}_{k-1}), V_{yg}(\mathbf{X}_{k-1}), \dot{\psi}(\mathbf{X}_{k-1})$ определяются выражениями (1). Компоненты γ_1, γ_2 – случайные константы, а $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ – винеровские процессы, порождающие шумы которых и составляют вектор \mathbf{w}_k .

При формировании модели измерений будем разделять её на три канала в соответствии с каналами коррекции по измерениям приёмника СНС, курсового гироскопа и одометрической системы. Такой подход часто используется в системах, где частоты измерений, поступающих от разных источников, существенно различаются [6]. Применительно к разрабатываемому НКР частота измерений курсового гироскопа составляет 100 Гц, частота измерений одометрической системы – 20 Гц, а частота измерений приёмника СНС – 1 Гц.

Вектор измерений \mathbf{Z}_{odo} одометрической системы имеет вид:

$$\mathbf{Z}_{odo} = \left[\omega_{1o}, \omega_{2o}, \omega_{3o}, \omega_{4o}, \gamma_o - \gamma_o^2 \frac{l_w}{l_f + l_r}, \gamma_o + \gamma_o^2 \frac{l_w}{l_f + l_r} \right]^T,$$

где l_w – ширина колеи колёсной пары (рисунок 1).

Функцию измерений $h_{odo}(\mathbf{X})$ можно записать следующим образом: $h_{odo9}(\mathbf{X}) = \omega_1$, $h_{odo10}(\mathbf{X}) = \omega_2$, $h_{odo11}(\mathbf{X}) = \omega_3$, $h_{odo12}(\mathbf{X}) = \omega_4$, $h_{odo7}(\mathbf{X}) = \gamma_1$, $h_{odo8}(\mathbf{X}) = \gamma_2$.

Вектор измерений \mathbf{Z}_{avs} курсового гироскопа состоит из одного элемента: $\mathbf{Z}_{avs} = \dot{\psi}_{avs}$. Соответственно функция измерений $h_{avs}(\mathbf{X})$ имеет вид: $h_{avs6}(\mathbf{X}) = \dot{\psi}$.

Вектор измерений \mathbf{Z}_s содержит все измерения приёмника СНС: $\mathbf{Z}_s = [x_{gs}, y_{gs}, \dot{x}_{gs}, \dot{y}_{gs}]^T$. Нелинейная функция измерений $h_s(\mathbf{X})$ при этом такова:

$$\begin{aligned} h_{s1}(\mathbf{X}) &= x_g + l_{sx} \cos \psi - l_{sy} \sin \psi; \\ h_{s2}(\mathbf{X}) &= y_g + l_{sx} \sin \psi + l_{sy} \cos \psi; \\ h_{s3}(\mathbf{X}) &= V_{xg} + \dot{\psi} l_{sx} \cos \psi - \dot{\psi} l_{sy} \sin \psi; \\ h_{s4}(\mathbf{X}) &= V_{yg} + \dot{\psi} l_{sx} \sin \psi + \dot{\psi} l_{sy} \cos \psi, \end{aligned}$$

где l_{sx}, l_{sy} – смещение антенны приёмника СНС вдоль соответствующих осей связанной с НКР системы координат. Здесь $V_{xg}, V_{yg}, \dot{\psi}$ определяются через компоненты вектора состояния \mathbf{X} согласно выражениям (1).

При синтезе фильтра использованы значения параметров соответствующих белых шумов, рекомендуемые в работах [7,8].

При моделировании работы навигационной системы будем полагать, что шкалы времени СНС-приемника, гироскопа и одометрической системы предполагаются синхронизированными. На практике синхронизация обеспечивается с помощью синхроимпульса (1PPS), вырабатываемого приемником СНС.

Ввиду нелинейности уравнений динамики и измерений (3), для оценивания вектора состояния используется сигма-поинт фильтр [5].

Моделирование. Моделирование движения НКР осуществлялось в среде Matlab. Целью моделирования являлась оценка точности определения местоположения НКР и его угла курса по предложенному алгоритму КНС, а также оценка точности определения параметров проскальзывания колёс НКР относительно подстилающей поверхности. Моделирование осуществлялось при следующих параметрах: $r_w = 0.125$ м, $l_r = 0.4$ м, $l_f = 0.4$ м, $l_w = 0.6$ м, $l_{sx} = -0.5$ м, $l_{sy} = 0.1$ м; время моделирования – $t = 15$ минут. СКО кинематических параметров модели: $\sigma(\gamma_1) = \sigma(\gamma_2) = 10^{-3}$ рад; $\sigma(\omega_1) = \sigma(\omega_2) = \sigma(\omega_3) = \sigma(\omega_4) = 0.1$ рад/с; $\sigma(\beta_1) = \sigma(\beta_2) = \sigma(\beta_3) = \sigma(\beta_4) = 2 \cdot 10^{-3}$ рад.

Предварительные экспериментальные исследования измерительных подсистем НКР показали, что в общем случае шумы этих систем не являются белыми. В этой связи ошибки измерений моделировались в виде суммы белозумных и небелозумных составляющих (последние не учитываются в алгоритме навигационной системы) [7]. При этом ошибка δ_{CHC} измерений приёмника СНС формируется в виде суммы белого и цветного шумов, а также константы:

$$\begin{aligned} \delta_{CHC} &= \delta_{CHC}^c + \Delta_{CHC}^c + \delta_{CHC}^{\omega}; \\ \dot{\Delta}_{CHC}^c &= -\mu \Delta_{CHC}^c + \sqrt{2\sigma^2} \mu \varepsilon, \end{aligned}$$

где: δ_{CHC}^c – постоянная величина с СКО равным 1 м. (при моделировании величина δ_{CHC}^c составила 1.2 м. для измерений широты и 2.4 м. для измерений долготы); δ_{CHC}^{ω} – «белый» шум с СКО 2.1 м; Δ_{CHC}^c – «цветной» шум, задаётся в виде случайного процесса с указанным формирующим фильтром; μ – декремент затухания (при моделировании – $0.1c^{-1}$); σ – СКО ошибки СНС (при моделировании – 2.1 м); ε – «белый» шум единичной интенсивности.

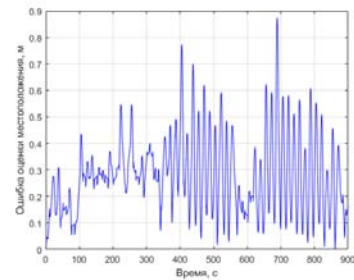


Рис. 2. Радиальная ошибка оценки местоположения

Ошибки измерений угловой скорости вращения колёс НКР энкодерами были представлены в виде белого шума с СКО 0.1 рад/с. Ошибка измерения угла поворота оси передней колёсной пары НКР также была представлена в виде белого шума с СКО 0.01 рад.

Ошибка измерений курсового гироскопа была представлена в виде суммы статического сдвига нуля (-0.2 град/с) и белого шума с СКО 3 град/с.

В процессе моделирования выявлено, что при перерыве в поступлении сигналов от СНС на интервале от 550 до 750 с не происходит существенной потери точности навигационного решения. Анализ результатов моделирования (рисунки 2,3) показывает, что СКО ошибки оценки местоположения НКР составляет 0.16 м, а СКО ошибки оценки угла курса – 1.19 град. В результате моделирования удалось также получить оценку угла сноса НКР, которая явно коррелирует с заданными при моделировании углами проскальзывания колёс. СКО ошибки оценки угла сноса НКР составляет 0.31 град (при начальном СКО 28.65 град.). Результаты моделирования показывают также, что принятая модель фильтра с упрощённой моделью шумов измерений обеспечивает эффективное решение навигационной задачи НКР в соответствии с поставленными требованиями.

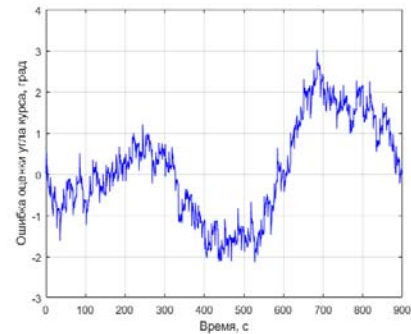


Рис. 3. Ошибка оценки угла курса

Заключение. Предложен алгоритм комплексной навигационной системы для наземного колёсного робота. Особенностью этого алгоритма является учёт ошибок одометрической подсистемы, порождаемых проскальзыванием колёс. Результаты моделирования подтвердили, что предложенный алгоритм позволяет сохранить точность навигационного решения в случае кратковременного отсутствия сигналов от спутниковой навигационной системы, что обуславливает возможность применения этого алгоритма для определения навигационных параметров наземного колёсного робота в непосредственной близости от воздушного судна на его стоянке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hemerly E.M., Schad V.R., Implementation of a GPS/INS/Odometer navigation system, ABCM Symposium Series in Mechatronics - Vol. 3, 2022, pp 519-524
2. Ибраев А.С., Система навигации транспортного средства на основе интегрированной ИНС/СНС/ОДОМЕТРИИ, Технические науки – от теории к практике №5(65), 2017.
3. Aleshin B.S., Kuris E.D., Miheev V.V., Chernomorsky A.I., Lelkov K.S., Integrated Navigation System of a Single-Axle Wheeled Robot With Two Degrees of Freedom Rotating Platform, Journal of Physics: Conference Series. 1694 (1), 2019, DOI 10.1088/1742-6596/1694/1/012019.
4. R. Rajamani (2012), Vehicle Dynamics and Control, Mechanical Engineering Series, DOI 10.1007/978-1-4614-1433-9.
5. Wan, Eric & Merwe, Ronell. (2000). The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation. The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation. 153-158. 153 - 158. 10.1109/ASSPCC.2000.882463.
6. Fatehi, Alireza & Huang, Biao. (2017). Kalman filtering approach to multi-rate information fusion in the presence of irregular sampling rate and variable measurement delay. Journal of Process Control. 53. 15-25. 10.1016/j.jprocont.2017.02.010.
7. Алёшин, Б. С. Ориентация и навигация подвижных объектов : современные информационные технологии / Под ред. Б. С. Алёшина, К. К. Веремеенко, А. И. Черноморского. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. - 424 с. - ISBN 5-9221-0735-6.
8. Plekhanov V.E., Tikhonov V.A., Veremeenko K.K. Integrated Inertial and Satellite Navigation System Based on Micromechanical Module, Proceedings of the 5th Saint-Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, 1998. P. 95-101.

K.S. Lelkov, (Moscow Aviation Institute, Moscow). **Complex navigation system for ground wheeled robot**

Complex navigation system algorithm for ground wheeled robot is proposed based on Unscented Kalman Filter. The main feature of this algorithm is the accounting for odometry system errors generated by the lateral slippage of the robot's wheels that allows to preserve the accuracy of navigation solution during short-term satellite system's signals absence. The simulation results of the proposed complex navigation system are presented.

УДК 656.052.16

М.А. КОРШУНОВ

(Филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого, г. Серпухов)

НАЧАЛЬНАЯ НАСТРОЙКА СИСТЕМЫ НАЗЕМНОЙ НАВИГАЦИИ ПО ЦИФРОВОЙ КАРТЕ ДОРОГ С ПРИМЕНЕНИЕМ АЛГОРИТМА ДИНАМИЧЕСКОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ ВРЕМЕННОЙ ШКАЛЫ

Рассматривается задача начальной настройки автономной системы наземной навигации по цифровой карте дорог. Начальная настройка осуществляется на основе сопоставления приборной траектории, измеренной на борту объекта, и совокупности возможных траекторий, записанных в цифровую карту дорог. Для решения поставленной задачи используется процедура, заимствованная из алгоритма динамической трансформации временной шкалы. Представлены результаты моделирования начальной настройки системы наземной навигации.

Введение. Для многих наземных объектов важно обеспечить автономность решения задачи навигации. При этом допустимо использование только информации, доступной на борту объекта. Как правило, такие системы наземной навигации (СНН) строятся по принципу счисления пути [1], согласно которому необходима начальная настройка СНН, включающая определение начальных координат и параметров ориентации наземного объекта с заданной точностью. Аналогичные операции выполняются и в процессе нормального функционирования СНН для обеспечения требуемой точности, а также в случае сбоя. В настоящее время операции по начальной настройке автономных СНН проводят на заблаговременно подготовленных контрольных точках, которые выбираются на предполагаемых маршрутах движения наземного объекта – автомобильных дорогах.

Такой подход к начальной настройке СНН существенно ухудшает мобильность объекта вследствие ограничений на его удалённость от контрольных точек и требует заблаговременной и трудоёмкой подготовки возможных маршрутов наземного объекта. Также определение начальной ориентации СНН сопряжено с дополнительными затратами времени на получение объёма измерительных данных, обеспечивающего высокую точность угловых параметров. Кроме этого, финальная точность параметров СНН во время последующего движения объекта обеспечивается и высокой квалификацией оператора, поскольку его ошибка не может быть обнаружена в системе счисления до установки объекта на последующей контрольной точке. Всё это приводит к необходимости поиска путей решения задачи начальной настройки автономных СНН.

Один из путей решения указанной задачи может быть основан на использовании информации цифровой карты дорог (ЦКД) [2,3]. Записанные в ЦКД участки небольшой протяжённости (несколько километров) часто обладают уникальной геометрической формой. Причём, чем больше протяжённость участка, тем «более уникальна» его геометрическая форма, т. е. меньше вероятность найти похожую комбинацию участков из записанных в ЦКД. Это в принципе позволяет идентифицировать участок, по которому двигался объект, из их совокупности, представленной в ЦКД. Решение этой задачи равноценно начальной настройке СНН и обеспечивает получение финальных навигационных параметров (текущих координат и ориентации объекта).

Ближайшими аналогами задачи начальной настройки СНН по данным ЦКД могут считаться задачи корреляционно-экстремальной навигации [4, 5], решаемые с помощью поисковых алгоритмов. Однако использование известных поисковых алгоритмов здесь практически невозможно ввиду очень большого количества элементов ЦКД – прямолинейных отрезков, что не позволяет получать результат за разумное время. В связи с этим необходим поиск новых, менее затратных с вычислительной точки зрения, решений задачи идентификации элементов ЦКД по информации от СНН. В докладе рассматривается вариант такого решения с направленным перебором отрезков ЦКД, использующий процедура, подобная той, что применяется в алгоритме динамической трансформации временной шкалы (ДТВШ) [6, 7]. Предложены признаки для сопоставления, мера близости при-

борной траектории СНН и отрезков ЦКД. Приводятся результаты имитационного моделирования начальной настройки СНН по данным ЦКД.

Постановка задачи. Пусть ЦКД задана в векторном формате [8] на координатной плоскости множеством N прямолинейных отрезков, соответствующих реальному положению осевых линий автомобильных дорог. Каждый i -й отрезок, $i=1\dots N$, задаётся уникальным номером K_i , координатами начальной (X_i^H, Y_i^H) и конечной (X_i^K, Y_i^K) точек в плоской прямоугольной системе координат. Взаимно независимые погрешности координат всех точек характеризуются дисперсией D_k .

Наземный объект движется по маршруту, представленному в ЦКД прямолинейными отрезками. На непродолжительном (до m -го такта) начальном этапе движения СНН вырабатывает координаты (X_j^P, Y_j^P) и дирекционный угол (ДУ) $\alpha_j^P, j=1\dots m$, составляющие приборную траекторию. Они получены при $X_1^P=0, Y_1^P=0$ и $\alpha_1^P=0$. Дисперсии погрешностей координат D_p (большое число) и дирекционного угла D_α характеризуют область неопределённости начальных координат объекта и его ориентации.

Задача состоит в том, чтобы обосновать выбор и математически описать признаки для сопоставления указанных выше данных СНН и ЦКД, с их использованием определить меру близости приборной траектории СНН и отрезков ЦКД и, окончательно, идентифицировать номера K_n^* отрезков ЦКД, соответствующих приборному маршруту, путём минимизации меры близости.

Основные этапы алгоритма начальной настройки СНН по данным ЦКД. При выборе признаков для сопоставления приборной траектории и ЦКД необходимо учитывать то, что ориентация и положение объекта в начальной точке неизвестны (или известны весьма неточно). Следовательно, эти параметры не фигурируют в математическом описании формируемых признаков. В ходе исследований были проанализированы многие возможные варианты искомым признаков. Их рациональный выбор включает длины отрезков и приращения углов ориентации между отрезками с общей точкой, которые инвариантны к повороту и смещению. Анализ различных вариантов математического описания признаков и их последующего использования показал, что хорошие результаты решения задачи получаются для комбинации:

$$\bar{z} = [X, Y, \Delta\alpha, S_1, S_2] \quad (1)$$

где: X, Y – координаты i -й точки ЦКД или j -й приборной траектории СНН соответственно; $\Delta\alpha$ – приращение ДУ между отрезками; S_1 и S_2 – длины отрезков, для которых указанная точка является общей. При этом используются только «поворотные» точки навигационной системы, определяемые по заданному диапазону изменения угла ориентации.

Математическое описание меры близости данных СНН и ЦКД зависит от метода, который используется для последующего решения оптимизационной задачи выбора отрезков. Анализ известных методов показал возможность нахождения быстрого решения задачи с использованием процедуры, лежащей в основе алгоритма ДТВШ [5-7]. Он позволяет находить соответствие между последовательностями точек СНН и ЦКД путём минимизации неотрицательных функций, характеризующих близость этих точек. Однако «стандартные» меры близости (среднеквадратичная, манхэттенская и др.), которые обычно применяются в ДТВШ, не могут быть непосредственно использованы в решаемой задаче, поскольку параметры признаков близости имеют разный физический смысл согласно (1). Учитывая это близость двух точек i -й ЦКД и j -й СНН определим как функцию:

$$C_{ij} = 1 - f(\bar{z}_{ki} | \bar{z}_{pj}); \quad (2)$$

$$f(\bar{z}_{ki} | \bar{z}_{pj}) = \exp\left[-0,5(\bar{z}_{ki} - \bar{z}_{pj})(P_k + P_p)^{-1}(\bar{z}_{ki} - \bar{z}_{pj})^T\right], \quad (3)$$

где: $f(\bar{z}_{ki} | \bar{z}_{pj})$ – функция правдоподобия; $\bar{z}_{ki}, \bar{z}_{pj}$ – рассчитываемые по (1) векторы для i -й точки ЦКД и j -й точки приборной траектории соответственно; P_k, P_p – соответствующие ковариаци-

онные матрицы, дисперсии на главных диагоналях которых задаются для каждой конкретной ЦКД и навигационной системы в зависимости от их параметров и характеристик.

Такое представление меры близости является неотрицательным, соответствует требованию алгоритма ДТВШ по минимизации функции и учитывает разнообразие признаков близости. Таким образом, при $\bar{z}_{ki} = \bar{z}_{pj}$ получим $C_{ij} = 0$ (правдоподобие максимально), а при $\bar{z}_{ki} - \bar{z}_{pj} = \infty$ — $C_{ij} = 1$ (правдоподобие минимально). Искомая мера близости C определяется как сумма значений C_{ij} по j -м точкам траектории СНН.

Окончательно, алгоритм ДТВШ позволяет найти совокупность отрезков ЦКД K_n^* по координатам ЦКД и навигационным параметрам СНН, выработанным при нулевых начальных координатах и ДУ, а также их характеристикам погрешностей. Найденная совокупность отрезков ЦКД соответствует приборному маршруту объекта. На основании этого координаты конечной точки последнего отрезка являются текущими координатами местоположения объекта в системе координат ЦКД. Начальный ДУ вычисляется на основе решения обратной геодезической задачи по координатам концов выбранных отрезков и используется для «разворота» выработанной СНН приборной траектории объекта в системе координат ЦКД.

Упрощённый пример имитации процедуры начальной настройки СНН по ЦКД приведён на рис.1, где показан фрагмент приборной траектории и три (для простоты) возможных маршрута ЦКД, каждому из которых соответствует своя мера близости C . На рис. 1-в показан приборный маршрут с минимальным значением C , что позволяет выбрать его для нахождения начальных (и впоследствии текущих) координат и ДУ объекта. Утолщённой линией на рис.1-в показано, что координаты конечной точки последнего отрезка выбранного маршрута ЦКД являются текущими координатами местоположения объекта.

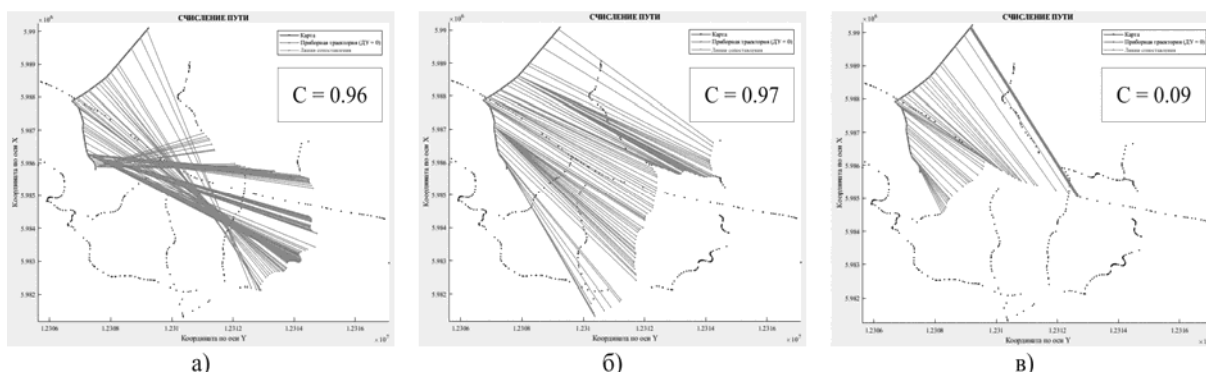


Рис. 1. Результаты имитации начальной настройки СНН, включая сопоставление приборной траектории с тремя наборами отрезков ЦКД (а...в), сформированными алгоритмом ДТВШ

Заключение. Решена задача нахождения начальных координат и ориентации автономной СНН путём сопоставления данных ЦКД и текущей навигационной информации, получаемой на коротком начальном участке маршрута движения наземного объекта. В основу решения положен алгоритм динамической трансформации временной шкалы. В соответствии с его исходными данными и ограничениями, а также особенностями доступной информации СНН и ЦКД, предложены признаки для сопоставления приборной траектории и ЦКД и определена соответствующая мера близости. Приведён числовой пример решения задачи начальной настройки автономной СНН по данным ЦКД. Дальнейшим направлением работы является исследование зависимости качества результатов решаемой задачи от протяжённости начального участка маршрута наземного объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузовков Н.Т., Салычев О.С. Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация. - М.: Машиностроение, 1982. - 216 с.
2. Беркович С.Б. Коррекция автономных наземных навигационных систем в движении по отдельным точкам ЦКД / С.Б. Беркович [и др.] // 13-я С.- Петербургская межд. конф. по интегрированным навиг. системам. СПб: ГНЦ РФ-ЦНИИ «Электроприбор» 2006. С. 154-156.

3. **Садеков Р.Н.** Применение цифровых карт дорог для автономной коррекции систем наземной навигации // Тр. ФГУП «НПЦ АП» М., 2008. № 2. С. 87-95.
4. **Белоглазов И.Н.** Основы навигации по геофизическим полям / Белоглазов И.Н., Джанджгава Т.И., Чигин Г.П. - М.: Наука, 1985. - 428с.
5. **Шолохов А.В.** Определение текущего местоположения объекта по цифровым картам дорог без начальной настройки навигационной системы счисления пути // Материалы III конференции молодых учёных «Навигация и управление движением» - Спб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2001. - с. 157-164.
6. **Vintsyuk T.K.** Speech discrimination by dynamic programming. Kibernetika, 4(2), 81-88, January-February, 1968.
7. **Rabiner L., Juang B.H.** Fundamentals of Speech Recognition. Prentice Hall PTR, 1993.
8. ГИС «Панорама»: [Электронный ресурс] // КБ «Панорама». URL: https://gisinfo.ru/products/products_panorama.htm. (Дата обращения: 30.01.2022).

Korshunov M.A. (The Military Academy of Strategic Rocket Forces after Peter the Great, branch Serpukhov) **Initial alignment of the terrain navigation system aided by the digital road map using the dynamic time warping algorithm**

Abstract. The problem of initial alignment of the dead-reckoning terrain navigation system aided by the digital road map is considered. The solution of the problem is based on the matching of digital road map data and dead-reckoning navigation parameters. They are produced by the navigation system during a short time of movement of the terrain object from the starting point. To solve this problem, the algorithm of dynamic time warping is used. Simulation results for the initial alignment of the terrain navigation system aided by digital road map are presented.

СЕКЦИЯ 7. ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 531.383-1:537.2

Е.Д. ИВАНОВА*

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

ВЛИЯНИЕ НЕОРТОГОНАЛЬНОСТИ СИЛОВЫХ ОСЕЙ НА ДВИЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Представлены уравнения движения ротора бескарданного электростатического гироскопа в полярной ориентации с учетом неортогональности силовых осей подвеса ротора. Исследовано влияние неортогональности силовых осей на параметры движения гироскопа. Проведены численные оценки дрейфа.

Введение. При теоретическом исследовании движения ротора бескарданного электростатического гироскопа (БЭСГ) в работах [1,2] в качестве базовой принята детерминированная модель ухода ЭСГ [2,3,4], которая представляется в виде аналитических функций, связывающих геометрические параметры несферичного и несбалансированного ротора с параметрами физических полей – источников уводящих моментов. Однако такая модель не учитывает неортогональность силовых осей, которая может приводить к влиянию напряжения с одной оси подвеса на другую и, соответственно, к возникновению дополнительных дрейфов.

Целью работы является исследование влияния неортогональности силовых осей подвеса ротора на параметры движения гироскопа и проведение численных оценок дрейфа.

Теоретический анализ движения ротора. Введем следующие системы координат (СК): $x_k y_k z_k$ – корпусная система координат, оси которой ориентированы следующим образом: x_k – на Восток, z_k – по оси Мира, y_k – ортогональна осям x_k и z_k ; $x_3 y_3 z_3$ – система координат, связанная с векторами напряженности электрического поля электродов подвеса (силовые оси); $x_m y_m z_m$ – неподвижная относительно Земли экваториальная система координат, связанная с меридианом места: ось x_m направлена на Восток, ось z_m – по оси Мира.

Неортогональность силовых осей может быть связана с перекосами при сборке системы электродов, с несимметрией площадей электродов и неравномерностью рабочих зазоров между электродами и ротором.

В ряде задач для повышения точности применяется автокомпенсационное вращение корпуса (одноосное, двухосное) [5,6].

В случае одноосного автокомпенсационного вращения с учетом принятой модели дрейфа [2, 3, 4] и неортогональности силовых осей x_3 и y_3 с углом рассогласования δ уравнения движения ротора гироскопа в корпусных осях примут вид:

$$\dot{\gamma}_1 - (\omega_p + \omega_{ep})\gamma_2 = -k_1 V \cos \phi \cos \omega_{ep} t, \quad \gamma_1(0), \quad (1)$$

$$\dot{\gamma}_2 + (\omega_p + \omega_{ep})\gamma_1 = k_1 V \cos \phi (\sin \omega_{ep} t + \delta \cos \omega_{ep} t), \quad \gamma_2(0), \quad (2)$$

где: γ_i – направляющие косинусы оси вращения ротора в корпусной системе координат ($i=1,2$); ω_p – угловая скорость прецессионного движения ротора; ω_{ep} – угловая скорость автокомпенсационного вращения корпуса; $k_1 V$ – постоянная величина, характеризующая вес ротора (k_1 – коэффициент, связанный с осевым дисбалансом ротора, V – отношение модуля напряжения на электродах подвеса к опорному напряжению); ϕ – широта места.

* Научный руководитель к.т.н., ведущий научный сотрудник Романенко Светлана Георгиевна.

Решение уравнений движения (1) и (2) в осях экваториальной СК $x_m y_m z_m$ при неподвижном относительно объекта корпусе гироскопа ($\omega_{ep} = 0$) и $\gamma_i(0) = 0$:

$$\gamma_{m1}(t) = \frac{(k_1 V \cos \varphi) \cdot \delta}{\omega_p} (1 - \cos \omega_p t) - \frac{k_1 V \cos \varphi}{\omega_p} \sin \omega_p t, \quad (3)$$

$$\gamma_{m2}(t) = \frac{k_1 V \cos \varphi}{\omega_p} (1 - \cos \omega_p t) + \frac{(k_1 V \cos \varphi) \cdot \delta}{\omega_p} \sin \omega_p t. \quad (4)$$

С учётом одноосного автокомпенсационного вращения при $\gamma_i(0) = 0$ решение уравнений (1) и (2) примет вид:

$$\gamma_{m1}(t) = \frac{1}{2} \frac{(k_1 V \cos \varphi) \cdot \delta}{\omega_p} (1 - \cos \omega_p t) - \frac{k_1 V \cos \varphi}{\omega_p} \sin \omega_p t - \frac{1}{2} \frac{(k_1 V \cos \varphi) \cdot \delta}{\omega_p + 2\omega_{ep}} (1 - \cos 2\omega_{ep} t), \quad (5)$$

$$\gamma_{m2}(t) = \frac{1}{2} \frac{(k_1 V \cos \varphi) \cdot \delta}{\omega_p} \sin \omega_p t + \frac{k_1 V \cos \varphi}{\omega_p} (1 - \cos \omega_p t) + \frac{1}{2} \frac{(k_1 V \cos \varphi) \cdot \delta}{\omega_p + 2\omega_{ep}} \sin 2\omega_{ep} t. \quad (6)$$

Из уравнений (3)-(6) видно, что основное влияние неортогональность силовых осей оказывает на координаты центра годографа, вызывая их смещение в плоскости, ортогональной плоскости меридиана.

При ортогональных силовых осях ($\delta=0$) координаты центра годографа имеют следующий вид:

$$\gamma_{m1}^0 = 0, \gamma_{m2}^0 = \frac{k_1 V \cos \varphi}{\omega_p}, \quad (7)$$

т.е. вектор кинетического момента устанавливается в плоскости меридиана.

Численные оценки. Рассмотрим подробнее влияние неортогональности силовых осей на координаты центра годографа:

- при наличии автокомпенсационного вращения:

$$\gamma_{m1}^0 = \frac{1}{2} \frac{(k_1 V \cos \varphi) \cdot \delta}{\omega_p}, \gamma_{m2}^0 = \frac{k_1 V \cos \varphi}{\omega_p}, \quad (8)$$

- при отсутствии автокомпенсационного вращения:

$$\gamma_{m1}^0 = \frac{(k_1 V \cos \varphi) \cdot \delta}{\omega_p}, \gamma_{m2}^0 = \frac{k_1 V \cos \varphi}{\omega_p}. \quad (9)$$

Как видно из формул (8) и (9), неортогональность силовых осей вызывает смещение по координате γ_{m1}^0 независимо от наличия автокомпенсационного вращения.

Приведем численные оценки. Так, при $\delta = 1^\circ$, $k_1 V = 0,5^\circ/\text{ч}$, периоде прецессионного движения $T_p = 24$ ч смещение при наличии автокомпенсационного вращения составит 0,5 угл. мин, что соответствует реальным данным. Величина дрейфа при этом составляет 0,002 $^\circ/\text{ч}$.

Заключение. В ходе выполнения работы проведен анализ движения ротора БЭСГ в полярной ориентации с автокомпенсацией и без нее с учетом неортогональности силовых осей, что позволило уточнить принятую модель дрейфа. В результате анализа получены формулы, связывающие смещение координаты центра годографа от плоскости меридиана с углом неортогональности осей подвеса, а также определены численные оценки величины смещения.

Возможные направления дальнейших исследований связаны с учетом несимметрии площадей электродов или с учетом погрешностей сборки подвеса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Емельянец Г.И., Ландау Б.Е., Левин С.Л., Романенко С.Г., Медведков А.А.** Об эффективности модуляционного вращения корпуса бескарданного электростатического гироскопа в полярной ориентации // Гироскопия и навигация, №3(90), 2015 г.
2. **Буравлёв А.П., Ландау Б.Е., Левин С.Л.** О модели дрейфа ЭСГ для БИНС // Судостроительная промышленность, №30, 1992 г.
3. **Буравлёв А.П., Ландау Б.Е., Левин С.Л., Романенко С.Г.** Модель дрейфа бескарданного электростатического гироскопа и идентификация ее параметров // Актуальные проблемы авиационных и аэрокосмических систем: процессы, модели, эксперимент-№1(13), 2002 г.
4. **Ландау Б.Е.** Электростатический гироскоп со сплошным ротором. – СПб: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020 г. – 150 с.
5. **Гусинский В.З., Лесючевский В.М., Падерина Т.В.** Автокомпенсация уходов ЭСГ в корабельных бескарданных инерциальных навигационных системах//Гироскопия и навигация, №1(13), 1993 г.
6. **Емельянец Г.И., Блажнов Б.А., Степанов А.П.** Об оценивании параметров модели погрешностей вращающегося измерительного модуля на ВОГ бесплатформенной ИНС в условиях объекта // Гироскопия и навигация, №4(115), 2021 г.

УДК 531.768

М. А. СОРВИНА

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕНТРИЧЕСКОЙ ТОПОЛОГИИ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ НА ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛНАХ

Приводятся основные требования к современным инерциальным датчикам для измерения ускорения. Рассмотрены преимущества и недостатки существующих микромеханических акселерометров. Предложена новая концепция концентрической топологии чувствительных элементов датчиков на поверхностных акустических волнах. Описан способ моделирования таких устройств.

Введение. Микромеханические акселерометры (ММА) – это инерциальные датчики, которые используются для измерения ускорения объекта. По сравнению с традиционными датчиками ММА имеют множество преимуществ, таких как небольшой размер, малый вес, низкая стоимость, относительно высокая точность и простота интеграции. Перечисленные достоинства привели к широкому их применению во многих областях, в том числе в различных динамичных объектах, в потребительских электронных устройствах, в робототехнике, военной сфере, медицине и т. д. [1].

Особая роль, с точки зрения измерительной способности, характеристик датчика, возможности его применения в тех или иных сферах, принадлежит технологии производства чувствительного элемента и непосредственно конструкции прибора. В настоящее время лидером среди датчиков тактического класса точности является акселерометр, изготовленный по технологии микроэлектромеханических систем [1]. Однако во многих устройствах, например, в промышленных роботах, навигационная система должна быть не только компактной, но и устойчивой к ударам и вибрации. Обычные микроэлектромеханические акселерометры не могут удовлетворить выдвигаемым современным требованиям на разработку систем инерциальной навигации [2], включающим в себя ударопрочность до 50000 g и среднее значение виброустойчивости до 50 g, в связи с наличием в их конструкции подвижных частей – упругих подвесов. Обеспечить устойчивость к таким воздействиям при высокой чувствительности прибора можно с помощью акселерометров на поверхностных акустических волнах (ПАВ). Такие волны распространяются по поверхности твердых тел, и в случае пьезоэлектрических материалов, электрические поля в которых реагируют на механические воздействия, их можно зафиксировать [3].

Настоящая работа посвящена рассмотрению новой конструкции чувствительных элементов ММА на ПАВ – с концентрической топологией, а также способу моделирования таких устройств.

Новая концепция конструкции чувствительных элементов ММА на ПАВ. Твердотельные электронные устройства на ПАВ обычно представляют собой подложку из пьезоэлектрического материала, на одной или нескольких плоских поверхностях которой формируется периодическая встречно-штыревая структура проводящих электродов, предназначенная как для электрического возбуждения ПАВ, так и для их приема (обратного преобразования в электрический сигнал). При деформациях изгиба происходит изменение фазовой скорости ПАВ и шага периодической структуры [4] (рис. 1).

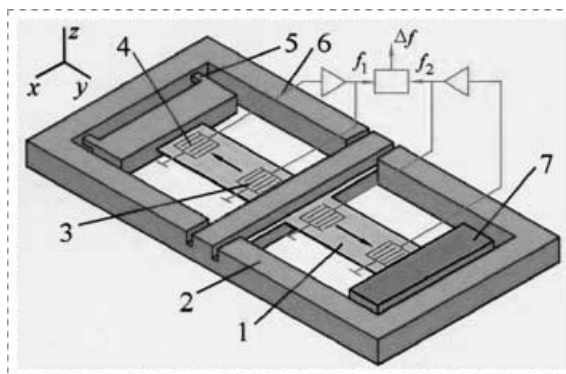


Рис. 1. Обобщенная схема микроакселерометра с частотным выходом: 1 – консольные балки, 2 – рамочный корпус, 3 – входные ВШП, 4 – выходные ВШП, 5 – перемычки, 6 – токопроводы, 7 – инерционные грузы.

Научный руководитель к.т.н., доцент Кукаев Александр Сергеевич.

Принцип действия акселерометров на ПАВ заключается в том, что выходной частотный сигнал вырабатывается в результате деформации подложки, на поверхности которой сформирован один или несколько ПАВ-преобразователей.

В последнее время много внимания уделяется кольцевым топологиям встречно-штыревых преобразователей (ВШП) [5-6]. Общий вид чувствительного элемента мембраны представляет консоль, прикрепленную к корпусу с помощью силиконового клея. Резонатор состоит из двух кольцевых ВШП и пьезоэлектрического кристалла, расположенного между преобразователями [6].

Предлагаемая модель чувствительного элемента микроакселерометра с концентрической формой ВШП показана на рис. 2. Здесь на пьезоэлектрическую подложку 1 из $128^\circ \text{YX LiNbO}_3$ нанесены два ВШП: возбуждающий 2 и приёмный 4, выполненные в виде эллипсов. Форма электродов является эллиптической, так как скорость распространения волны в анизотропном материале зависит от направления. Процесс преобразования физической величины в частоту выходного сигнала датчика на поверхностных акустических волнах можно представить в виде последовательности преобразований: измеряемая механическая величина преобразуется в деформацию пьезоэлектрической подложки, что, соответственно, вызывает изменение фазочастотной характеристики микроакселерометра и приводит к изменению частоты колебаний автогенератора, содержащего в цепи образной связи линии задержки 3.

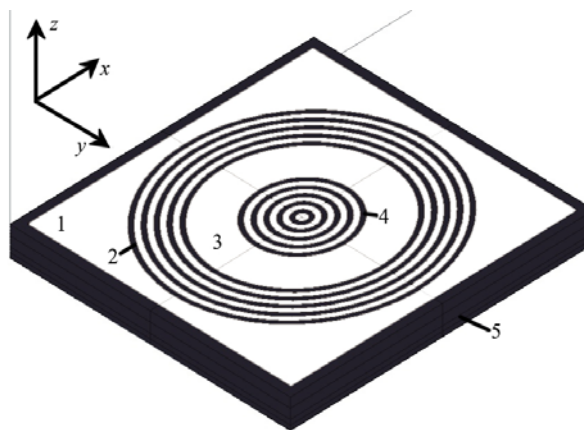


Рис. 2. Модель датчика на ПАВ с концентрической формой топологии электродов.

По сравнению с существующими классическими концепциями размещения ВШП выдвигается гипотеза, что концентрическая форма топологии чувствительного элемента будет обладать более высокими показателями добротности, а следовательно, и лучшей энергоэффективностью и, возможно, чувствительностью.

Моделирование чувствительного элемента. Для проверки выдвигаемой гипотезы планируется провести моделирование в среде OOFELIE::Multiphysics. Для этого в модели заданы следующие граничные условия: к четным электродам ВШП 2 приложено переменное напряжение амплитудой 1 В, а нечетные заземлены. Также в модель добавлен идеально согласованный слой 5 (PML, Perfectly Matched Layer). PML-слой задает квазибесконечное пространство, которое позволяет волне свободно распространяться за формальные границы модели, не испытывая отражений. Такое представление связано с тем, что в реальном приборе преобразователи находятся на значительном (по отношению к длине волны) расстоянии от границ звукопровода и, следовательно, значительно затухает до того, как их достигнуть [7].

В работе [8] утверждается, что с уменьшением собственной частоты ПАВ происходит рост масштабного коэффициента. В настоящий момент диапазон частот для электронных компонентов устройств на ПАВ составляет от 5 МГц до 6 ГГц. Исходя из этого, а также учитывая ограничение на расчётные мощности, значение расчётной частоты было выбрано равным 5 МГц.

Заключение. Рассмотрены достоинства и недостатки современных ММА. Представлена концентрическая топология микроакселерометра на ПАВ, которая способна выдерживать высокие ударные нагрузки. Описана реализация модели чувствительного элемента в программной среде OOFELIE::Multiphysics. Направление дальнейших исследований: планируется оптимизировать конструкцию концентрического датчика на ПАВ, для этого будет изучено влияние на амплитудно-частотную характеристику сенсора расстояния между возбуждающим и приёмным ВШП и формы подложки чувствительного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. **G. Girardin.** Sensors for Cellphones and Tablets 2016 // YOLE Developpement Market & Technology Report, 2016. P. 1 - 4.
2. Precise Robust Inertial Guidance for Munitions (PRIGM): Advanced Inertial Micro Sensors (AIMS), Microsystems Technology Office, DARPA-ВАА-15-38, May 29, 2015
3. **Шевченко С.Ю.** Разработка микроакселерометра на поверхностных акустических волнах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2007. 132 С.
4. **Лукьянов Д.П., Лучинин В.В., Скворцов В.Ю.** Микроакселерометр на поверхностных акустических волнах. М.: Микросистемная техника, 2001. С. 2.
5. **Шевченко С.Ю., Михайленко Д.А., Лукьянов Д.П.** Выбор материала чувствительных элементов акселерометров на основе ПАВ. Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 6. С. 70-83.
6. **Шевченко С.Ю., Михайленко Д.А., Ньямверу Б.** Оптимизация конструкции встречно-штыревого преобразователя кольцевого резонатора на поверхностных акустических волнах. Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2021. Т. 24, № 6. С. 51-62.
7. **Кукаев А.С.** Мультифизическое моделирование чувствительных элементов микрогироскопов на поверхностных акустических волнах. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2016. 130 С.
8. **Laο В.У.** Gyroscopic Effect in Surface Acoustic Waves. Proceeding of IEEE ultrasonic symposium, In, 1980. P 687.

M.A.Sorvina (Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg). **Investigation of concentric topology for application in sensitive elements of inertial sensors on surface acoustic waves**

The basic requirements for modern inertial sensors for measuring acceleration are given. The advantages and disadvantages of existing micromechanical accelerometers (MMA) are considered. A new concept of concentric topology of sensitive elements of sensors based on surface acoustic waves (SAW) is proposed. A simulation method is described.

УДК 681.883; 524.232

Н. А. БЫСТРОВА

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УПРУГИХ СМЕЩЕНИЙ И МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОГО ПЛАСТИНЧАТОГО ПЬЕЗОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Рассмотрена задача о распределении упругих смещений и механических напряжений вдоль пластинчатого преобразователя, состоящего из двух пьезопластин с различным амплитудно-фазовым возбуждением, разделенных промежуточным слоем. Проведен анализ влияния на характер распределения упругих смещений и механических напряжений геометрии элементов пластинчатого преобразователя.

Введение. Вопросам формирования коротких акустических импульсов с помощью ультразвуковых преобразователей посвящено много работ как зарубежных, так и отечественных авторов [1,2]. Однако в них мало внимания уделяется прочностным характеристикам преобразователей, используемым в дефектоскопии [3], которые в отличие от гидроакустических преобразователей не являются армированными. В работах [4, 5] рассматривалась возможность формирования широкополосных амплитудно-частотных характеристик (до 2–4 октав) с помощью пластинчатых преобразователей с амплитудно-фазовым возбуждением (ППАФВ) двух пьезопластин, а также – коротких, перестраиваемых по частоте, акустических импульсов. В работе [6] для таких ППАФВ анализировался характер распределения механических напряжений и упругих смещений в гармоническом режиме. Предлагаемая работа посвящена исследованию характера распределения указанных величин для разных вариантов построения ППАФВ и их возбуждения в импульсном режиме.

Постановка задачи и формулы для расчета. Расчетная модель ППАФВ (рис. 1) содержит две пьезокерамические пластины 1 и 2, между которыми находится промежуточный слой 3.

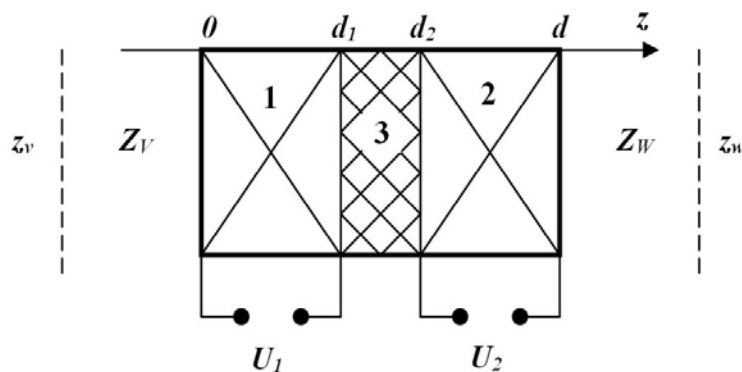


Рис. 1. Расчетная модель ППАФВ

Каждая пластина возбуждается независимым электрическим напряжением $U_i(\omega) = U_{im}(\omega)e^{j\varphi_i(\omega)}$, где i – номер пластины ($i = 1, 2$); $U_{im}(\omega)$ и $\varphi_i(\omega)$ – амплитуды и фазы; ω – круговая частота. Внешние торцы пьезопластин нагружены на слои с входными импедансами Z_V и Z_W , которые, в свою очередь, контактируют с полубезграничными средами с удельными импедансами z_v и z_w .

Решение граничной задачи в одномерном приближении позволяет получить структурные выражения для упругих смещений $\xi^{(1),(2),(3)}(z)$ и механических напряжений $\sigma_{zz}^{(1),(2),(3)}(z)$, определяющие их распределение вдоль пьезопластин ППАФВ, в следующем виде:

Научный руководитель к.т.н., доцент Степанов Б.Г.

$$\begin{aligned}\xi^{(1)}(z) &= A_1 \cos kz + B_1 \sin kz; \\ \xi^{(2)}(z) &= A_2 \cos kz + B_2 \sin kz; \\ \xi^{(3)}(z) &= A_3 \cos k_c z + B_3 \sin k_c z,\end{aligned}\tag{1}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{zz}^{(1)}(z) &= N \left\{ B_1 \left[\cos z\psi - \frac{\beta}{p_1\psi} \sin p_1\psi \right] - A_1 \left[\sin z\psi + \frac{\beta}{p_1\psi} (\cos p_1\psi - 1) \right] - \frac{U_1}{p_1} \right\}; \\ \sigma_{zz}^{(2)}(z) &= N \left\{ B_2 \left[\cos z\psi - \frac{\beta}{(1-p_2)\psi} (\sin \psi - \sin p_2\psi) \right] - A_2 \left[\sin z\psi + \frac{\beta}{(1-p_2)\psi} (\cos \psi - \cos p_2\psi) \right] - \frac{U_2}{1-p_2} \right\}; \\ \sigma_{zz}^{(3)}(z) &= N \frac{z_c}{z_k} [B_3 \cos \alpha_c z\psi - A_3 \sin \alpha_c z\psi],\end{aligned}\tag{2}$$

где: $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ – амплитудные коэффициенты, зависящие от структуры ППАФВ, параметров его элементов и возбуждающих электрических напряжений U_1 и U_2 ; $N = \omega z_k$; $\beta = k_{33}^2$; k_{33} – коэффициент электромеханической связи; $\psi = kd$; $k = \omega/c_k$; $k_c = \omega/c_c$; c_k, c_c и z_k, z_c – скорость звука и удельный импеданс материала пьезопластин и промежуточного слоя соответственно; $\alpha_c = c_k/c_c$; $z' = z/d$; $p_1 = d_1/d$; $p_2 = d_2/d$; d – толщина всего пьезоактивного блока ППАФВ; z – координата.

Результаты численных исследований. В соответствии с (1) и (2) для ряда вариантов построения ППАФВ рассчитывались распределения упругих смещений и механических напряжений, когда возбуждение ППАФВ осуществляется в соответствии с решением задачи синтеза, предполагающей задание постоянной амплитудно-частотной и линейной фазочастотной характеристик (АЧХ и ФЧХ) излучения (колебательной скорости $\dot{\xi}_V$) и определение необходимого для этого соотношения между U_1 и U_2 [5]. Для гармонического режима работы в [6], рассматривались результаты расчетов нормированных величин: $\dot{\xi}_{VN} = \dot{\xi}_V / \dot{\xi}_{\max}$, $\xi_N = \xi^{(i)} / \xi_{\max}$ и $\sigma_N = \sigma^{(i)} / \sigma_{\max}$ ($i = 1, 2$; $\dot{\xi}_{\max}$, ξ_{\max} и σ_{\max} – максимальные значения при синфазном возбуждении пьезопластин) вдоль пьезоактивного блока ППАФВ, для трех разных частот для трех вариантов построения ППАФВ: 1 – ППАФВ состоит из двух пьезопластин равной толщины ($p_1 = p_2 = 0,5$); 2 – ППАФВ состоит из двух пьезопластин, одна из которых толще другой в 3 раза ($p_1 = p_2 = 0,75$); 3 – ППАФВ состоит из двух пьезопластин равной толщины между которыми находится диэлектрический слой ($p_1 = 0,25$; $p_2 = 0,75$). Некоторые результаты таких расчетов приводятся в презентации.

Импульсы упругого смещения $\xi(t)$ и механического напряжения $\sigma(t)$ для заданного поперечного сечения $z' = z/d$ определим с точностью до постоянного множителя по формулам:

$$\xi(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \xi^{(1),(2)}(z', \omega) \Phi(\omega) e^{j\omega t} d\omega; \quad \sigma(t) = 2 \operatorname{Re} \int_0^{\omega_B} \sigma^{(1),(2)}(z', \omega) \Phi(\omega) e^{j\omega t} d\omega;\tag{3}$$

где: $\Phi(\omega)$ – спектральная характеристика импульса возбуждения; ω_B – верхний предел интегрирования, определяющий полноту спектральных составляющих в спектральной характеристике $\Phi(\omega)$, например, по уровню $\Phi_{\min}(\omega) / \Phi_{\max}(\omega) \leq 0,1$.

В качестве примера на рис. 2 показан вид нормированных импульсов $\xi_N(t)$ и $\sigma_N(t)$ для ряда поперечных сечений пьезоактивного блока ППАФВ при условии требования об излучении однопериодного импульса, сформированного на частоте $\psi = \psi_0 = 2\pi$ (T_0 – полупериод). При этом импульс возбуждения, подаваемый на пьезопластину 1, по форме является тем акустическим

импульсом, который должен излучить ППАФВ, а структура другого импульса возбуждения учитывается с использованием формул (1) и (2) путем выделения отношения U_2/U_1 и определения его из решения задачи синтеза [5].

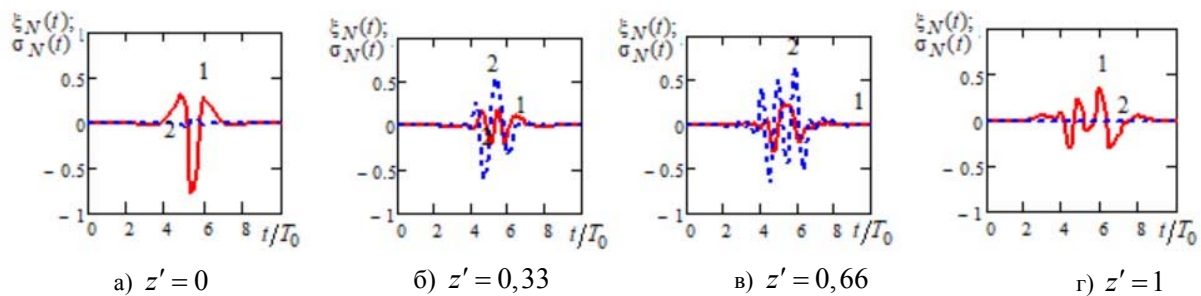


Рис. 2. Импульсы упругого смещения (1) и механического напряжения (2) для разных значений z'

Как видно, структура обоих импульсов существенно изменяется при переходе от одного поперечного сечения к другому. При $z' = z/d = 1$ величина $\sigma_N(t) = 0$, так как в этом примере тыльная нагрузка отсутствует ($z_w = 0$). Фронтальная нагрузка в виде слоев с резко отличающимися импедансами приводит к увеличению длительности импульсов $\xi_N(t)$ и $\sigma_N(t)$.

Выводы. Рассмотрена задача о распределении упругих смещений и механических напряжений вдоль пластинчатого преобразователя, состоящего из двух пьезопластин с различным амплитудно-фазовым возбуждением, разделенных промежуточным слоем. Проведен анализ влияния на характер распределения упругих смещений и механических напряжений геометрии элементов пластинчатого преобразователя. Характер распределения импульсов $\xi_N(t)$ и $\sigma_N(t)$ может служить дополнительным средством по оптимизации типа фронтальной нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Stanley B. Barnett, Adam Shaw, Kevin Martin. The Safe Use of Ultrasound in Medical Diagnosis, 2012, 166 p.
2. Коновалов С.И., Кузьменко А.Г. Особенности импульсных режимов работы электроакустических пьезоэлектрических преобразователей. – СПб.: Политехника, 2014, 294 с.
3. Кириллов В.И., Марков А.О. Процесс и критерий разрушения пьезокерамических преобразователей // Гидроакустика, 2015, вып. 23 (3), с. 9–19.
4. Степанов Б.Г., Зайцева Н.А. Об импульсном режиме работы широкополосных пластинчатых преобразователей с фазированным возбуждением образующих их пьезопластин // Сборник докладов студентов, аспирантов и молодых ученых 66 Науч.-техн. конф. ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013, с. 203–208.
5. Зайцева Н.А., Степанов Б.Г. Ультразвуковой широкополосный преобразователь с фазированным возбуждением двух образующих его пьезопластин // Дефектоскопия, 2015, № 1, с. 28–39.
6. Быстрова Н.А., Степанов Б.Г. Распределение механических напряжений и упругих смещений в пластинчатом преобразователе с амплитудно-фазовым возбуждением // Дефектоскопия, 2018, № 12, с. 12–22.

N.A.Bystrova (St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg). **Distribution of elastic displacements and mechanical stresses in ultrawideband laminated piezoelectric transducer**

The paper considers how elastic displacements and mechanical stresses are distributed along a laminated transducer consisting of two piezoelectric plates with different amplitude-phase excitation that are separated by an intermediate layer. We analyze the extent to which the nature of the distribution of elastic displacements and mechanical stresses is affected by the geometry of the elements of the laminated transducer.

УДК 681.51

Д.А. ОЛЕЙНИК, Г.М. ГУЛЯЕВ, В.И. ГУПАЛОВ
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ КАЖУЩЕГОСЯ УСКОРЕНИЯ

Описаны принципы построения прецизионного пьезоэлектрического акселерометра кажущегося ускорения. Для его построения был исследован эффект возбуждения пьезоэлектрика и принцип выделения полезного сигнала. В результате разработана схема тракта преобразования, в том числе позволяющая учитывать дрейф нуля и изменение масштабного коэффициента электрической части схемы.

Введение. Акселерометр состоит из чувствительного элемента (ЧЭ) и тракта преобразования сигнала. В реальных акселерометрах возникает множество погрешностей, в том числе смещение нуля и медленный дрейф нуля (далее объединим оба фактора в дрейф нуля), изменение масштабного коэффициента [1-2]. Эти ошибки способны возникать как в ЧЭ, так и тракте преобразования сигнала. Пьезоэлектрический ЧЭ лишен дрейфа нуля, что связано с рассеиванием индуцируемого заряда на обкладках пьезоэлемента [3-4]. Эта особенность позволяет устранить один из источников возникновения погрешностей акселерометра.

Целью работы является изучение принципов построения акселерометра с пьезоэлектрическим ЧЭ и коррекции ошибок тракта преобразования, по результатам которых разработана схема тракта.

Принцип построения пьезоэлектрического акселерометра кажущегося ускорения. В связи с рассеиванием индуцируемого заряда на обкладках пьезоэлемента существующие пьезоакселерометры могут работать только с вибрационными и ударными ускорениями, что ограничивает их область применения. Рассмотрим амплитудно-частотную характеристику электромеханических преобразований пьезоэлектрического ЧЭ.

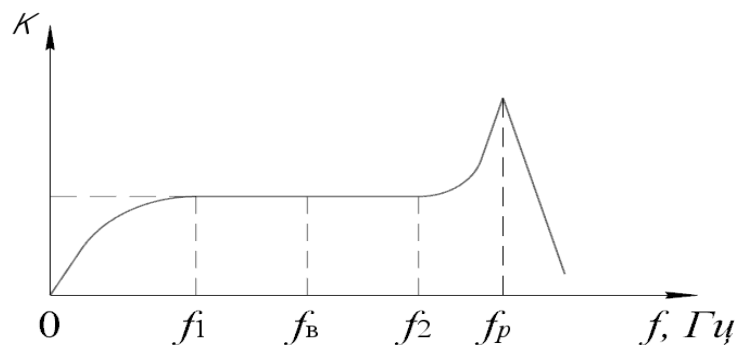


Рис. 1. Амплитудно-частотная характеристика коэффициента электромеханических преобразований пьезоэлектрика

Как видно на рисунке 1, при нулевой частоте коэффициент электромеханических преобразований равен нулю, следовательно, отсутствует пьезоэлектрический эффект. Для того, чтобы избежать рассеивания индуцируемого заряда между обкладками пьезопластины, предложено ввести возбуждение пьезоэлектрического ЧЭ [5]. Знакочувствительность пьезоэлектрического эффекта приведет к смещению рабочей точки на частоту возбуждения f_v . При этом частоту f_v стоит выбирать на участке между частотами f_1 и f_2 , где коэффициент электромеханических преобразований постоянен. Тогда выходной сигнал будет представлять аддитивную смесь сигналов преобразования гармонического воздействия и квазипостоянного кажущегося ускорения.

Схема измерительного канала с коррекцией дрейфа нуля. Учитывая отсутствие дрейфа нуля ЧЭ, предлагается корректировать дрейф нуля тракта преобразования, что позволит сни-

зять погрешности акселерометра. Коррекция может быть реализована с помощью микроконтроллера. Схема измерительного канала представлена на рисунке 2.

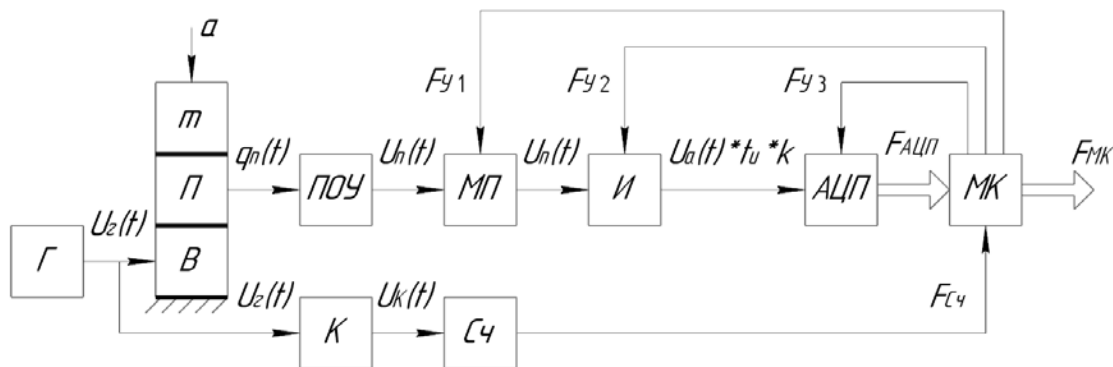


Рис. 2. Схема измерительного канала пьезоэлектрического акселерометра кажущегося ускорения (Г – генератор, а – ускорение, m – пробная масса, П – преобразователь, В – возбудитель, ПОУ – повторитель на операционном усилителе, МП – мультиплексор, И – интегратор, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, МК – микроконтроллер, К – компаратор, Сч – счетчик)

Принцип работы разработанной схемы заключается в том, что сигнал генератора $U_r(t)$ и ускорение a воздействуют на блоки возбудителя и преобразователя ЧЭ соответственно, суммируются, в результате чего между обкладками преобразователя возникает заряд $q_n(t)$. Для получения напряжения на выходе преобразователя $U_n(t)$ используется повторитель на операционном усилителе. От повторителя сигнал попадает на интегратор. Используя счетчик, время интегрирования t_n ограничивается целым числом периодов сигнала генератора, что позволяет избавиться от сигнала самого генератора. На выходе сигнал будет выглядеть как произведение сигнала от преобразования ускорения, действующего на пробную массу, времени интегрирования и коэффициента усиления. Для подсчета периодов сигнала генератора $U_r(t)$ проходит через компаратор, в котором проходит преобразование в меандр $U_k(t)$, и подается на микроконтроллер как количество периодов сигнала генератора, подсчитанного счетчиком $F_{сч}$. Микроконтроллер подает управляющий сигнал F_{y3} на аналого-цифровой преобразователь, запуская его. Аналого-цифровой преобразователь преобразует входной сигнал от интегратора в код и подает его на микроконтроллер. После записи кода в память, микроконтроллер подает управляющий сигнал F_{y2} на интегратор, осуществляя разряд конденсатора в обратной связи интегратора. Тогда полное время дискретизации $t_{дискр}$ можно определить как сумму времени интегрирования t_n , времени преобразования аналого-цифрового преобразователя $t_{пр}$ и времени разряда конденсатора t_0 .

Для исключения дрейфа нуля операционного усилителя был добавлен мультиплексор перед интегратором. Микроконтроллер подает управляющий сигнал F_{y1} мультиплексору переключиться на нулевой сигнал (землю), таким образом, на выход попадает только дрейф нуля тракта преобразования. Кроме того, подавая через мультиплексор фиксированный сигнал, можно узнать отклонение сигнала от заданного значения, а следовательно, определить масштабный коэффициент.

Заключение. В результате работы был предложен принцип построения акселерометра с пьезоэлектрическим чувствительным элементом. Согласно этому принципу возможно построение пьезоэлектрического акселерометра на эффекте возбуждения пьезоэлектрика, в котором будет устранен один из источников возникновения ошибок при измерениях – дрейф нуля ЧЭ. Разработанная схема тракта преобразования позволяет определять изменение масштабного коэффициента электрической части схемы во время ее работы и получать информацию о дрейфе нуля тракта преобразования сигнала.

ЛИТЕРАТУРА

1. [Электронный ресурс] Челпанов И.Б., Козлов Д.П., Кочетков А.В. Построение комплексной системы организации калибровки микромеханических датчиков // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №1 (2016) URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/21TVN116.pdf> (дата обращения 29.01.2022).

2. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон», 2009.-280 с.
3. Шарапов В.М., Мусиенко М.П., Шарапова Е.В. Пьезоэлектрические датчики. М.: Техносфера, 2006. – 632 с.
4. Ренне В.Т. Электрические конденсаторы. Издание третье, переработанное. Ленинград: Энергия, 1969. – 597 с.
5. Способ измерения кажущегося ускорения и пьезоэлектронный акселерометр для его реализации: Пат. RU 2566655 С1 РФ: МПК G01P 15/00 (2006.01) / В.И. Гупалов (RU) № 2014131405/28; заявл. 29.07.2014; Опубл. 27.10.2015. Бюл. № 30 – 8 с.

D.A. Oleynik, G.M. Gulyaev, V.I. Gupalov (ETU «LETI», Saint-Petersburg). **Principles of building precision piezoelectric accelerometer of apparent acceleration**

This paper discusses the development of a precision piezoelectric apparent acceleration accelerometer, such as the effect of excitation of a piezoelectric, as well as the principle of extracting a useful signal and obtaining zero drift and a deviation of the scale factor of the conversion path.

УДК 681.51

Е. А. ЯКУШИНА

(Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск)

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СИНХРОННОГО ГИСТЕРЕЗИСНОГО ГИРОДВИГАТЕЛЯ

Исследуется возможность оптимизации энергетических параметров синхронного гистерезисного двигателя на основе модели, разработанной в среде ANSYS Maxwell. Согласно полученным данным представлены рекомендации по выбору оптимального значения величины воздушного зазора и числа витков в пазах статора.

Введение. В качестве чувствительного элемента навигационных систем широкое применение нашли механические гироскопы, вращающий момент которых создается при помощи синхронного гистерезисного двигателя (СГД). Точность гироскопического чувствительного элемента в том числе зависит от точности и устойчивости работы гироскопического двигателя, поэтому гироскоп должен обладать стабильной скоростью вращения, центр масс и геометрический центр вращающегося тела должны совпадать и быть стабильны, а также иметь высокие энергетические показатели [1].

Компьютерное моделирование позволяет еще на этапе проектирования оптимизировать разрабатываемый двигатель, рассмотрев его вариации. Таким образом, целью работы является создание цифровой модели СГД с последующим улучшением его энергетических показателей путём изменения величины зазора и числа витков в пазах статора. В работе для анализа математической модели СГД была выбрана программа ANSYS Maxwell, построенная на применении метода конечных элементов для выполнения электромагнитных расчетов.

Особенности конструкции и работы СГД. Статор гистерезисного двигателя аналогичен по конструкции статору асинхронной машины. Ротор СГД представляет собой цилиндр, выполненный из ферромагнитного материала, особенность которого заключается в его магнитных свойствах (величине остаточной намагниченности и коэрцитивной силе), которые находят в промежуточном положении между магнитомягкими сталями, используемыми в сердечниках статоров, и магнитотвердыми – постоянных магнитах. Это свойство позволяет намагнитить и перемагнитить материал ротора в магнитном поле статора. Форма петли гистерезиса определяет закон изменения напряженности поля активного слоя ротора от времени и при заданном изменении индукции.

Моделирование СГД в среде ANSYS. Для моделирования электромагнитных процессов в среде ANSYS Maxwell разработана расчетная модель СГД. Геометрические размеры рассчитаны на основе выражений, приведенных в [2], исходя из следующих значений силы тока и момента: $I_{расч}=0,547\text{ А}$, $M_{расч}=9,13\text{ мН}$. При этом в гидродвигателе применяются следующие материалы:

- Статор – сталь 2421;
- Ротор – сплав Fe-Cr-Co [3];
- Обмотка статора – медь.

Полученные результаты моделирования близки к расчетным значениям: сила тока $I_{0\text{ модели}}=0,63\text{ А}$, момент $M_{модели}=9,5\text{ мН}$, время разбега двигателя до номинальной скорости – приблизительно 8 секунд.

Оптимизация. Для последующей оптимизации выходных энергетических параметров двигателя (снижение потерь и увеличение момента на валу) было определено влияние величины воздушного зазора и количества витков в пазах статора на величину момента и силы тока СГД [4]. При увеличении воздушного зазора (рис.1) увеличивается величина силы тока, момент на валу при этом уменьшается. Оптимальный вариант воздушного зазора 0,1 мм позволяет повысить энергетические показатели двигателя, так как с уменьшением воздушного зазора потери в

меди падают, а величина полезной мощности на валу растет. Последующее уменьшение величины воздушного зазора ограничивается технологией изготовления.

С увеличением витков в пазе статора увеличивается общее сопротивление обмотки, в результате чего величина силы тока и момент на валу уменьшаются (рис. 2). Оптимальное значение числа витков при сохранении сечения провода равного $0,224 \text{ мм}^2$ может быть выбрано с учетом величины момента на валу. В нашем случае значение витков в пазе $n=50$ является оптимальным и позволяет двигателю создать момент $M = 9 \text{ мН}\cdot\text{м}$.

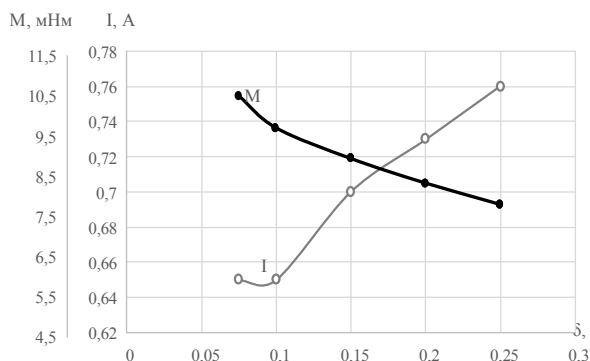


Рис. 1. Зависимость момента на валу и силы тока статора от величины воздушного зазора

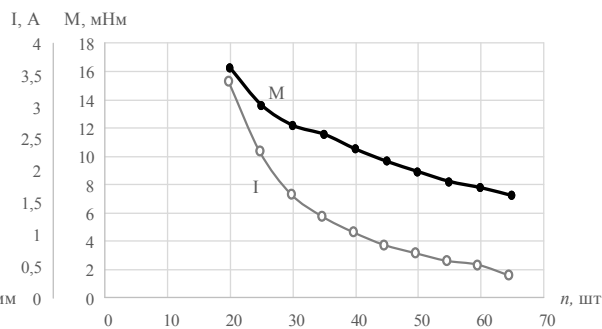


Рис. 2. Зависимость момента на валу и силы тока статора от количества витков в пазе статора

Заключение. В работе в среде ANSYS Maxwell была разработана модель синхронного гистерезисного двигателя. Рассмотрены варианты оптимизации выходных параметров СГД, основанные на изменении величины воздушного зазора и количества витков в пазе статора. Согласно полученным данным были представлены рекомендации, позволяющие улучшить энергетические показатели СГД, и, как следствие, повысить точность гироскопического чувствительного элемента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукьянов, Д. П. Прикладная теория гироскопов Д. П. Лукьянов, В. Я. Распопов, Ю. В. Филатов; Гос. науч. центр Российской Федерации, ОАО "Концерн "Центральный науч.-исслед. ин-т "Электроприбор". - Санкт-Петербург: Концерн "Центральный науч.-исслед. ин-т "Электроприбор", 2015. - 315 с
2. Мастяев Н. З., Орлов И. Н. Гистерезисные электродвигатели. Ч. 2. Вопросы проектирования. — М.: МЭИ, 1963. — 187 с.
3. Кашин Е. И. Исследование и разработка гистерезисных электрических машин на основе деформируемого сплава Fe-Cr-Co : научный доклад / Е. И. Кашин ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Управление магистратуры, аспирантуры и докторантуры (УМАД), Отдел аспирантуры и докторантуры (ОАиД) ; науч. рук. А. Г. Гарганеев. — Томск, 2018.
4. Мастяев Н.З. Гистерезисные электродвигатели. Ч. I / Н.З. Мастяев, И.Н. Орлов. – М.: МЭИ, 1963. – 220 с.

Д.А.ГОНТАРЬ, Е.В.ДРАНИЦЫНА

(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Представлены результаты сравнительного анализа эффективности использования нескольких методов машинного обучения, таких как полиномиальная регрессия нескольких переменных и нейронная сеть, для компенсации погрешности измерений волоконно-оптического гироскопа, вызванной изменением температуры.

Введение. Уникальная чувствительность волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), которую можно достичь за счет увеличения длины волоконного контура, открывает широкие перспективы их использования в навигационных системах в тех случаях, когда необходимо обеспечить длительную высокоточную автономную работу [1]. В свою очередь увеличение длины волоконного контура до нескольких километров значительно увеличивает его чувствительность к изменению температуры окружающей среды, которая может меняться в широких пределах. Одной из основных проблем при создании высокоточных ВОГ является чувствительность выходного сигнала к изменению температуры [2].

Задача учета влияния изменения температуры на выходной сигнал ВОГ, помимо различных конструктивных решений и применения термостатирования может быть решена введением алгоритмической температурной компенсации выходного сигнала [3,4]. Существует множество методов алгоритмической компенсации [3–5], но в последнее время наиболее популярными являются методы машинного обучения. Суть всех этих методов заключается в наличии этапа обучения алгоритма, который затем используется при решении задачи компенсации. Среди таких методов можно выделить: линейную, логистическую, полиномиальную и хребтовую регрессии, регрессию лассо, искусственные нейронные сети [6–8]. Для оптимизации систем, построенных на методах машинного обучения, используют различные оптимизационные алгоритмы: статистические алгоритмы, генетические алгоритмы, метод роя частиц [9–11].

В настоящей работе предлагается повысить точность полиномиальной регрессии температурной зависимости выходного сигнала ВОГ за счет добавления в полином дополнительных переменных, отвечающих за совместное влияние температуры и скорости ее изменения. С целью подтверждения эффективности предложенного метода проведен его сравнительный анализ с полиномиальной регрессией от двух независимых переменных и нейронной сетью. Во всех трех рассматриваемых случаях компенсации температурной зависимости ВОГ в качестве входных параметров использовались температура и скорость ее изменения.

Полиномиальная регрессия. Известно [2], что выходной сигнал ВОГ зависит не только от значения температуры, но и от пространственно-временного градиента ее изменения. Для идентификации зависимости выходного сигнала от температуры и ее последующего учета на волоконный контур устанавливают несколько датчиков температуры [12]. Наиболее распространенным методом компенсации температурной зависимости выходного сигнала ВОГ, ввиду своей простоты, является полиномиальная регрессия, которая представляет собой сумму функций средней температуры катушки и скорости ее изменения в виде полиномов той или иной степени [3-5]:

$$P(T, \dot{T}, c_0, \dots, c_{n+m}) = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i \cdot T^i + \sum_{j=1}^m c_{n+j} \cdot \dot{T}^j, \quad (1)$$

где T, \dot{T} - значение и скорость изменения средней температуры катушки, $c_0 \dots c_{n+m}$ - коэффициенты температурной модели, n, m - степени полиномов. Повышение степени полинома не всегда влечет за собой значительное повышение точности компенсации, но

повышает вычислительную сложность полученной модели и может привести к непредсказуемому поведению на границах интервала.

В настоящей работе предлагается повысить точность компенсации полиномиальной регрессии за счет добавления в полином дополнительных переменных, отвечающих за совместное влияние температуры и скорости ее изменения на выходной сигнал ВОГ. Запишем полиномиальную регрессию 3 степени:

$$P(T, \dot{T}, c_0, \dots, c_6) = c_0 + c_1T + c_2T^2 + c_3T^3 + c_4\dot{T} + c_5\dot{T}^2 + c_6\dot{T}^3. \quad (2)$$

С учетом дополнительных членов полиномиальная регрессия 3 степени примет следующий вид:

$$P(T, \dot{T}, c_0, \dots, c_9) = c_0 + c_1T + c_2T^2 + c_3T^3 + c_4\dot{T} + c_5\dot{T}^2 + c_6\dot{T}^3 + c_7T\dot{T}^2 + c_8T^2\dot{T} + c_9T\dot{T}. \quad (3)$$

Отличительная особенность формулы (3) заключается в наличии слагаемых, учитывающих совместное влияние переменных на выходной сигнал ВОГ. Необходимость учета таких дополнительных слагаемых вызвана тем, что составные части волоконно-оптической катушки подбирают с близкими, но все-таки отличающимися коэффициентами температурного линейного расширения. А несогласованное расширение/сжатие элементов катушки может приводить к увеличению чувствительности выходного сигнала ВОГ к изменению температуры катушки при повышении температуры.

Экспериментальные результаты. Для определения эффективности предлагаемого алгоритма были записаны данные о смещении нуля выходного сигнала ВОГ в термокамере при изменении температуры в диапазоне $-15 \dots 40^\circ\text{C}$ с разными скоростями. Данные были сформированы на 24-часовом интервале времени с частотой 100 Гц. С использованием одной и той же обучающей выборки были рассчитаны коэффициенты полиномиальной регрессии 3 степени двух типов: по формуле (2) и по формуле (3). Для нахождения коэффициентов использовался метод наименьших квадратов, обеспечивающий минимум суммы квадратов невязок [13]:

$$\sum_{i=1}^k \delta_i^2 = \sum_{i=1}^k (\hat{u}_{0i} - P(T_i, \dot{T}_i, c_0, \dots, c_9))^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где δ_i – i -я невязка, k – количество измерений в обучающей выборке, \hat{u}_{0i} – i -е смещение нуля ВОГ. Особую популярность в последнее время приобретает использование нейронных сетей для компенсации зависимости выходного сигнала ВОГ от температуры и скорости ее изменения [14]. Для сравнения с алгоритмами, основанными на полиномиальной регрессии, была выбрана двуслойная однонаправленная полносвязная нейронная сеть (НС) с 30 нейронами

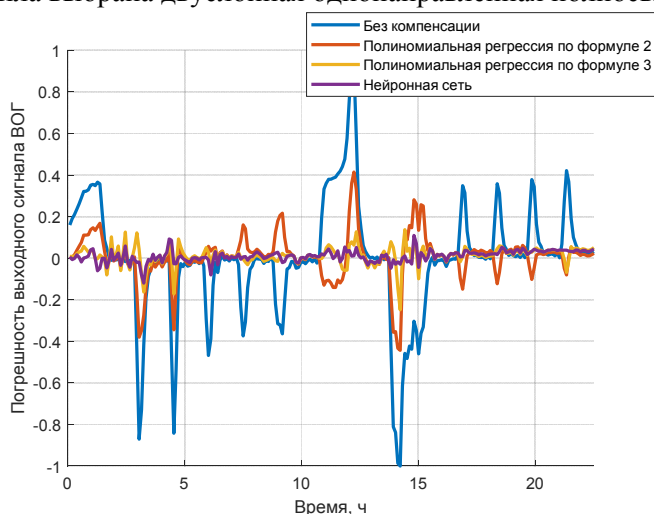


Рис.1 Выходной сигнал ВОГ до и после компенсации

в скрытом слое и сигмоидальной функцией их активации [15]. Эта НС обучалась по тому же набору исходных данных. После завершения этапа обучения с целью определения коэффициентов полиномов и настроек НС полученные алгоритмы применялись для компенсации показаний ВОГ. Для этих целей привлекались данные, полученные в ходе отдельного 24-часового термоцикла. В отличие от этапа обучения, на этапе компенсации используются не все полученные данные о температуре и скорости ее изменения, а только значения, относящиеся к текущему измерению ВОГ. Результаты компенсации описанными выше

методами в виде скомпенсированных значений смещения нуля ВОГ показаны на рис.1. Данные представлены относительно максимального смещения нуля некомпенсированного сигнала. В

таблице 1 приведены утроенные значения среднеквадратической погрешности для обсуждаемых алгоритмов. Из представленных данных видно, что точность компенсации с помощью предлагаемой полиномиальной регрессии с дополнительными членами заметно выше, чем для обычной полиномиальной регрессии и несколько меньше, чем для НС. При этом следует иметь в виду, что реализация предлагаемого алгоритма в вычислительном плане проще, чем алгоритм НС. Это говорит о том, что предлагаемая модель позволяет в значительной степени учесть факторы совместного влияния температуры и ее производной на выходной сигнал ВОГ.

Таблица 1

	Некомпенсированный сигнал	Полиномиальная регрессия (2)	Полиномиальная регрессия (3)	Нейронные сети
3хСКО	0,82	0,33	0,13	0,08

Заключение. Предложен метод повышения точности полиномиальной регрессии температурной зависимости выходного сигнала ВОГ за счет добавления в полином дополнительных переменных, отвечающих за совместное влияние температуры и скорости ее изменения. Представлены результаты сравнительного анализа эффективности предложенного метода с полиномиальной регрессией от двух независимых переменных (температуры и скорости ее изменения), которые показали, что в рассматриваемом примере предложенный метод полиномиальной регрессии позволяет в 2,5 раза повысить точность компенсации без увеличения степени полинома. Однако предложенный метод все же уступает нейронным сетям по точности компенсации в 1,5 раза, что говорит о дополнительных не выявленных нелинейных слагаемых.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 2. С. 3–10.
2. **Lefevre, H.C.** The Fiber -Optic Gyroscope. Second edition / H.C. Lefevre. – London: Artech House, 2014. 405 p.
3. **Драницына Е.В., Егоров Д.А., Унтилов А.А., Дейнека Г.Б., Шарков И.А., Дейнека И.Г.** Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2012. № 4. С. 10–20.
4. **Никифоровский Д.А., Смирнов Д.С., Деннека И.Г., Никитенко А.Н., Рупасов А.В.** Исследование зависимости показаний волоконно-оптического гироскопа от температуры окружающей среды при высоких скоростях изменения температуры // Материалы 32-й конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова (Санкт-Петербург, 2020). 2020. С. 21–25.
5. **Вахрамеев Е.И., Галягин К.С., Ошивалов М.А., Савин М.А.** Методика численного прогнозирования и коррекции теплового дрейфа ВОГ // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. №1. С. 32-37.
6. **Дрейпер Н.Р., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. 2017.
7. **Мелкумова Л.Э., Шатских С.Я.** Сравнение методов Ридж-регрессии и LASSO в задачах обработки данных // Информационные технологии и нанотехнологии. 2017. С. 1749–1755.
8. **Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А.** Глубокое обучение. 2018. 652 с.
9. **Юрьевич Л.Б.** Методы оптимизации. 2009. 127 с.
10. **Панченко Т.В.** Генетические алгоритмы. 2007. 86 с.
11. **Karpenko, Seliverstov.** Review of the particle swarm optimization method (PSO) for a global optimization problem // Sci. Educ. Bauman MSTU. Science and Education of the Bauman MSTU, 2015.
12. **Quatraro, E.** High performance FOG for non temperature stabilized environment / E. Quatraro and others. // Inertial Sensors and Systems, 2011. – P. 1.1–2.14.
13. **Степанов, А.О.** Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Ч.1. Введение в теорию оценивания / Изд. 2-е, испр. и доп. / А.О. Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2010.– 509 с.
14. **Климкович Б.В.** Влияние случайной погрешности температурных датчиков на качество температурной компенсации смещения нуля ВОГ нейронной сетью // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 4. С. 53–70.
15. **Gontar D.A., Dranitsyna E.V.** Compensation for the Temperature Dependence of the Fog Output Signal // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2022. Т. 1215, № 1. С. 012003.

УДК 681.51

Е. Н. КЛИМОВА, Е.В. ДРАНИЦЫНА
(ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, Санкт-Петербург)

ВЕРИФИКАЦИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ЭКРАНИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ЭКРАНА ПО ДАННЫМ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Описана конструкция магнитного экрана волоконно-оптического гироскопа. Теоретически рассчитаны коэффициенты магнитного экранирования для экранов из пермаллоя, аморфных сплавов и их комбинации. Верифицированы коэффициенты экранирования для двух вариантов конструкции магнитного экрана методом испытаний на лабораторной установке. Предложены варианты усиления магнитного экрана волоконно-оптического гироскопа.

Введение. Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) – это оптико-электронный прибор, измеряющий угловую скорость движения объекта, на котором он установлен. ВОГ имеет потенциально высокую долговременную стабильность сдвига нуля выходного сигнала, но при этом чувствителен к внешним возмущениям, в том числе к магнитному полю [1,2]. При помещении ВОГ в магнитное поле, из-за эффекта Фарадея [3], в оптическом канале гироскопа происходит поворот плоскости поляризации линейно поляризованной электромагнитной волны, что проявляется в виде сдвига нуля выходного сигнала ВОГ. Снизить влияние магнитного поля на показания ВОГ и улучшить его точностные характеристики можно путем экранирования волоконного контура [4]. Чаще всего магнитные экраны выполняются из пермаллоя 79НМ, который обладает высокой прочностью, коррозионной устойчивостью и пластичностью. Он имеет высокие показатели удельного сопротивления и магнитной проницаемости и отличается малым коэффициентом перемагничивания. Для увеличения коэффициента магнитного экранирования (КМЭ) экраны делают многослойными, так как в этом случае при наличии достаточных зазоров между экранами суммарный КМЭ значительно выше, чем у однослойного экрана той же толщины [5]. Однако наличие технологических крепежных отверстий, нарушения технологии механической обработки или отжига приводят к снижению экранирующих свойств. Для повышения магнитных свойств многослойный экран из пермаллоя можно усилить аморфными сплавами, не меняя его габаритные размеры.

Целью работы является теоретический расчет КМЭ упрощенной конструкции однослойных и трехслойных экранов из пермаллоя, аморфных сплавов и их комбинации, а также верификация КМЭ двух вариантов конструкции магнитного экрана ВОГ. Верификация заключается в измерении КМЭ реальной конструкции экранов и определении запаса, которому должен удовлетворять теоретически рассчитанный коэффициент предлагаемой конструкции. Предложены варианты усиления экранирующих свойств магнитного экрана ВОГ.

Выбор конструкции магнитного экрана. В работе исследуется существующая конструкция трехслойного магнитного экрана из пермаллоя катушки ВОГ [6]. А также рассматривается возможность усиления имеющегося экрана новыми конструкционными материалами – аморфными сплавами. Каждый экран выполняют из двух частей магнитомягкого материала, образующих при совмещении замкнутую форму с чувствительным элементом ВОГ внутри. Прочную фиксацию и магнитное экранирование обеспечивает соединение внахлест двух частей формы.

Аморфные сплавы – новый особый класс прецизионных сплавов, отличающийся от кристаллических сплавов структурой, способом изготовления и свойствами [7]. Железokoбальтовые сплавы обладают высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой, что позволяет причислить его к магнитомягким материалам. Коэрцитивная сила тем меньше, чем крупнее зерно, а структура аморфных сплавов подобна единому зерну. Теоретически они могут заменить традиционные пермаллои – сплавы, содержащие от 45 до 83 % никеля.

Соперником аморфных сплавов являются нанокристаллические сплавы, так как они схожи по структуре и технологии изготовления. Они имеют достаточно высокие магнитные свойства в высокочастотной области, однако нанокристаллы отличаются сверхмелкокристаллической структурой (размер кристаллов от 1 до 10 нм) и при этом являются более экономичными.

В таблице 1 приведены сравнительные характеристики материалов, обладающих высокими магнитными свойствами [7]. Важно отметить, что аморфные сплавы можно использовать для заполнения зазоров между слоями из пермаллоя для увеличения КМЭ в тех же габаритах.

Таблица 1

Материал	Пермаллой	Аморфный сплав		Нанокристаллический сплав
	79НМ	на осн. Со	на осн. Fe	на осн. Fe
Амплитуда магнитной индукции, Вм (Тл)	0.74	0.58	1.56	1.16
Коэрцитивная сила, Нс(Э)	0.03	0.005	0.03	0.01
Начальная проницаемость, μ_i	40 000	60 000	5 000	70 000
Удельное сопротивление, ρ ($\mu\text{Ом/см}$)	60	120	130	130
Температура Кюри, T_c ($^{\circ}\text{C}$)	500	120	130	130
Оптимальная область рабочих частот, f (кГц)	0...10	10...	10...100000	10...100000

Теоретический расчет экрана. В работе исследовалась сборка из трех однослойных цилиндрических магнитных экранов, вставляющихся друг в друга и выполненных из пермаллоя или аморфного железа, а также их комбинации. При расчете КМЭ учитываются: геометрия экрана, количество слоев, материал, толщина каждого слоя и величина зазора между слоями. Однако, важно отметить, что расчет ведется без учета технологических отверстий, предназначенных для крепления ВОГ, находящихся в экране и снижающих КМЭ.

КМЭ определяется для каждого слоя экрана в радиальном (K_T) и осевом (K_L) направлениях в соответствии с выражениями [8]:

$$K_T = \frac{\mu \cdot t}{2 \cdot R}, \tag{1}$$

$$K_L = \frac{4 \cdot N \cdot K_T + 1}{1 + R/L}, \tag{2}$$

где μ – магнитная проницаемость материала; t – толщина стенки; R – радиус цилиндрического экрана; L – высота цилиндрического экрана; N – фактор демагнетизации, $N = [1/(1-p^2)] \cdot \{1 - p \cdot \cos^{-1}(p)/\sqrt{1-p^2}\}$ при $p = L/2R$.

Суммарные КМЭ многослойного экрана для двух направлений определяются по формуле:

$$K = K_n \prod_{i=1}^{n-1} K_i \left[1 - \left(\frac{R_{i+1}}{R_i} \right)^k \right], \tag{3}$$

где i – порядковый номер слоя; n – количество слоев; k – коэффициент, зависящий от геометрии сечения экрана: $k = 2$ для радиального и $k = 1$ для осевого направлений.

Теоретические расчеты КМЭ выполнены для экрана с $t = 0,35$ мм, $R_3 = 73$ мм, $R_2 = 74,5$ мм, $R_1 = 76$ мм, $L_3 = 43$ мм, $L_2 = 44,5$ мм, $L_1 = 46$ мм и представлены в таблице 2.

Таблица 2

Теоретически рассчитанные коэффициенты магнитного экранирования

Материал	Однослойный экран		Трехслойный экран	
	в радиальном направлении K_T	в осевом направлении K_L	в радиальном направлении K_T	в осевом направлении K_L
Пермаллой 79НМ	95	105	970	335
Аморфное железо	10	15	2	1
Аморфный кобальт	140	155	3 260	1 130
Нанокристаллический сплав	165	180	5 180	1 780

Как видно из таблицы 2 теоретически рассчитанные значения КМЭ нанокристаллического сплава и аморфного сплава на основе кобальта значительно превосходят пермаллой. Таким образом, имеющуюся конструкцию магнитного экрана чувствительного элемента ВОГ можно усилить заменой материала промежуточного экрана с пермаллоя на аморфный кобальт или нанокристаллический сплав. Далее будут представлены экспериментальные данные по определению КМЭ экранов из пермаллоя и аморфного железа с целью верификации теоретического расчета. Экран из аморфного железа, выполненный в габаритах существующей конструкции ВОГ, как видно из таблицы 2, не обладает достаточным КМЭ, его выбор для проведения эксперимента был определен доступностью приобретения.

Экспериментальные данные. Реальный КМЭ может в разы отличаться от рассчитанного теоретически. Нарушение технологии механической обработки или отжига, наличие предназначенных для крепления ВОГ технологических отверстий, а также неплотное прилегание частей магнитного экрана приводят к значительному снижению КМЭ. Для определения реального КМЭ и верификации теоретических расчетов были проведены испытания экрана из пермаллоя и макета экрана из аморфного железа – каждый из экранов устанавливали на основание и с помощью катушки создавали поле при различных значениях подаваемого в нее тока. Для каждого образца в одном и том же месте измерялись напряженность магнитного поля внутри объекта исследования и напряженность внешнего поля, создаваемого катушкой. Значение КМЭ рассчитывалось как отношение напряженностей по формуле:

$$K = B_{\text{внеш}} / B_{\text{внутр}}, \quad (4)$$

где $B_{\text{внеш}}$, $B_{\text{внутр}}$ – напряженности магнитного поля, создаваемого снаружи и внутри экрана.

Результаты, полученные в ходе проведения эксперимента, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Коэффициенты магнитного экранирования в радиальном направлении, полученные экспериментально

Материал	Однослойный экран		Трехслойный экран	
	теоретический	экспериментальный	теоретический	экспериментальный
Пермаллой 79НМ	95	34,72	970	147
Аморфное железо	10	2,1	2	-
Пермаллой с вставкой из 1 слоя аморфного железа	120	38,5	880	125

Эксперимент показал значительное снижение реального КМЭ: в 3–7 раз по отношению к теоретическому расчету. Таким образом при проектировании магнитного экрана необходимо учитывать, что КМЭ, рассчитанный теоретически, должен обеспечивать семикратный запас по отношению к требуемому.

Заключение. В работе описана конструкция магнитного экрана ВОГ. Представлены теоретические расчеты КМЭ экранов из магнитомягких материалов и их сравнение. Предложены варианты усиления конструкции магнитного экрана ВОГ. Представлены экспериментальные данные по определению КМЭ экранов из пермаллоя и аморфного железа, которые показали значительное снижение измеренного КМЭ в 3–7 раз по отношению к теоретическому расчету. Снижение КМЭ вызвано нарушением технологии механической обработки или отжига, наличием предназначенных для крепления ВОГ технологических отверстий, а также неплотным прилеганием частей одного слоя магнитного экрана.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов: учебник. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2015. 316 с.
2. Новиков А.В. Принцип работы волоконно-оптического гироскопа. [Электронный ресурс]: Научная электронная библиотека КиберЛенинка // 2006. Электротехника, электронная техника, информационные технологии.
3. Перов Н. С. Магнитное экранирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bigenc.ru/>.
4. Рамзаев А.П. Волоконно-оптический гироскоп. [Электронный ресурс]: Патентный поиск Московский инновационный кластер // Патент № 88797. Дата подачи заявки 10.07.2009.

5. Donley E. A., Hodby E., Hollberg L., Kitching J. Demonstration of high-performance compact magnetic shields for chip-scale atomic devices. – Review of Scientific Instruments 78, 083102, 2007. [<https://doi.org/10.1063/1.2767533>].
6. **Унтилов А.А., Егоров Д.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Нефоросный С.Т., Азбелева М.П., Драницына Е.В.** Результаты испытаний волоконно-оптического гироскопа. Гироскопия и навигация. Том 25, № 3 (98), 2017 [Электронный ресурс]: <https://mstator.ru/ru/products/amorf>.
- 7.
8. **Кулаченков Н.К., Шевченко А.Н., Безмен Г.В.** Исследование магнитных экранов с использованием современных методов проектирования. Материалы XVIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», 2016

E.N. Klimova, E.V. Dranitsyna (State Research Center of the Russian Federation – Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)

Refinement of the shielding coefficient of the magnetic shield according to the data of the fiber-optic gyroscope

The design of the magnetic shield of a fiber-optic gyroscope is described. Theoretical calculations are made of the magnetic shielding coefficients for a permalloy shield and shield made of amorphous alloys. Shielding coefficients were verified by testing on a laboratory setup for two materials. Options for improving the design of the magnetic shield of a fiber-optic gyroscope are proposed.

УДК 681.787

Т.М. АХМАДИЕВ

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ», Санкт-Петербург)

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАТОРА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАТОРНОГО ГИРОСКОПА С МОДУЛЯТОРОМ МАХА-ЦЕНДЕРА

Приводится анализ влияния коэффициента потерь и коэффициента оптической связи на предельную чувствительность и рабочий диапазон пассивного кольцевого резонатора с модулятором Маха-Цендера. Даны рекомендации по выбору коэффициентов.

Введение. Резонаторные микрооптические гироскопы являются перспективным типом оптических гироскопов, ориентированным на применение в малогабаритных объектах [1,2]. Они лишены недостатков микромеханических гироскопов, таких как чувствительность к ударам и вибрациям. Однако, почти все существующие прототипы резонаторных оптических гироскопов используют перестраиваемые лазеры [3, 4]. Это препятствует их миниатюризации. Недавно был предложен вариант резонаторного волоконно-оптического гироскопа с модулятором Маха-Цендера, который не требует сканирование резонатора по частоте [5]. В настоящей работе представлены результаты расчётов влияния параметров резонатора на его характеристики.

Принцип работы гироскопа. Излучение от лазера (рис.1) через оптические циркуляторы

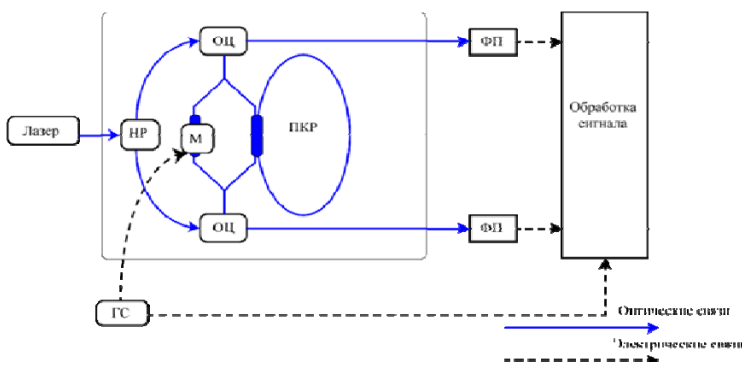


Рис. 1. Схема исследуемого гироскопа

(ОЦ) и направленный разветвитель (НР) поступает на вход пассивного кольцевого резонатора, включенного в модулятор Маха-Цендера. Излучение вводится резонатор и обходит его по встречным направлениям: по и против часовой стрелке (*СВ* и *ССВ*). За счет эффекта Саньяка, в резонаторе излучение, распространяющееся по встречным направлениям, имеет разный набег фазы. В результате частотные характеристики резонатора для *СВ* и *ССВ* направлений его обхода оказываются сдвинуты в противоположные стороны и мощность излучения на фотоприемниках (ФП) будет равна [4]:

$$P_{outCCW} = 0.25(1 + T_{CCW})P_{inCCW} + 0.5T_{CCW}^{\frac{1}{2}}P_{inCCW} \cos(\Delta\delta + \Delta\Phi_{CCW}), \quad (1)$$

$$P_{outCW} = 0.25(1 + T_{CW})P_{inCW} + 0.5T_{CW}^{\frac{1}{2}}P_{inCW} \cos(\Delta\delta + \Delta\Phi_{CW}), \quad (2)$$

где P_{inCW} и P_{inCCW} – оптическая мощность, направляемая на входы интерферометра Маха-Цендера; T_{CCW}, T_{CW} – амплитудно-частотная характеристика резонатора для *СВ* и *ССВ* волн; $\Delta\delta$ – набег фазы, создаваемый модулятором(М); $\Delta\Phi_{CCW}, \Delta\Phi_{CW}$ – фазо-частотная характеристика резонатора для *СВ* и *ССВ* волн.

Из 1 и 2 очевидно, что при линейном изменении фазы модулятором М (с генератора (ГС) поступает пилообразный сигнал) на ФП будет наблюдаться периодический сигнал с постоянной составляющей. От угловой скорости будут зависеть как амплитуда, так и положение максимумов и минимумов этого сигнала. Это позволяет, используя соответствующие масштабные коэффициенты измерять угловую скорость по амплитуде сигнала (амплитудный метод) или по положению его максимумов и минимумов (фазовый метод) [6, 7].

Исследование производилось на основе результатов моделирования описанного выше гироскопа и методов измерения угловой скорости. Параметры исследуемого в работе гироскопа: длина волны лазера – 1,5 мкм; мощность излучения в каждом оптическом канале – 5 мВт;

радиус пассивного кольцевого резонатора – 5 мм, эффективный показатель преломления волноводов – 1,5; частота съёма сигнала с фотоприемника – 100 кГц; период пилообразного сигнала – 0,01 с.

Амплитудный метод. В ходе исследований зависимости характеристик гироскопа от параметров, было установлено, что для амплитудного метода оптимальным (с точки зрения исследуемых параметров: предельной чувствительности и рабочего диапазона гироскопа) является режим работы с равными значениями коэффициента оптической связи K_c и коэффициента потерь P , т. к. при расхождении этих параметров резко падает чувствительность для области низких угловых скоростей. При условии равенства этих коэффициентов, зависимости линейны. Так, например, при коэффициентах равных 0,001 предельная чувствительность равна $2,1 \cdot 10^{-6}$ рад/с, а рабочий диапазон равен 360 рад/с. При коэффициентах, равных 0,05, предельная чувствительность равна 10^{-4} рад/с, рабочий диапазон равен 17900 рад/с. Выразим полученную зависимость:

$$\delta\omega = 2,1 \cdot 10^{-4} k \quad (3)$$

$$\Delta\omega = 3,6 \cdot 10^5 k \quad (4)$$

где $\delta\omega$ – предельная чувствительность, $\Delta\omega$ – рабочий диапазон, k – коэффициент оптической связи или коэффициент удельных потерь.

Фазовый метод. Этот метод не требователен к равенству коэффициентов связи и потерь, в отличие от амплитудного. Но для него характерно значительное различие выходных характеристик (масштабного коэффициента) в зависимости от отношения этих коэффициентов. Оптимальным с точки зрения предельной чувствительности и рабочего диапазона является вариант, когда коэффициент потерь меньше коэффициента оптической связи. На рис. 2а и б представлены зависимости предельной чувствительности и рабочего диапазона от коэффициентов K_c и P .

В сравнении с амплитудным, этот метод имеет преимущество по рабочему диапазону, но при равных значениях P проигрывает по предельной чувствительности. Фазовый метод является более перспективным, т.к. он не накладывает жестких требований на значения K_c и P и их стабильность.

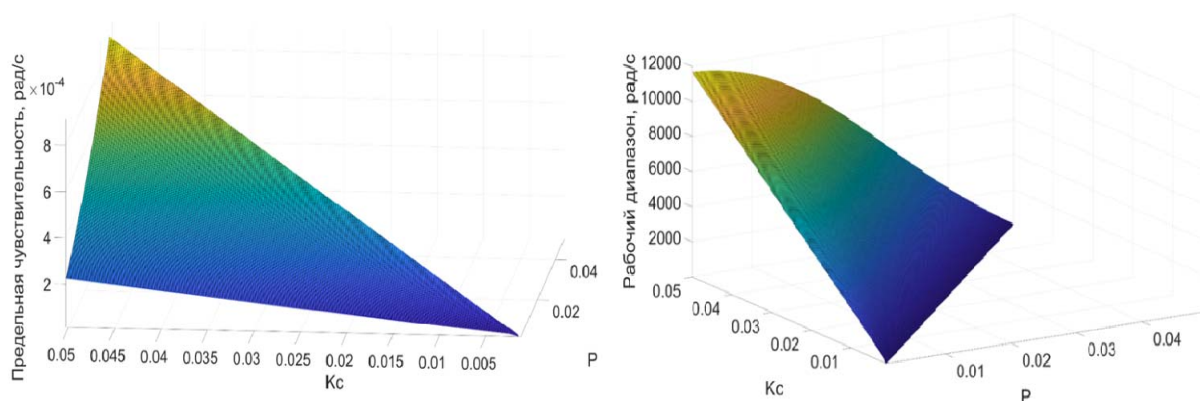


Рис. 2. Зависимость исследуемых параметров от потерь и коэффициента связи.
а) предельной чувствительности. б) рабочего диапазона

Заключение. В докладе рассмотрены амплитудный и фазовый методы измерения угловой скорости в резонаторном оптическом гироскопе с модулятором Маха-Цендера. Для этих методов были изучены зависимости основных параметров (предельной чувствительности, рабочего диапазона) от коэффициентов оптической связи и потерь. На основе результатов моделирования определено, что для амплитудного метода оптимальным является режим работы с равными значениями коэффициента оптической связи и коэффициента потерь, а при их расхождении резко падает чувствительность для области низких угловых скоростей. В фазовом методе нет таких

жестких требований к значениям коэффициентов. В этом случае рекомендуется использовать в гироскопе резонатор с коэффициентом потерь меньшим, чем коэффициент оптической связи.

Работа проводилась при поддержке гранта РФФИ №20-19-00460

ЛИТЕРАТУРА

1. Venediktov V.Yu., Filatov Yu.V., Shalymov E.V. Passive ring resonator micro-optical gyroscopes. *Quantum Electronics*. 2016. Vol. 46. № 5, P. 437–446
2. Филатов Ю. В. О перспективе создания микрооптического гироскопа. *Гироскопия и навигация*. 2006. 3(54), С. 41–50
3. C. Wu., Y. Lin, X. Jin, H. Ma, Z. Jin. Synchronous in-phase and quadrature demodulation technique for resonant micro-optic gyroscope. *Applied Optics*. 2019. Vol. 58. № 18. P. 5050–5056.
4. R. Zhang, C. Wang, H. Wang, X. Li, J. Li, M. Kong. Improving Locking Accuracy of Resonant Optical Gyroscope by Laser and Acoustooptic Frequency Shifter Jointed Pound-Drever-Hall Technique. *Fiber and Integrated Optics*. 2019. Vol. 39. № 1. P. 106–116.
5. Yu. Filatov, A. Gorelaya, A. Kukaev and others. Resonator micro-optical gyroscope with Mach-Zender modulator. *Emerging Technologies. Proc. SPIE*. 2019. Vol. 11163, P. 11163E.
6. Yu. Filatov, A. Kukaev, N. Nikolaeva, E. V. Shalymov, V. Yu. Venediktov. Method for measuring angular velocity using a passive ring resonator and a Mach-Zehnder modulator. *Optical Engineering*. 2020. Vol. 59. № 7. P. 074106.
7. T. M. Akhmadiev, Yu. V. Filatov, A. S. Kukaev, E. V. Shalymov, V. Yu. Venediktov. Simulation and investigation of the resonator gyro. *Proc. SPIE*. 2020. Vol. 11554, P. 115540N.

T.M. Akhmadiev (St.-Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, St.-Petersburg) **Influence of cavity parameters on the characteristics of resonant fiber optic gyroscope with Mach-Zehnder modulator.**

An analysis of the influence of the loss factor, the optical coupling coefficient on the limiting sensitivity and operating range of a passive ring resonator with a Mach-Zehnder modulator is given.

УДК 681.7

Д. Г. ГИЛЕВ

(Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермская научно-производственная приборостроительная компания, г. Пермь)

В. В. КРИШТОП

(Пермский государственный национальный исследовательский университет,
Пермская научно-производственная приборостроительная компания,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь)**МЕТОД АППРОКСИМАЦИИ РЕЗОНАНСНОГО ПИКА
ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ШУМА ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ***Представлено повышение чувствительности волоконно-оптического резонансного гироскопа до 1 град/с за счет применения аппроксимации резонансного пика функцией Лоренца для минимизации влияния шума на выходной сигнал.*

Введение. Оптические резонаторы находят применение в самых различных областях науки и техники: в лазерной технике для стабилизации частоты излучения [1], в спектроскопии для измерения концентрации различных веществ [2], в биофизике для определения наличия патогенов [3], для создания оптоэлектронных генераторов [4], для измерения угловой скорости технических систем [5-8].

В настоящее время в навигации применяются оптические гироскопы для измерения угловой скорости: кольцевой лазерный гироскоп (КЛГ) и волоконно-оптический гироскоп (ВОГ). Уменьшение размера таких гироскопов приводит к увеличению потерь и снижению чувствительности [9]. Существуют малогабаритные датчики угловой скорости (ДУС) и гироскопы на базе микроэлектромеханических систем (МЭМС), которые обладают рядом недостатков: высокая шумовая составляющая, высокая чувствительность к ускорению, ударам и вибрациям [10].

Пермская научно-производственная приборостроительная компания ведет разработку нового типа ДУС на волоконно-оптическом кольцевом резонаторе (ВОКР), который будет обладать меньшими весовыми и габаритными параметрами чем КЛГ и ВОГ, и будет более стойким к механическим воздействиям чем ДУС на основе МЭМС. Угловая скорость в разрабатываемом устройстве определяется по величине смещения частоты резонансного пика. Настоящая работа посвящена решению задачи корректного определения этой частоты за счет применения аппроксимации выходного сигнала функцией Лоренца, что позволило повысить чувствительность ДУС на основе ВОКР.

Описание чувствительной схемы на основе ВОКР. Волоконный резонатор состоит из двух сварных разветвителей, волоконные выходы которых соединяются между собой. Таким образом формируется замкнутый контур, в котором при прохождении оптического излучения появляются резонансы на определенных частотах излучения. ВОКР, изготовленный на одномодовом волокне, был изучен более подробно в работах [11, 12]. Измерение угловой скорости Ω в кольцевом резонаторе возможно благодаря эффекту Саньяка. Изменение оптического пути из-за вращения ведет к смещению резонансной частоты Δf_s между двумя противоположно распространяющимися волнами [9]:

$$\Delta f_s = \frac{2R}{n\lambda} \Omega,$$

где R – радиус резонатора, n – показатель преломления, λ – длина волны. Применение волоконно-оптического резонатора в качестве чувствительного элемента ДУС рассматривается в работах [13–15].

Нами разработана схема ДУС на ВОКР, с помощью которой была измерена чувствительность к угловой скорости. В оптической схеме применяется узкополосный лазер, который пере-страивается по частоте с определенной скоростью и два фотоприемника (ФП), на которых

наблюдается синхронный резонансный спектр во временной области. При наличии угловой скорости будет наблюдаться расхождение резонансов сигналов, проходящих по часовой стрелке I_1 и против часовой стрелки I_2 (рис. 1). По величине смещения Δt (соответствующей разнице частот Δf_s) между резонансами можно вычислить угловую скорость вращения. Проходя через ФП и аналогово-цифровой преобразователь, сигнал складывается с различными шумами, что влияет на форму резонансных пиков. Таким образом, чувствительность применяемой схемы зависит от корректного определения максимума резонансных пиков во временной области.

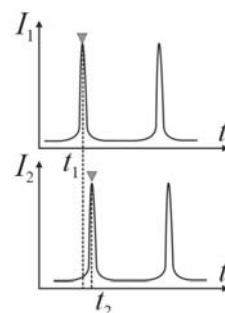


Рис. 1. Определение временной разницы Δt

Аппроксимация резонансного пика и определение чувствительности. Определение экстремума резонансной кривой по максимальному значению напряжения с ФП отличается на величину $\delta\tau$ от экстремума, определяемого с помощью аппроксимации функцией Лоренца (рис. 2), что приводит к неверному нахождению величины угловой скорости.

Для определения чувствительности схемы, ДУС размещается на поворотном столе. При больших угловых скоростях (более 50 град/с) смещение имеет линейную зависимость от угловой скорости как для поиска максимума без обработки, так и при методе с аппроксимацией. При малых угловых скоростях (от -10 град/с до +10 град/с) нет заметных изменений положения пиков без обработки, а для метода с аппроксимацией наблюдается линейная зависимость (рис. 3). Полученная с использованием метода аппроксимации функции Лоренца зависимость позволяет определять угловую скорость не хуже 1 град/с.

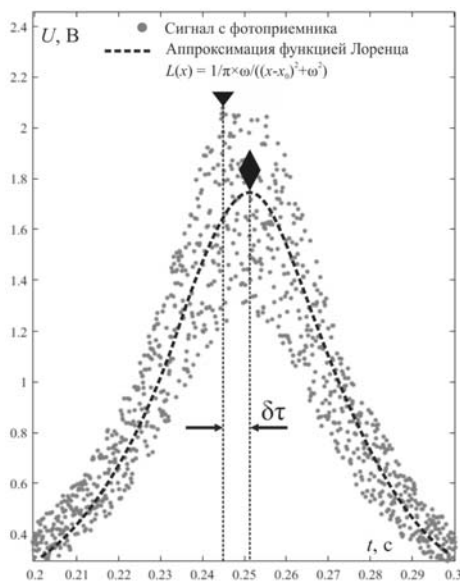


Рис. 2. Зашумленный резонансный пик и аппроксимация функцией Лоренца

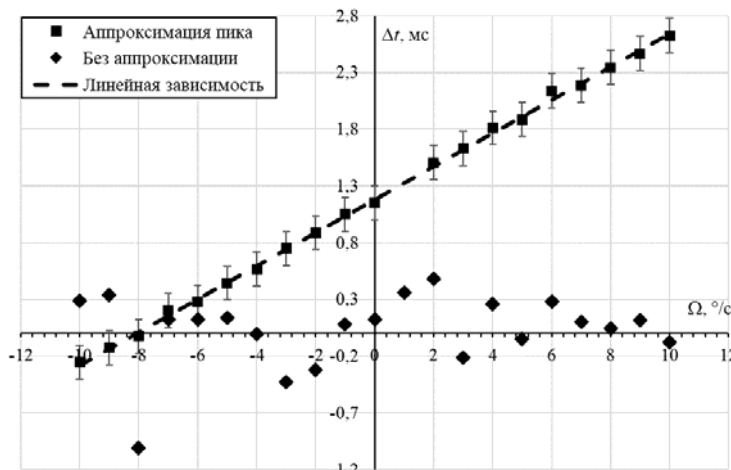


Рис. 3. Зависимость смещения резонансной частоты от угловой скорости вращения

Заключение. Скорость вращения в разрабатываемом ДУС определяется по величине смещения частоты резонансного пика и важно корректно определять экстремум резонансного пика. Правильное определение величины угловой скорости позволило повысить чувствительность ДУС на основе ВОКР. Авторам удалось применить метод аппроксимации резонансного пика функцией Лоренца, что позволило определять более корректное местоположение пика и улучшить чувствительность разрабатываемого ДУС до 1 град/с.

Данная работа выполнена в рамках Программы государственной поддержки компаний-лидеров, разрабатывающих и обеспечивающих внедрение продуктов, сервисов и платформенных решений преимущественно на основе технологий и решений для цифровой трансформации приоритетных отраслей экономики и социальной сферы (Договор № 2/549/2020 от 23.07.2020 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Drever R. W. P. et al. Laser phase and frequency stabilization using an optical resonator. *Applied Physics B*. 1983. Т. 31. №. 2. С. 97-105.
2. Ian Coddington, Nathan Newbury, and William Swann, "Dual-comb spectroscopy," *Optica* 3, 2016, p.414-426.
3. Abdul nasir, Yuaya Mikami, Rui yatabe, Hiroaki Yoshioka, Nilesh vasa, and Yuji Oki, Fully room temperature and label free biosensing based on an ink-jet printed polymer microdisk laser. *Opt. Mater. Express* 11, 2021, p.592-602.
4. Saleh K. et al. Optoelectronic oscillator based on fiber ring resonator: overall system optimization and phase noise reduction. 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings. IEEE, 2012. С. 1-6.
5. Гилев Д.Г., Журавлёв А.А., Москалёв Д.Н., Чувызгалов А.А., Криштоп В.В. Характеристики различных чувствительных элементов миниатюрного резонансного оптического гироскопа. *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 4.
6. Li J., Suh M. G., Vahala K. Microresonator Brillouin gyroscope. *Optica*. 2017. Т. 4. №. 3. С. 346-348.
7. Jingtong Geng, Liu Yang, Shuhua Zhao, and Yonggang Zhang, Resonant micro-optical gyro based on self-injection locking. *Opt. Express* 28, 2020, p.32907-32915.
8. Вьюжанина Е. А., Криштоп В. В. Дисктовые резонаторы для датчиков угловой скорости. Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. №. 9. С. 823-829.
9. Lefevre H. C. The fiber-optic gyroscope. Artech house, 2014.
10. Королёв М. Н. Исследование технических характеристик современных типов датчиков угловой скорости. 2019.
11. D.G. Gilev, P.M. Valiushina, V.A. Maksimenko, V.V. Krishtop, Determination of induced birefringence in fiber-optic resonator from frequency difference between main and additional resonance peaks. *Opt. Continuum* 3. 2022 (в печати).
12. П.М. Валюшина, Д.Г. Гилев. Модель волоконно-оптического резонатора из одномодового волокна с учетом эффекта двулучепреломления. *Фотон-Экспресс*. 2021. Т.6. №174. С.367-369.
13. Ma H. et al. Resonant micro-optic gyro using a short and high-finesse fiber ring resonator. *Optics letters*. 2015. Т. 40. №. 24. p. 5862-5865.
14. Feng L. et al. Suppression of frequency locking noise in resonator fiber optic gyro by differential detection method. *Optics & Laser Technology*. 2014. Т. 62. p. 109-114.
15. Zhi Y. et al. Compensation of scale factor nonlinearity in resonator fiber optic gyro. *Optical Engineering*. 2014. Т. 53. №. 12. p. 127108.

D.G. Gilev, (Perm State University, Perm Scientific-industrial Instrument Making Company, Perm), V.V.Krishtop (Perm State University, Perm Scientific-industrial Instrument Making Company, Perm National Research Polytechnic University, Perm). **“Resonance peak approximation method to minimize the noise of the angular velocity sensor”**

In connection with the development of a new type of angular velocity sensor based on a fiber-optic resonator, various optical circuits are being developed that will be sensitive to rotation. In this paper, we present an increase in the sensitivity of a fiber-optic resonant gyroscope to 1 % by applying a Lorentz approximation of the resonant peak to minimize the effect of noise on the output signal.

УДК 539.184.5

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН НЕСТАБИЛЬНОСТИ МАСШТАБНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО ГИРОСКОПА

Рассматривается характеристика изменения величины масштабного коэффициента ядерного магнитного гироскопа (ЯМГ) в зависимости от частоты его вращения. Проводится моделирование изменения масштабного коэффициента ЯМГ при изменении уровня шума в тракте цезиевого магнитометра.

Введение. Объектом исследования настоящей работы является одна из основных эксплуатационных характеристик ядерного магнитного гироскопа – нестабильность масштабного коэффициента. Принцип действия такого датчика заключается в определении скорости вращения основания по данным о значениях гиромангнитного отношения, индукции магнитного поля по наблюдаемой ларморовской частоте прецессии, регистрируемой у применяемого рабочего вещества [1–3]:

$$\Omega = B \cdot \gamma - \omega, \quad (1)$$

где Ω – скорость вращения основания; B – значение индукции магнитного поля; γ – гиромангнитное отношение; ω – наблюдаемая ларморовская частота прецессии.

Исходя из (1), точность работы гироскопа в высокой степени зависит от стабильности магнитного поля внутри ячейки с рабочим веществом (газом). Для уменьшения влияния внешних магнитных полей в качестве рабочего вещества применяется два изотопа ксенона [2], что приводит уравнение (1) к следующему виду:

$$\begin{aligned} \omega_a &= \gamma_a \cdot B + \Omega, \\ \omega_b &= \gamma_b \cdot B - \Omega, \end{aligned} \quad (2)$$

где ω_a – наблюдаемая ларморовская частота прецессии изотопа ксенона 129, ω_b – наблюдаемая ларморовская частота прецессии изотопа ксенона 131, γ_a – гиромангнитное отношение изотопа ксенона 129, γ_b – гиромангнитное отношение изотопа ксенона 131.

Из этого уравнения видно, что путём алгебраического исключения внешнего магнитного поля B можно определить величину Ω . При этом, сравнение суммарной частоты $\omega_a + \omega_b$, которая, при идеальной работе ЯМГ, не изменяться при вращении ЯМГ, производится с эталонной частотой от генератора. Это даёт возможность осуществить стабилизацию магнитного поля внутри гироскопа путем применения сигналов обратной связи подаваемых на магнитную катушку ЯМГ, создающую магнитное поле с индукцией B [4,5]

$$\omega_+ = \omega_a + \omega_b = (\gamma_a + \gamma_b) \cdot B. \quad (3)$$

Поскольку для функционирования ЯМГ необходимо наличие петли обратной связи, на которую подаётся значения частоты прецессии ω_+ , для возбуждения атомов ксенона с помощью магнитного поля, то, согласно теории автоматического управления [6, 7], то её наличие отражается на качестве работы системы. Согласно [8], масштабный коэффициент ЯМГ изменяется в зависимости от частоты вращения основания, вследствие не идеальности реализации цепи обратной связи. На низких частотах масштабный коэффициент ЯМГ равен:

$$M_k = \frac{g - \omega(i + \tau\omega)}{g + (\Gamma_2 - i\omega)(1 - i\tau\omega)}; \text{ где } \Gamma_2 = \frac{1}{T_2}, \quad (4)$$

где g – коэффициент усиления в петле обратной связи; ω – наблюдаемая частота прецессии; i – мнимая единица; τ – постоянная времени интегрирования в петле обратной связи ЯМГ; T_2 – продольное время релаксации изотопа ксенона (время жизни).

M_k приближается к единице на высоких частотах, как показано на рис. 1. Важно отметить что рис. 1 лишь демонстрирует общий характер изменения масштабного коэффициента от частоты вращения основания. Точный расчёт масштабного коэффициента производится с применением формулы (4).

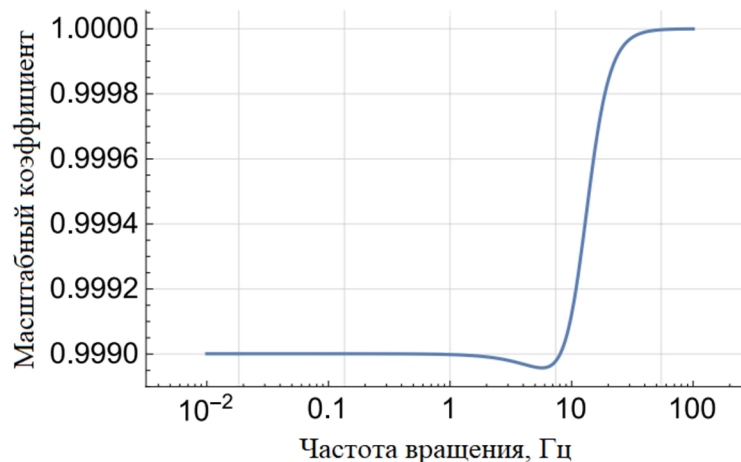


Рис. 1. График зависимости масштабного коэффициента от частоты вращения основания [8]

Очевидно, что для точного определения скорости вращения основания, крайне важно знать значение масштабного коэффициента в текущий момент времени. Как было показано выше, на масштабный коэффициент влияет частота (угловая скорость) вращения основания, но также на него, согласно [6], влияет зашумлённость в канале цезиевого магнитометра, используемого для выделения сигналов прецессии изотопов ксенона [9]. Она может быть вызвана различными факторами связанными как с лазером настроенным на длину волны цезия, так и фотоприёмником считывающего изменения светового потока испускаемого лазером и проходящего через ячейку.

На Рис.1 показана теоретическая зависимость величины масштабного коэффициента от изменения частоты вращения основания. Однако, в ходе работ на макете квантового датчика угловой скорости [9] в условиях вращающегося основания были получены результаты, говорящие о значительно более сильной зависимости величины масштабного коэффициента от частоты.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование зависимости масштабного коэффициента ЯМГ от характеристик зашумлённости тракта цезиевого магнитометра в условиях изменения частоты вращения основания.

Моделирование цепи обратной связи ЯМГ. Для исследования зависимости масштабного коэффициента ЯМГ от степени зашумлённости цезиевого магнитометра была построена модель, учитывающая характеристики реального макета квантового датчика угловой скорости. Эта модель, схематичное изображение которой представлено на рис. 2, позволяет проводить моделирование работы ЯМГ и измерение его масштабного коэффициента в зависимости от амплитуды шумов цезиевого магнитометра, при имитации вращения основания [6, 9, 10], на котором установлен ЯМГ.

Модель состоит из нескольких блоков: блок решения уравнений Блоха [9] - отвечающий за имитацию процессов, происходящих в ячейке ЯМГ; фильтры Баттерворта – выделяющие сигналы прецессии с разными фазами (0 и 90); блок «Шум цезиевого магнитометра» имитирующий белый шум, с нормальным распределением, в канала цезиевого магнитометра; блок автоматической регулировки усиления – поддерживающий уровень сигнала на заданном уровне; блок расчёта масштабного коэффициента.

Для исследования влияния шумов цезиевого магнитометра, на вход модели подавался сигнал, имитирующий вращение основания с постоянной частотой 28,4 Гц. В момент времени 20 с после начала моделирования, частота одномоментно была увеличена на 1 Гц. В результате величина масштабного коэффициента ЯМГ, при отсутствии шумов цезиевого магнитометра, изменилась на 0,00182. График переходного процесса представлен на рис. 3.



Рис. 2. Схема модели ЯМГ, реализованная в программе MATLAB Simulink, АРУ – автоматическая регулировка усиления

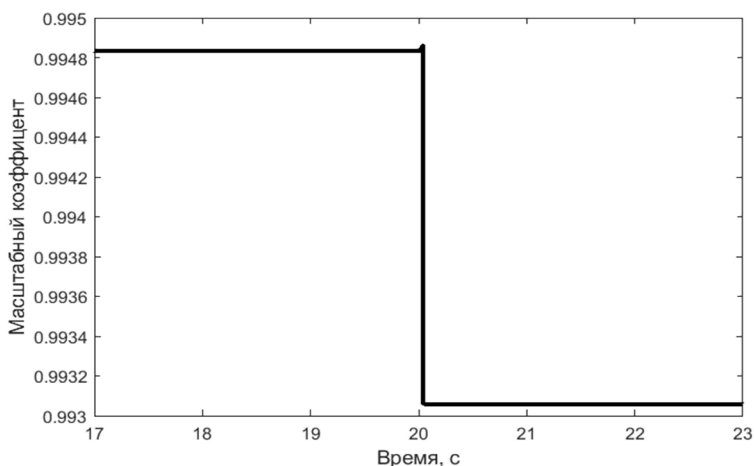


Рис. 3. Результаты моделирования масштабного коэффициента при изменении частоты вращения основания в момент времени 20 с

Как можно заметить из графика рис. 3, после переходного процесса, установившееся значение масштабного коэффициента изменилось в соответствии с теоретическими выводами, изложенными в [8], на основании формулы (4).

Результаты моделирования цепи обратной связи при учете шумов магнитометра. В следующей части работы было проведено исследование влияния интенсивности шума в тракте цезиевого магнитометра на значение масштабного коэффициента с использованием модели показанной на рис. 2. Методом математического моделирования была получена зависимость изменения масштабного коэффициента $\Delta M = M_2 - M_1$, где M_1 – значение масштабного коэффициента до изменения частоты вращения основания; M_2 - значение масштабного коэффициента после изменения частоты вращения основания на 1 Гц, от уровня шума S в тракте цезиевого магнитометра. Результаты приведены в таблице 1.

Таким образом можно продемонстрировать отношение полезного сигнала, ΔM к шуму.

Таблица 1

Зависимость отношения величины на которую изменяется масштабный коэффициент ΔM и шума масштабного коэффициента от амплитуды шума, S в тракте цезиевого магнитометра

S, мВ	1,278E-10	1,278E-09	9,278E-09	6,278E-08	6,278E-07	6,28E-06
$\Delta M/\text{шум, \%}$	327,1	297,3	213,2	112,7	41,1	14,6

Как можно заметить из таблицы, при уровне шума, более 6.278e-08 мВ, в канале цезиевого магнитометра, отношение величины изменения масштабного коэффициента к шуму, стано-

виться близок к 1, что усложняет его измерение и приводит к увеличению погрешности измерения скорости вращения основания вплоть до 1 Гц. Очевидно, что выявленная зависимость накладывает определённые ограничения на допустимый уровень шума в канале цезиевого магнитометра. Важно отметить, что минимальный возможный шум в канале цезиевого магнитометра связан с дробовым шумом фотодетектора и составляет $1.0583e-11$ мВ [2].

Выводы. В работе рассмотрено влияние частоты вращения основания гироскопа на его масштабный коэффициент. Путем моделирования, показано, что разработанная модель зависимости изменения масштабного коэффициента ядерного магнитного гироскопа от уровня шума в тракте цезиевого магнитометра соответствует теоритическим зависимостям и учитывает экспериментально полученные характеристики датчика. Показано, что при уровне шума равного $6,278e-07$ мВ, отношение величины, на которую изменяется масштабный коэффициент и шума масштабного коэффициента достигает 41,1 %, что оказывает значительное влияние на точностные характеристики такого датчика

В дальнейшем планируется рассмотреть зависимость нестабильности масштабного коэффициента от характеристик других элементов ядерного магнитного гироскопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Пешехонов В.Г.** Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2020. Том 28. №2 (109). С. 3-10. DOI 10.17285/0869-7035.0028
2. **Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалёв А.С., Пешехонов В.Г.** Гироскоп на ядерно-магнитном резонансе: предельные характеристики. //Гироскопия и навигация. Том 26, №1 (100), 2018. С. 55-80.
3. **Бородин П.М., Володичева М.И., Москалев В.В., Морозов А.А. и др.; по ред. Бородина П.М.** Ядерный магнитный резонанс. Издательство Ленинградского университета, 1982. 344 с.
4. **Е. N. Popov, K. A. Barantsev, A. N. Litvinov,** Kvantovaya Elektronika, 2019, Volume 49, Number 2, 169–177
5. **Ding, M.** Development and prospect of quantum sensing technology // Материалы XX конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием / Науч. Редактор: д.т.н. проф. О.А. Степанов / Под общ. ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2018. 443 с.
6. **Безмен Г.В.** Шевченко А.Н. The choice of criteria and methods of quality assessing for the angle sensor based on the effect of nuclear magnetic resonance сборник Мультиконференции для публикации в журнал Journal of Physics: Conference Series 2021г.
7. **Гурарий М. М., Русаков С. Г., Ульянов С. Л.** Разработка методов анализа режима взаимной синхронизации автогенераторов в интегральных схемах //Проблемы разработки перспективных микро-и нанoeлектронных систем (МЭС). – 2010. – №. 1. – С. 138-143.
8. **T.G. Walker, M.S. Larsen,** Spin-Exchange-Pumped NMR Gyros Advances In Atomic, Molecular, and Optical Physics, Academic Press, Volume 65, 2016, Pages 373-401,
9. **Г. В. Безмен, А. Н. Шевченко, П. Н. Костин, А. Н. Берзейтис, В. С. Безмен, В. И. Петров.** Система двухчастотной генерации в схеме датчика угловой скорости // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №1. С. 19-30. DOI 10.17285/0869-7035.0020
10. **Лёше А.** Ядерная индукция. М.: Издательство иностранной литературы, 1963. 683 с.

V.V. Chalkov, A.N. Shevchenko (State Research Center Concern CSRI Elektropribor, St. Petersburg). **Studying the Reasons of Scale Factor Instability of Nuclear Resonance Gyro**

The paper studies the dependency of NMR gyro scale factor on the rotation rate. The variation of the gyro scale factor is simulated under varying noise in the path of the cesium magnetometer.

УДК 681.78

А. С. ЗАВИТАЕВ

(Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург)

АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ ЯДЕРНОГО МАГНИТНОГО ГИРОСКОПА ПРИ МЕХАНИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

В докладе рассматривается влияние смещений и деформаций элементов конструкции ядерного магнитного гироскопа на его погрешности при работе прибора. Исследовано влияния деформаций на изменение магнитного поля в ячейке и на изменение мощности излучения накачки и детектирования.

Введение. Ядерный магнитный гироскоп (ЯМГ) – квантовый датчик, чувствительным элементом которого является ансамбль ориентированных атомных ядер, обладающий макроскопическим магнитным моментом. Принцип действия ЯМГ основан на зависимости частоты прецессии магнитного момента ядер в постоянном магнитном поле от угловой скорости вращения гироскопа [1–3].

ЯМГ проектируется для использования на высокдинамичных объектах, которые подвергаются ударным и вибрационным воздействиям. Поэтому, вопрос исследования влияния этих механических воздействий на погрешности датчика, актуален. Исходя из этого, целью работы является анализ источников погрешностей ЯМГ при механических воздействиях.

Расчетная модель. В качестве источников погрешностей рассматривались деформации и смещения элементов конструкции. С целью их анализа была построена конечно-элементная модель ЯМГ (рисунок 1, а) в САПР системе ProEngineer. В качестве допущения, не влияющего на точность будущих расчетов, из модели были исключены фаски, скругления, крепёжные элементы [4].

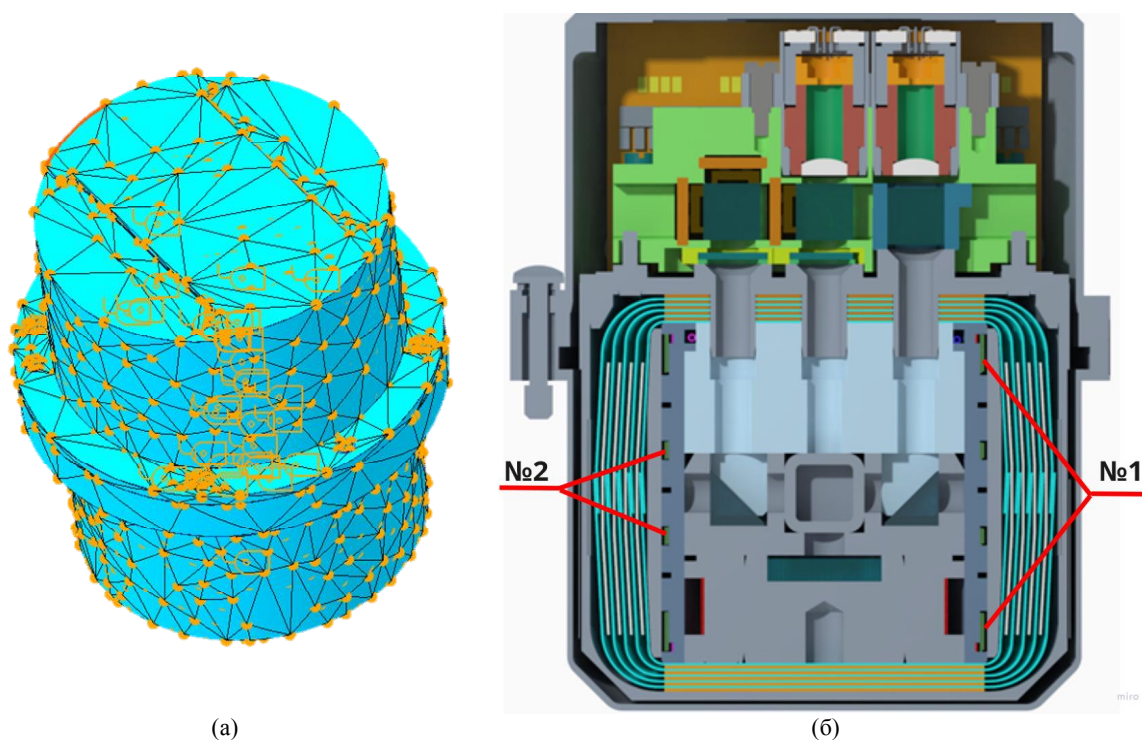


Рис. 1 Сетка ЯМГ (а) и сечение прибора (б), №1 – группа малых катушек, №2 – группа больших катушек

В результате моделирования были получены следующие резонансные частоты: 1229, 2265, 2519, 2857 и 2978 Гц.

Исследование смещений элементов. Основным параметром, влияющим на точность работы гироскопа, является степень ориентируемости ядер активного вещества в ячейке [5, 6]. Степень ориентируемости зависит от стабильности таких параметров, как мощность излучения накачки, температура, давление газов в ячейке, градиент магнитного поля. Исходя из этого факта, проводилось исследование деформаций и смещений конструкции. В результате проведения моделирования вибрационного воздействия с амплитудой равной 20 g в диапазоне частот от 0 до 2000 Гц выявлены деформации и смещения следующих компонентов:

- лазера оптической накачки
- лазера детектирования
- кольцевых магнитных катушек
- магнитных экранов.

Влияние смещений и деформаций на предельную чувствительность. При деформациях и горизонтальных смещениях катушек изменяется направление магнитного поля, определяющее ось чувствительности прибора. При вертикальных смещениях - направление магнитного поля не изменяется, однако внутри ячейки возникает градиент магнитного поля.

В результате вибрационного воздействия смещение больших катушек (группа №1 на рисунке 1б) составило 0,013 мм. Из-за этого смещения градиент магнитного поля в ячейке увеличивается на 27 нТл. В предыдущих работах [7] исследовалась влияние изменения магнитного поля на предельную чувствительность. Опираясь на эти результаты можно сделать вывод, что вибрационное воздействие приводит к ухудшению предельной чувствительности на 22%. Смещение малых катушек составило 0,013 мм (группа №2 на рисунке 1б). Такое смещение приводит к увеличению градиента магнитного поля на 37 нТл, что вызывает ухудшение предельной чувствительности на 31%.

Смещение экранов составило 0,017 мм, что приводит к увеличению градиента на 26 нТл и ухудшению предельной чувствительности на 21%.

При смещениях лазера накачки уменьшается количество ориентированных атомов цезия, что влияет на поляризацию ксенона. Смещение лазера детектирования приводит к изменению количества «опрашиваемых» атомов ксенона [6]. Оба этих изменения приводят к снижению предельной чувствительности гироскопа. В рамках моделирования внешних воздействий на ЯМГ, было зафиксировано максимальное поступательное смещение лазера накачки на 0,02 мм, приводящее к ухудшению предельной чувствительности на 1,5%. При максимальном поступательном смещении лазера детектирования на ту же величину (0,02 мм) – на 2,3%.

Заключение. В ходе работы были исследованы источники погрешностей ЯМГ при механических воздействиях. Так же рассмотрены влияния на предельную чувствительность смещений и деформаций следующих элементов:

- лазера оптической накачки
- лазера детектирования
- кольцевых магнитных катушек
- магнитных экранов.

В результате их влияния на магнитное поле ячейки и изменения мощностей излучений накачки и детектирования выявлено, что наибольшее изменение предельной чувствительности вызывает вертикальное смещение малых катушек. При смещении в результате вибрационного воздействия предельная чувствительность ухудшается на 31%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевченко А.Н., Захарова Е.А. Исследование зависимости качества резонанса от распределения цезия в ячейке квантового датчика вращения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 4. С. 567–573. doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573
2. Литманович Ю.А., Вершовский А.К., Пешехонов В.Г. Гироскоп на основе явления ядерного магнитного резонанса: прошлое, настоящее, будущее // Материалы пленарного заседания 7-й Российской мультиконференции по проблемам управления ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2014. – С. 35–42.
3. Larsen M., Bulatowicz M. Nuclear magnetic resonance gyroscope: for DARPA's micro-technology for positioning, navigation and timing program // Proc. IEEE Int. FrequencyControl Symposium, 2012. doi: 10.1109/fcs.2012.6243606

4. **Аванесов Ю.Л., Буканова А.Н., Воронов А.С., Евстифеев М.И.** Оптимизация конструктивных параметров глубоководного индукционного датчика скорости // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 1. С. 140–146. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-1-140-146
5. **Александров, Е.Б., Константинов, О.В., Перель, В.И.** Оптическая ориентация атомов в магнитном поле, перпендикулярном лучу, ЖЭТФ, 1965, т. 49, № 1 (7), с.97-106.
6. **А.К. Вершовский, Ю.А. Литманович, А.С. Пазгалев, В.Г. Пешехонов.** Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. №1. С. 55-80. DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080
7. Evstifeev M.I., Zavitaev A.S. Estimation of the nuclear magnetic gyroscope sensitivity to inertial influences // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering - 2022, Vol. 1215, No. 012014, pp. 1-8

М. В. СТЕПЧЕНКО, И. Ю. ВОЛОШИН
(АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Гатчина)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПУТЕЙ СОЗДАНИЯ МАЯТНИКОВЫХ АКСЕЛЕРОМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ МИКРООБРАБОТКИ КРЕМНИЯ

Рассматривается опыт некоторых приборостроительных предприятий по разработке малогабаритных акселерометров. Подчеркивается возможность производства таких акселерометров в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», благодаря наличию собственного микромеханического производства.

Введение. Успех решения навигационной задачи подвижных объектов в значительной степени зависит от характеристик инерциальных модулей, в состав которых входят акселерометры – датчики, предназначенные для измерения линейных ускорений объекта. Чувствительный элемент (ЧЭ) большинства акселерометров состоит из инерционной массы, установленной в корпусе на элементах подвеса, который может основываться на различных физических принципах. В ряде современных приборов применяются ЧЭ, выполненные по технологии микрообработки кремния.

Перспективы приборостроения связаны с созданием подобных приборов, обладающих вдобавок малыми энергопотреблением и себестоимостью. Сферы применения начинаются от потребительской электроники до изделий военного и космического назначения. В последних востребованы акселерометры, характеризующиеся повышенной точностью и надежностью (уровня «High-End»). В АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» выпускаются высокоточные акселерометры, однако, они не всегда соответствуют требованиям по массогабаритным и эксплуатационным характеристикам. Например, для небольших объектов типа автономных необитаемых подводных и беспилотных летательных аппаратов рационально применение датчиков, которые существенно дешевле, менее требовательны к точности и занимают меньший объём. Это делает актуальным освоение предприятием выпуска акселерометров средней точности.

Целью работы является обзор достижений предприятий и фирм по разработке и производству малогабаритных акселерометров, на основе которого можно оценить доступность описанных компаниями решений для АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Обзор рынка и выбор направления разработки. Далее рассмотрены образцы маятниковых акселерометров, содержащие кварцевый, либо кремниевый маятник ЧЭ, на примерах нескольких отечественных и зарубежных предприятий. Кварцевые маятники ЧЭ акселерометров изготавливаются методом механической обработки, кремниевые маятники ЧЭ – обычно, путем химического травления (применяется метод анизотропного травления кремния). Первые изготавливаются штучно, вторые – групповыми методами (одновременно изготавливаются несколько сотен на одной кремниевой пластине) [1, 2]. Соответственно, вторая технология сильно удешевляет стоимость изделия. На рисунке 1 представлен график отличий параметров акселерометров по чувствительности и стабильности масштабного коэффициента. Видно, что различные особенности кремния и кварца в итоге сводят конечный прибор преимущественно к схожим классам точности, менее точным чем поплавковые акселерометры, но превосходящий их по массогабаритным и эксплуатационным характеристикам. Ряд сведений из опубликованных отчетов по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам, тезисов из научно-технических журналов [8] говорит о продолжении работ по улучшению характеристик датчиков, произведенных по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС). Однако, пока их точность не достигла уровня навигационного класса точности. Поплавковые и МЭМС акселерометры в обзоре не рассматриваются и приведены для справок.

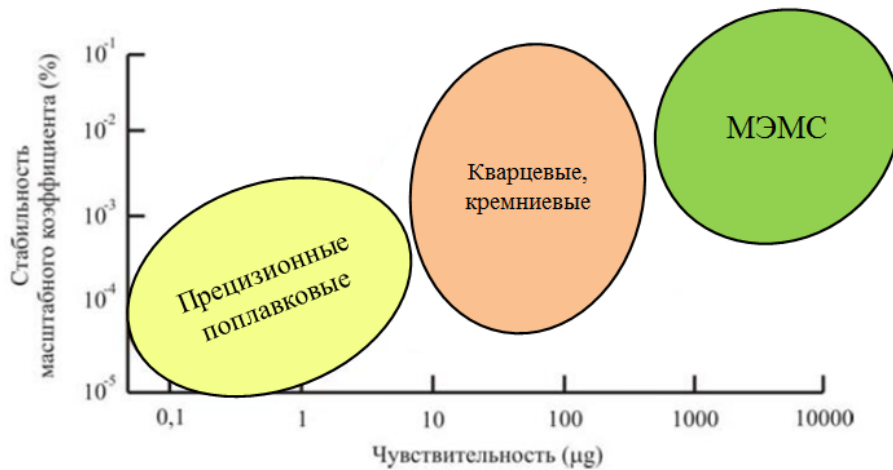


Рис. 1. Сравнения типов акселерометров по двум рабочим показателям [3]

Конструктивная схема маятниковых акселерометров, как с маятником, изготовленным из кремния, так и с маятником, изготовленным из кварца, схожа с конструкцией, опубликованной в патенте US3702073 [6, 7].

Среди акселерометров с ЧЭ содержащим маятник из кремния можно отметить акселерометры компании ПАО АНПП «Темп-Авиа». Компания обладает многолетним опытом в работах по микрообработке кремния. Для изготовления маятника ЧЭ используются материалы, оборудование и техпроцессы, применяемые в микроэлектронике при производстве полупроводниковых приборов и микросхем. Этим предприятием изготовлен компенсационный малогабаритный акселерометр, с диапазоном измерения от ± 1 до ± 10 g [4].

Другим предприятием, выпускающим одноосные маятниковые акселерометры компенсационного типа с ЧЭ из кремния, является ОАО «РПКБ». Акселерометры на предприятии всегда строились по единой схеме одноосного маятникового компенсационного акселерометра. Большая подготовительная работа коллектива в освоении новых технологий привела к созданию целого ряда прецизионных кремниевых акселерометров для систем инерциальной навигации с диапазоном измерений ± 12 g [5].

Среди акселерометров с ЧЭ содержащим маятник из кварца можно отметить акселерометры компаний ФГУП «НПЦАП «ПО «Корпус» и АО «Серпуховской завод «Металлист». Данные акселерометры имеют преимущество в плане большей устойчивости к погрешностям от температуры.

Из зарубежных примеров стоит обратить внимание на фирмы «Honeywell» и «InnaLabs». Фирма «Honeywell» в сфере приборов навигации – широко известный разработчик датчиков и систем класса «High-End». За свою историю она разработала ряд устройств и технологий, которые подтверждены патентами. В области выпуска маятниковых компенсационных акселерометров у «Honeywell» «флагманом» является кварцевый датчик QA-3000, который реализован в различных производственных классах для расширения сферы применения прибора. Представляемая фирмой «InnaLabs» линейка кварцевых акселерометров реализуется с широким выбором параметров: от потребительского класса точности до навигационного.

Изображения некоторых описанных выше акселерометров представлены на рисунке 2:

1. Акселерометр от «Темп-Авиа»,
2. Вариант изготовления кремниевого ЧЭ с помощью групповой объемной микрообработки,
3. Акселерометр от «InnaLabs»,
4. Акселерометр от ПО «Корпус»,
5. Вариант изготовления кварцевого ЧЭ с помощью групповой объемной микрообработки,
6. Акселерометр от «Honeywell».

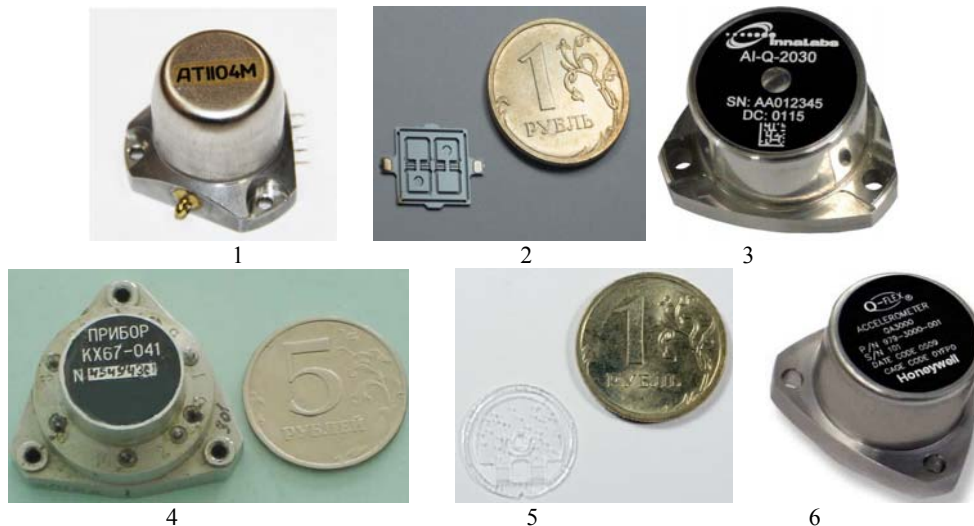


Рис. 2. Примеры маятниковых малогабаритных акселерометров и их чувствительных элементов

Результаты сравнения российских и зарубежных акселерометров по классам точности приведены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение акселерометров по классам точности

Класс точности	Тип акселерометра	Материал маятника
$10^{-3} \dots 10^{-4} \text{ м/с}^2$	Маятниковый иностранного производства (QA 3000, «Honeywell»)	Кварц
	Маятниковые российского производства (АК-15, АО «Серпуховский завод Металлист», ПО «Корпус»)	
$10^{-2} \dots 10^{-3} \text{ м/с}^2$	Маятниковый иностранного производства (AI-Q-2030 «InnaLabs»)	Кремний
	Маятниковые российского производства (АТ 1104, ПАО «АНПП «Темп-Авиа»; А-16, ОАО «РПКБ»)	

Из представленных в таблице 1 данных видно, что, в перспективе, малогабаритные акселерометры с маятниками, изготовленными по технологии микрообработки кремния, могут быть сравнимы по характеристикам с кварцевыми акселерометрами и отнесены к акселерометрам средней точности навигационного класса.

Проведенный обзор рынка акселерометров показывает, что, располагая накопленным опытом в изготовлении и эксплуатации акселерометров, базирующихся на разных физических принципах, технологическими ресурсами собственного микромеханического производства для создания маятников ЧЭ из кремния, у АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» есть возможность проектирования акселерометров средней навигационной точности.

Заключение. Выполнен обзор достижений предприятий и фирм по разработке и производству малогабаритных акселерометров. На основе обзора подчёркивается принципиальная возможность создания в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» малогабаритных акселерометров, благодаря имеющимся средствам промышленного производства МЭМС датчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ветрова Е. В., Смирнов И. П., Козлов Д. В., Запетляев В. М. Особенности создания чувствительных элементов кремниевых и кварцевых маятниковых акселерометров // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2017, т. 4, вып. 2. 95–102 с.

2. **Голяев Ю.Д., Колбас Ю.Ю., Коновалов С.Ф., Соловьева Т.И., Томилин А.В.** Критерии выбора акселерометров для инерциального измерительного блока // ОАО «НИИ «Полюс» им. М.Ф. Стельмаха; МГТУ им. Н.Э.Баумана; МИЭМ НИУ ВШЭ. 8 с.
3. **Копысов О. Э.** Лекция №11. Тема: микромеханические гироскопы и акселерометры. Кафедра 301. СУЛА. 15 с.
4. **Былинкин С.Ф., Комаров Н.А., Лосев В.В.** Акселерометры серии АТ, разрабатываемые и выпускаемые ОАО АНПП «Темп-Авиа». Известия ТулГУ. Технические науки. 2012. Вып. 7. - 305-321 с.
5. **Будкин В.Л., Паршин В.А., Прозоров С.В., Саломатин А. К., Соловьев В. М.** Инерциальные датчики для систем навигации и ориентации ОАО Раменское приборостроительное конструкторское бюро (РПКБ), г. Раменское, Московская область.
6. **Нахов С. Ф., Калихман Д. М, Калихман Л. Я, Депутатова Е. А., Скоробогатов В. В., А. Ю. Николаенко.** Опыт проектирования и изготовления блоков измерителей линейного ускорения на кварцевых маятниковых акселерометрах с аналоговой и цифровой системами управления: монография; под ред. С. Ф. Нахова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2021. 240 с.
7. **Earl D. Jacobs, Tustin, Calif.** United States Patent from Sundstrand Data Control, Inc. [Электронный ресурс]. URL: <https://patents.google.com/patent/US3702073> (дата обращения: 01.02.2022).
8. Международный форум «Микроэлектроника-2020». Сборник тезисов. 2020. – 708 с.

Ч. И. НГУЕН, К. Х. НГУЕН, А. В. БОЛЬШАКОВА
(СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт Петербург)

АЛГОРИТМ КАЛИБРОВКИ МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

Рассматривается алгоритм уточнения калибровочных коэффициентов для датчиков инерциальной системы, основанный на применении метода наименьших квадратов. Приводятся результаты апробации предложенного алгоритма.

Введение. Несмотря на такие преимущества, как автономность, непрерывная и высокоскоростная выработка информации и помехозащищенность, бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС) имеет основной недостаток – накопление погрешностей с течением времени, получаемое при интегрировании. Это обусловлено погрешностью (дрейфом) инерциальных чувствительных элементов и ошибкой ввода начальных условий [1, 2]. Поэтому, для использования БИНС на основе микроэлектромеханических (МЭМС) датчиков, точность которых обычно не высока, в задачах навигации и ориентации движущихся объектов необходимо осуществлять высокоточную калибровку инерциальных датчиков.

В качестве систематических погрешностей МЭМС инерциальных датчиков выделяют ошибки смещения нуля, масштабного коэффициента и неортогональности осей чувствительности. Для снижения систематических ошибок используется простой шестипозиционный метод лабораторной калибровки [3, 4]. Не смотря на простоту основным недостатком этого является требование к высокой точности задания углов ориентации платформы стенда, используемого для калибровки. Для устранения этого недостатка в работах [5, 6] были рассмотрены модифицированные многопозиционные методы на основе метода наименьших квадратов (МНК), но использованные там алгоритмы решения уравнения нелинейной функции ошибки достаточно сложны.

Предлагаемый доклад посвящен алгоритму линеаризации нелинейной функции ошибки при использовании МНК для выполнения калибровки МЭМС датчиков. В качестве примера выполняется калибровка МЭМС акселерометров. Для калибровки гироскопов процедура будет аналогична, за исключением того, что понадобится задавать угловую скорость вращения.

Предложенное решение. Для построения модели используется система $OXYZ$ в качестве опорной системы координат, связанной с корпусом прибора. Пусть положение оси X_a акселерометра точно известно, а углы неортогональности осей Y_a и Z_a относительно оси X можно считать малыми (рис. 1). Тогда приемлемую модель для сигналов, получаемых от МЭМС акселерометров, можно представить в следующем виде [5]:

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \Delta K_{ax} & 0 & 0 \\ \theta_{ayx} & 1 + \Delta K_{ay} & 0 \\ \theta_{azx} & \theta_{azy} & 1 + \Delta K_{az} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{ax} \\ b_{ay} \\ b_{az} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где: A_x, A_y, A_z – показания акселерометра по соответствующим осям в векторной форме; a_x, a_y, a_z – истинные значения ускорения по осям; $\Delta K_{ax}, \Delta K_{ay}, \Delta K_{az}$ – погрешности масштабных коэффициентов; $\theta_{ayx}, \theta_{azx}, \theta_{azy}$ – углы неортогональности осей; b_{ax}, b_{ay}, b_{az} – смещения нуля.

Из уравнения (1) можно выразить истинные значения ускорения формулой:

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ c_2 & c_3 & 0 \\ c_4 & c_5 & c_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{A}_x \\ \widehat{A}_y \\ \widehat{A}_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

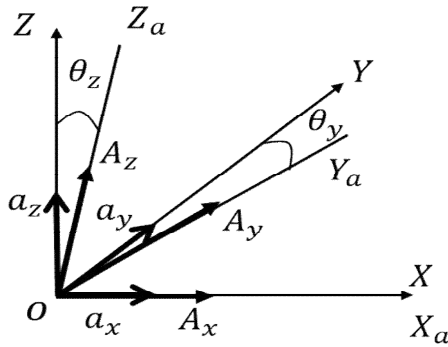
где: $[\widehat{A}_x \widehat{A}_y \widehat{A}_z]^T = [A_x - b_{ax} \ A_y - b_{ay} \ A_z - b_{az}]^T$;

$$\begin{bmatrix} c_1 & 0 & 0 \\ c_2 & c_3 & 0 \\ c_4 & c_5 & c_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \Delta K_{ax} & 0 & 0 \\ \theta_{ayx} & 1 + \Delta K_{ay} & 0 \\ \theta_{azx} & \theta_{azy} & 1 + \Delta K_{az} \end{bmatrix}^{-1}. \quad (3)$$

Известно, что в статике при любом угле ориентации датчиков, сумма квадратов элементов a_x, a_y, a_z должна быть равна квадрату гравитационного ускорения g .

На основе параметров $c_j, j = 1 \dots 6, \widehat{A}_x, \widehat{A}_y, \widehat{A}_z$ для N измерений определяется функция ошибки, имеющая форму:

$$I = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [((a)_{xi}^2 + a_{yi}^2 + a_{zi}^2 - g^2)^2]. \quad (4)$$



на акселерометром до и после калибровки

Суть метода МНК заключается в нахождении набора параметров $c_j, j = 1 \dots 6, \widehat{A}_x, \widehat{A}_y, \widehat{A}_z$ для того, чтобы значение функции I стало минимальным. Так как функция I нелинейно зависит от этих параметров, то для выполнения метода МНК авторами предлагается двухэтапный алгоритм расчета, обеспечивающий линеаризацию: на первом этапе вычисляются значения смещения нуля методом МНК, считая, что влияние смещения нуля много больше, чем влияния масштабных коэффициентов, т.е.

$$[(A)_x - b_{ax}]^2 + [(A)_y - b_{ay}]^2 + [(A)_z - b_{az}]^2 \cong g^2, \text{ после}$$

этого можно определить значения $\widehat{A}_x, \widehat{A}_y, \widehat{A}_z$; во втором этапе, поставив полученные значения $\widehat{A}_x, \widehat{A}_y, \widehat{A}_z$ в уравнение (2), вычисляются коэффициенты $c_j, j = 1 \dots 6$, путем решения системы уравнений $\frac{\partial I}{\partial c_j} = 0, j = 1 \dots 6$, сводящейся к линейной зависимости вида:

$$Y = M * X, \quad (5)$$

где: M – матрица 6×6 элементов, зависящих только от средних значений $\widehat{A}_x, \widehat{A}_y, \widehat{A}_z$; Y – вектор 6×1 элементов, зависящих только от средних значений $\widehat{A}_x, \widehat{A}_y, \widehat{A}_z$ и g ; X – вектор 6×1 элементов,

зависящих только от значений $c_j, j = 1 \dots 6$.

Из уравнения (5) вычисляется вектор $X = M^{-1} * Y$, т.е. значения коэффициентов $c_j, j = 1 \dots 6$. Зная эти параметры, можно оценить истинные значения ускорения a_x, a_y, a_z , исходя из уравнения (2). На основе уравнения (3) можно определить погрешность масштабных коэффициентов $\Delta K_{ax}, \Delta K_{ay}, \Delta K_{az}$ и углы неортогональности $\theta_{ayx}, \theta_{azx}, \theta_{azy}$.

Эксперимент и результаты. Предложенный метод был использован для калибровки акселерометра, входящего в инерциальный измерительный модуль марки MPU-6050. Для калибровки были измерены проекции гравитационного ускорения на оси чувствительности акселерометра при изме-



Рис. 2. Погрешности определения угла накло-

нении ориентации модуля. Съем данных производился в 64 различных произвольных угловых положениях относительно географической системы координат в течение 12 секунд [7]. После калибровки получен набор смещений нуля, масштабных коэффициентов и углов неортогональности осей чувствительности. Сигналы акселерометра до и после калибровки были использованы для определения угла наклона платформы двухосного стенда с шагом 30 градусов. После сравнения этих результатов с показаниями задающего наклон стенда получены значения погрешности определения угла наклона, показанные в таблице 1 и на рис. 2. На основе полученных результатов было отмечено, что погрешность определения угла наклона существенно снижена после калибровки (до величины порядка 1 градуса). Этими результатами подтверждается эффективность предложенного метода калибровки.

Таблица 1

Погрешность определения угла наклона платформы акселерометром до и после калибровки

Угол наклона платформы (градус)	Погрешность определения угла акселерометром наклона до калибровки (градус)	Погрешность определения угла акселерометром наклона после калибровки (градус)
0	-0,006	-0,006
30	-0,315	0,021
60	-2,215	0,000
90	-4,990	0,011
119	-8,006	0,000
150	-10,362	0,000
180	-11,089	0,000
209	-10,105	0,000
239	-8,664	-0,782
269	-5,208	0,000
299	-2,826	0,000
329	-1,195	-0,221
360	0,000	-0,010

Заключение. В работе был предложен алгоритм калибровки МЭМС инерциальных датчиков, с помощью которого можно достичь повышения точности калибровки без использования высокоточных стендов. Апробация метода подтверждает его эффективность. Результаты работы значимы для повышения точности БИНС на основе МЭМС инерциальных датчиков.

ЛИТЕРАТУРА

1. **В.В. Матвеев, В. Я. Распопов.** Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб: РНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»», 2009, 208 с. ISBN 978-5-900780-73-3.
2. **О.Н. Анучин, Г.И. Емельянец.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. Под общ. ред. чл.-кор. РАН В.Г.Пешехонова. СПб: ГИЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»», 1999, 357 с. ISBN 5-90780-22-8.
3. **Naual A.** Static calibration of the tactical grade inertial measurement. Thesis Master of Science. Columbus, USA: The Ohio State University, 2010. 118 p.
4. **С.Л. Лакоза, В. В. Мелешко.** Скалярная калибровка акселерометров низкой и средней точности. Радиооптика. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 01. С. 9–28. DOI: 10.7463/rdopt.0115.0779996
5. **В.В. Шаврин, А.С. Конаков, В.И. Тисленко.** Калибровка микроэлектромеханических датчиков ускорений и угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах. Томск, ТУСУР: Электроника, Измерительная Техника, Радиотехника и Связь, 2012, С. 265-269.
6. **Ю.Г. Егоров, Г.Ю. Киряченко, Е.А. Попов.** Синтез субоптимальных программ калибровки блока акселерометров численными методами. Гироскопия и навигация. Том 29. №2 (113), 2021. С. 47-58. DOI 10.17285/0869-7035.0062.
7. **Дао Ван Ба, Ле Ван Чанг, Р. В. Шалымов.** Динамическая калибровка триады акселерометров на двухосном стенде. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014, С. 72-76.

T.Y. Nguyen, Q. K. Nguyen (ETU “LETI”, Saint Petersburg), A.M. Boronakhin (ETU “LETI”, Saint Petersburg). **Calibration algorithm for microelectromechanical inertial sensors**

An algorithm for specifying calibration coefficients for inertial system sensors based on the application of the least-squares method is considered. The results of approbation of the proposed algorithm are given

УДК 528.526.6

М.В. ЦЫГАНКОВ, М.В. САЛОГУБ, М.В. ФЕДОРОВ
(АО «ГИРООПТИКА», Санкт-Петербург)

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ТРЕХОСЕВОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Предложена конструкция чувствительного элемента трехосевого микро-механического акселерометра. Проведены расчеты с использованием методов конечно-элементного анализа. Изготовлен и проверен на работоспособность опытный образец.

Введение. Расширение области применения микромеханического акселерометра (ММА) в различных областях науки и техники предъявляет особые требования к конструкциям чувствительного элемента (ЧЭ). В числе таких требований улучшение выходных характеристик, уменьшение массогабаритных параметров и уменьшение стоимости за одну измерительную ось [1-3]. Достигнуть заявленных требований позволяет создание многоосных датчиков и систем на их основе.

Целью работы является разработка конструкции ЧЭ трехосевого ММА с диапазоном преобразования $\pm 30g$. Развязка трех инерционных масс (ИМ) с помощью системы упругих элементов и опорных рамок позволяет снизить влияние перекрестных связей и нивелировать вклад технологических операций, связанных с монтажом кристаллов, в итоговое значение углов неортогональности.

Разработка конструкции. Конструкция ЧЭ ММА состоит из трех ИМ 1, 2 и 3. Внутренняя ИМ 1 с помощью четырех П-образных кососимметричных упругих элементов 4, обеспечивающих перемещение в направлении оси чувствительности Z, подвешена к опорной рамке 5. Средняя ИМ 2 подвешена к опорным рамкам 5 и 6 на восьми П-образных параллельных упругих элементах 7, позволяющим средней ИМ совершать перемещения в направлении оси чувствительности Y. Внешняя ИМ 3 подвешена к опорным рамкам 6 и 8 с помощью восьми П-образных параллельных упругих элементов 9 для обеспечения перемещений в направлении оси чувствительности X. Каждая из опорных рамок имеет жесткое крепление со стеклянными подложками. Съем выходных сигналов обеспечивается емкостными преобразователями перемещений (ЕПП) 10, 11 и 12 для осей Z, Y и X соответственно. ЕПП 11 и 12 для уменьшения габаритных размеров выполнены по обращенной схеме, т.е. расположены подвижными зубьями вовнутрь. Каждый из ЕПП для осей X и Y содержит по симметричному ЕПП для обеспечения дифференциального съема выходного сигнала.

Для обеспечения ударопрочности в конструкцию ЧЭ введены ограничители перемещений, представляющие из себя участки конструкции с уменьшенными зазорами. По периметру внешней опорной рамки находится ответная часть ЧЭ, в которой содержатся контактные площадки [4].

На этапе моделирования выполнялись расчеты собственных частот, емкостей, напряженно-деформированного состояния при воздействии амплитудного ускорения $\pm 30g$, напряженно-деформированного состояния при охлаждении от $+400\text{ }^\circ\text{C}$ до $-60\text{ }^\circ\text{C}$; влияния механического удара амплитудой $20000g$ и длительностью 3 мс, влияния синусоидальной вибрации, влияния технологических погрешностей. На рисунке 2 показаны три моды собственных колебаний по осям X, Y и Z соответственно.

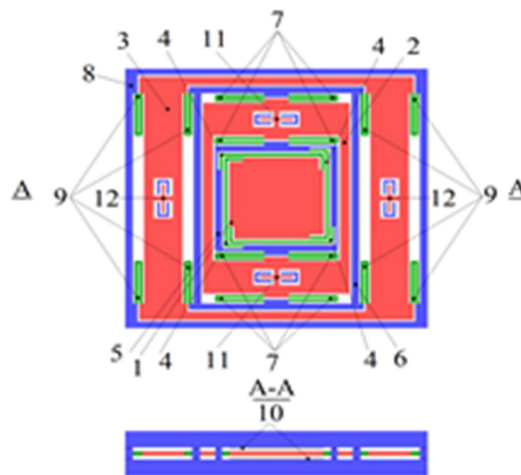


Рис. 1. Конструкция ЧЭ

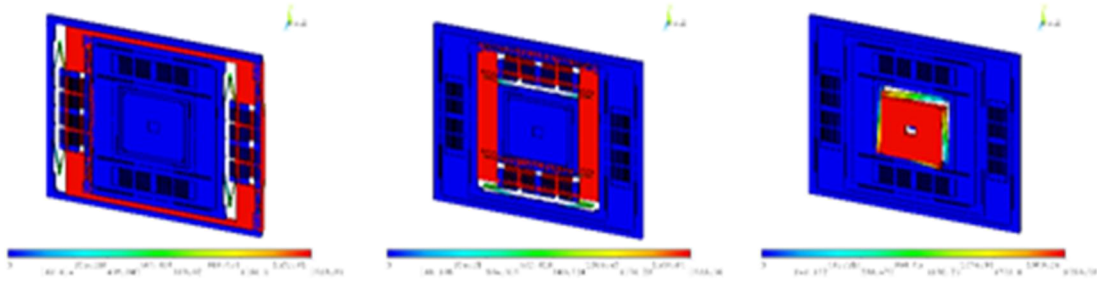


Рис. 2. Моды собственных колебаний

Результатом этапа моделирования стала конструкция ЧЭ трехосевого ММА, для изготовления которой был сформирован необходимый комплект фотошаблонов.

Исследование опытного образца. Фотографии опытного образца и элементов его конструкции показаны на рисунке 3.

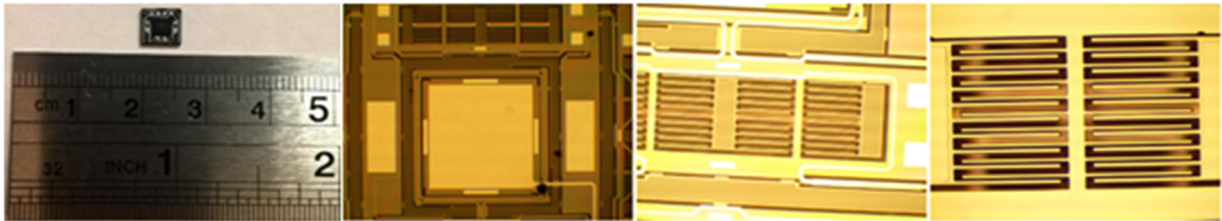


Рис. 3. Фотографии опытного образца и элементов конструкции ЧЭ

Для проверки работоспособности проводились испытания при действии ускорения свободного падения, для чего опытный образец был установлен на двухосный поворотный стенд. На рисунке 4а показан выходной сигнал с трех акселерометрических каналов ММА, на рисунке 4б алгоритм поворота стенда.

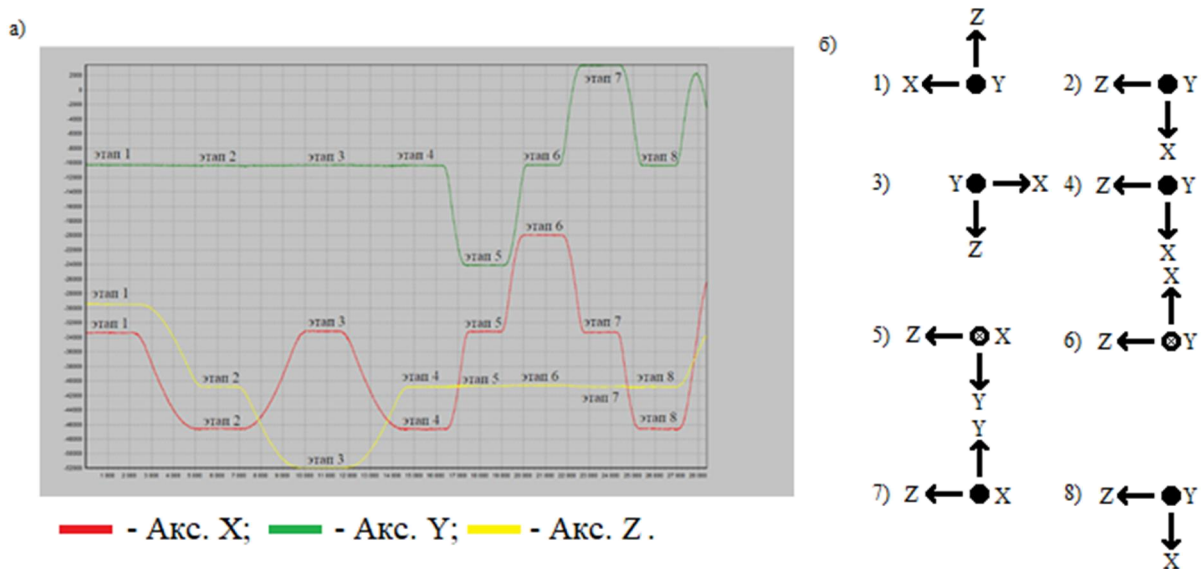


Рис. 4. Результаты оценки работоспособности: а) выходной сигнал с акселерометрических каналов (красный – канал X, зеленый – канал Y, желтый – канал Z), б) алгоритм поворота стенда

Из рисунка 4 видно, что ЧЭ реагирует на изменение положения в пространстве в соответствии с алгоритмом поворота стенда. Из этого можно сделать вывод о работоспособности разработанной конструкции.

Диапазон преобразования опытного образца проверялся с помощью стенда управления движением. Проверка проводилась в 11 этапов с шагом нагружения 3g. На рисунке 5 показан выходной сигнал с трех акселерометрических каналов при вращении в направлениях +X.

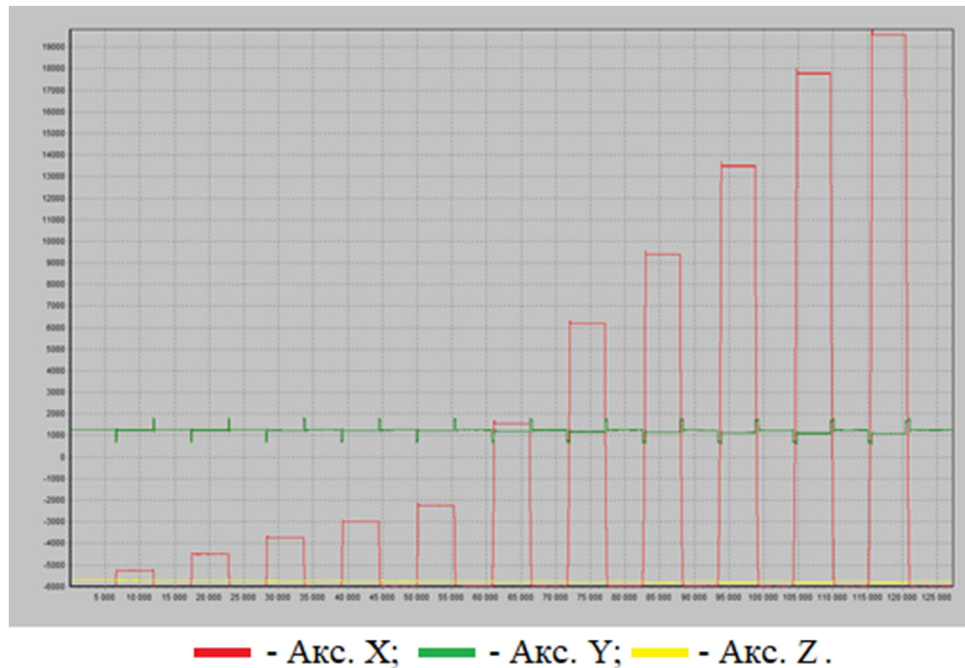


Рис. 5. Результаты оценки диапазона преобразования в направлении +X

Для направлений $-X$, $+Y$, $-Y$, $+Z$ и $-Z$ результаты аналогичны.

Предложенная конструкция выдерживает воздействие линейного ускорения $\pm 33g$ и соответствует заявленным требованиям.

Заключение. В результате работы разработана конструкция ЧЭ трехосевого ММА. Правильность примененных конструкторских решений подтверждена методами конечно-элементного анализа. В ходе работы получен опытный образец, проверена его работоспособность и оценены характеристики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Распопов В. Я. Микромеханические приборы: учебное пособие. - М.: Машиностроение, 2007. 215-315.
2. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов, Санкт-Петербург, 2015. 171-174.
3. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация, 2020. Т. 28, № 2 (109). С. 3–10.
4. Полез. мод. RU204 922U1 Российская Федерация, МПК⁷ G01P 15/08 (2006.01) G01P 15/18 (2013.01) G01P 15/125 (2006.01). ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ТРЕХОСЕВОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА; Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации (RU), Акционерное общество "ГИРООПТИКА" (АО "ГИРООПТИКА") (RU)– № 2019107872; заявл. 19.03.19; опубл. 17.06.21, Бюл. № 17.

M.V. Tsygankov, M.V. Salogub, M.V. Fedorov (JSC GYROOPTICS). **Development of the design of the sensitive element of a three-axis micromechanical accelerometer**

The article proposes the design of the sensitive element of a three-axis micromechanical accelerometer. Calculations were carried out using finite element analysis methods. Prototypes received and tested for performance.

УДК 531.383

МАЛЫЦЕВА П.А.
 (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»,
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
 имени В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург)

СТЯЖКИНА А.В., ТУЛАЕВ А.Т., ШАРАГИНА Н.С., БЕЛЯЕВ Я.В.
 (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург)

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На примере камертона рассматривается методика оценки параметров высокочастотного механического резонатора. Разрабатывается конечно-элементная модель, позволяющая оценить собственные частоты резонатора и соответствующие им формы колебаний, а также оценить временные и частотные характеристики. С целью верификации результатов моделирования проводится сравнение с результатами аналитических расчетов и экспериментального исследования.

Введение. Чувствительный элемент инерциального микромеханического датчика в общем случае представляет собой механический резонатор, основными параметрами которого являются собственные частоты и добротности колебаний [1]. Для оценки параметров может применяться моделирование с применением метода конечных элементов [2]. При этом актуальным вопросом является верификация результатов моделирования и уточнение модели по результатам экспериментального исследования.

Целью работы является разработка методики оценки параметров механического резонатора с учетом экспериментальных исследований на примере камертона.

Объект исследований. Объект исследования - камертон - представляет собой вилку с двумя одинаковыми зубцами. Как механический резонатор, камертон обладает набором собственных частот, однако наиболее выражена первая основная форма колебаний, соответствующая частоте, на которой он звучит [3]. Это вместе с высокой добротностью обеспечивает простоту получения экспериментальных данных: с помощью анализа акустического сигнала можно определить параметры без применения вибростендов и другого дополнительного оборудования.

Методика оценки параметров. Оценка параметров механического резонатора проводится по следующей методике. На первом этапе должна быть разработана расчетная модель объекта, включающая в себя геометрическую модель, свойства материалов и граничные условия. На втором этапе для модели выполняются расчет собственных частот, гармонический и временной расчеты. На третьем этапе результаты моделирования сравниваются с результатами, приведенными в источниках литературы, полученными при аналитическом расчете и в ходе эксперимента.

Сравнение выполняется для двух основных частот камертона, которые будут преобладать в акустическом сигнале, полученном при экспериментальных исследованиях.

По результатам верификации модель может быть уточнена и применяться для дальнейшей оптимизации параметров конструкции.

Разработка расчетной модели. Для выполнения расчетов и оценки параметров была подготовлена трехмерная модель камертона. (рисунок 1). В качестве материала задана конструкционная сталь.

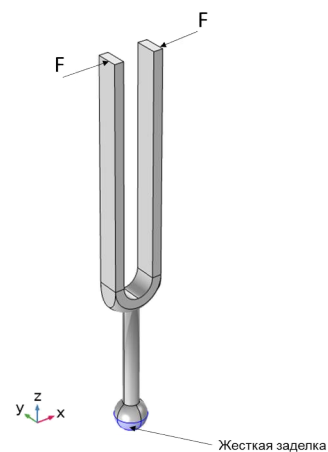


Рис. 1. Расчетная модель камертона

Общим граничным условием для механических расчетов является способ закрепления - жесткая заделка в нижней части ножки камертона. Для временного и гармонического расчетов дополнительно заданы силы, действующие на зубцы в противоположном направлении.

В результате моделирования для расчетной модели получены следующие параметры: собственные частоты (значения частот и формы колебаний), амплитудно-частотная характеристика, переходная характеристика.

Сравнение результатов моделирования с результатами, приведенными в источниках литературы. В литературе встречаются результаты исследований собственных частот камертона [4-5]. Так как геометрии камертона, приведенная в источниках и заложенная в расчетной модели, отличаются, верификация выполнялась путем сравнения форм колебаний.

По результатам сравнения выявлена идентичность форм колебаний, что подтверждает правильность расчета. В качестве примера на рисунке 2 приведена первая основная форма колебаний камертона, приведённая в источнике [4], а также подобная ей форма, полученная в результате моделирования.

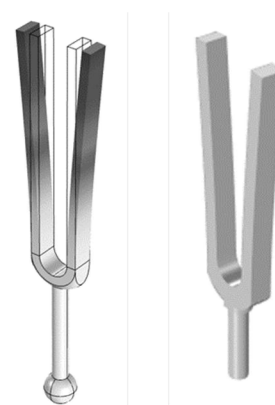


Рис. 2. Первая основная форма колебаний камертона: слева - полученная при моделировании; справа – приведенная в [4]

Сравнение результатов моделирования с результатами аналитического расчёта. В результате аналитического расчета по формулам, вывод которых приведен в источнике [3], оценены первая и вторая основные частоты камертона соответственно.

Результаты аналитического и конечно-элементного расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Собственные частоты камертона

	Первая основная частота, Гц	Вторая основная частота, Гц
Конечно-элементный расчет	439	2789
Аналитический расчет	440,2	2759
Отличие, %	0,2	1,08

По результатам сравнения отличие между результатами конечно-элементного и аналитического расчетов составляет менее 1,1 %, что подтверждает достоверность.

Сравнение результатов моделирования с результатами эксперимента. На третьем этапе проведено экспериментальное исследование макета, идентичного по габаритным размерам и свойствам материала с расчетной моделью. В ходе эксперимента записан акустический сигнал, издаваемый камертоном при ударе по его зубцам. Спектр записанного сигнала приведен на рис. 3.

На спектре наблюдаются два выраженных резонансных пика, соответствующих первой основной и второй основной частотам. Результаты эксперимента подтверждают правильность расчета первой и второй основных частот, отличие найденных частот составляет 0,38 % и 0,75 % соответственно.

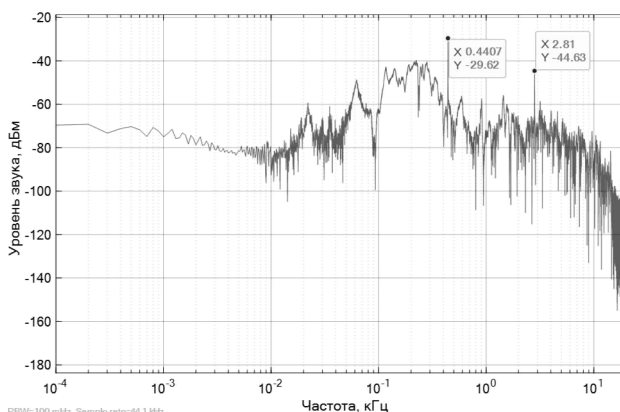


Рис. 3. Спектр акустического сигнала, полученного в ходе эксперимента

Уточнение модели по результатам эксперимента. Кроме верификации модели, в ходе эксперимента решалась задача уточнения модели, в том числе уточнения коэффициента демпфирования по скорости затухания выходно-

го сигнала во времени. На основании уточненной модели были выполнены дальнейшие исследования модели, в том числе оптимизация геометрических параметров.

Заключение. Предложена методика оценки параметров высокодобротного механического резонатора на примере камертона. Разработана конечно-элементная модель камертона, позволяющая численно оценить собственные частоты и формы колебаний камертона, а также частотные и временные характеристики. С целью верификации модели проведен сравнительный анализ результатов конечно-элементного моделирования с результатами, приведенными в источниках литературы, полученными аналитически и в ходе экспериментального исследования. По результатам сравнения подтверждена достоверность модели (максимальное отличие составляет 1,1 %). Методика может быть применена и для других высокодобротных механических систем, например, чувствительного элемента микромеханического гироскопа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов Н.В., Беляев Я.В., Стяжкина А.В., Тулаев А.Т., Юлдашев М.В., Юлдашев Р.В. Оценка влияния архитектуры ФАПЧ на характеристики микромеханических гироскопов/ "Гироскопия и навигация". - №1 (116) - 2022.
2. Styazhkina A. V., Belogurov A. A., Belyaev Ya. V., Tulaev A. T. Design of the capacitive dual-mass micromechanical gyroscope/International Workshop "Navigation and Motion Control" – 2021.
3. Элементарный учебник физики: Учеб. пособие В 3 т. Т. 3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика / Под ред. Г.С. Ландсберга. — 13-е изд., — М.: ФИЗМАТЛИТ, 200.
4. D. Stuart-Watson. A Simple Force Feedback Accelerometer Based on a Tuning Fork Displacement Sensor. 2006.
5. Rossing T.D., Russell D.A., Brown D.E. On the acoustics of tuning forks // American Journal of Physics. 1992. Vol. 60, № 7. P. 620.
6. D.A. Russell. On the sound field radiated by a tuning fork // Am. J. Phys., 68(12), 1139–45 (2000).

Maltseva P.A. (Concern CSRI Elektropribor, JSC; Saint Petersburg Electrotechnical University «LETU», Saint Petersburg), Styazhkina A.V., Tulaev A.T., Sharagina N.S., Belyaev Y.V. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg). **Method for estimating the parameters of the mechanical resonator taking into account experimental study**

The method of the parameter estimation of the high quality-factor mechanical resonator is considered on the example of tuning fork. A finite element model, that allows obtaining eigen frequencies and estimating characteristics of the tuning fork in frequency and time domains, was developed. The experimental study is carried out in order to verify the simulation results.

УДК 681.2-2

Н. В. МОЖГОВА

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

**МОДЕЛЬ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО МОДАЛЬНО-ЛОКАЛИЗОВАННОГО
АКСЕЛЕРОМЕТРА С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ В ВИДЕ БАЛКИ
С НАЧАЛЬНОЙ ПОГИБЬЮ**

Представлены результаты исследования статики и динамики микробалки с проектируемой начальной погибью с точки зрения потенциального использования её в качестве чувствительного элемента резонансного акселерометра, работающего на эффекте локализации колебаний с частотным или амплитудным выходом.

Введение. Приборостроение на основе микроэлектромеханических систем – активно развивающаяся отрасль промышленности, требующая разработки и исследования новых принципов работы и управления. Приоритетной задачей индустрии МЭМС является создание вибрационно и температурно устойчивых высокочувствительных элементов микромеханических систем инерциальной навигации (акселерометров, гироскопов, гравиметров). В части МЭМС-акселерометров, наряду с датчиками с классическими амплитудно-модулированными схемами (см., например, [1]), интенсивно развивается направление разработки резонансных и модально-локализованных датчиков [2-3]. Основным принципом работы таких систем является влияние измеряемой компоненты ускорения подвижного объекта на рабочую частоту или вид собственной формы колебаний микромеханической архитектуры. В большом числе современных работ (см., к примеру, [4]) сообщается о том, что для модально-локализованных систем с контуром обратной связи по амплитуде может быть достигнута на порядки более высокая чувствительность, чем для датчиков с частотным выходом. Значительный научный и практический интерес представляет изучение уникальных спектральных (модальных и резонансных) свойств микромеханических систем с проектируемыми возмущениями геометрии и использование этих свойств для высокоточных измерений. Известен целый ряд работ, в которых демонстрируются возможности успешного практического использования подобных механических архитектур для задач высокоточных измерений: силы или переносного ускорения [5, 6], перемещений [7], скорости [8] и градиента скорости потока жидкости [9], газовых сенсоров [10, 11]. Известны также работы по использованию систем с начальной погибью в качестве актуаторов [12] и логических элементов перспективных вычислительных устройств [13]. На настоящий момент в большинстве созданных устройств в качестве чувствительного элемента применяется микробалка с начальной погибью, обладающая свойством бистабильности при действии постоянного электрического поля в межэлектродном зазоре. Данная работа посвящена исследованию статики и динамики начально изогнутой микробалки в поле одного электрода с целью выявления особенностей поведения системы, которые потенциально могут быть использованы как принцип действия модально локализованного акселерометра.

Предлагаемая модель акселерометра. Модель акселерометра, принцип действия которого основан на локализации колебаний, изображена на рис. 1. Начально изогнутая балка, зашпеченная с двух сторон, находится в поле действия одного неподвижного электрода возбуждения колебаний и двух неподвижных электродов съема колебаний. Разность напряжений, приложенная к концам балки, позволяет менять собственные частоты чувствительного элемента и настраиваться на рабочий режим, представляющий собой колебания по третьей собственной форме балки. Подвижная масса M упруго прикреплена к микробалке с помощью системы подвесов. Внешнее ускорение приводит массу в движение, и как следствие в микробалке возникает распорное усилие N_m . Распорное усилие изменяет значения собственных частот балки и при правильном выборе параметров системы наблюдается эффект близости частот между второй (первой несимметричной) и третьей (второй симметричной) формами колебаний чувствитель-

Научные руководители: к. ф.-м. н., ассистент Лукин Алексей Вячеславович; ассистент Попов Иван Алексеевич

ного элемента. Происходит обмен энергией между указанными формами, и колебания по второй собственной форме детектируются боковыми электродами.

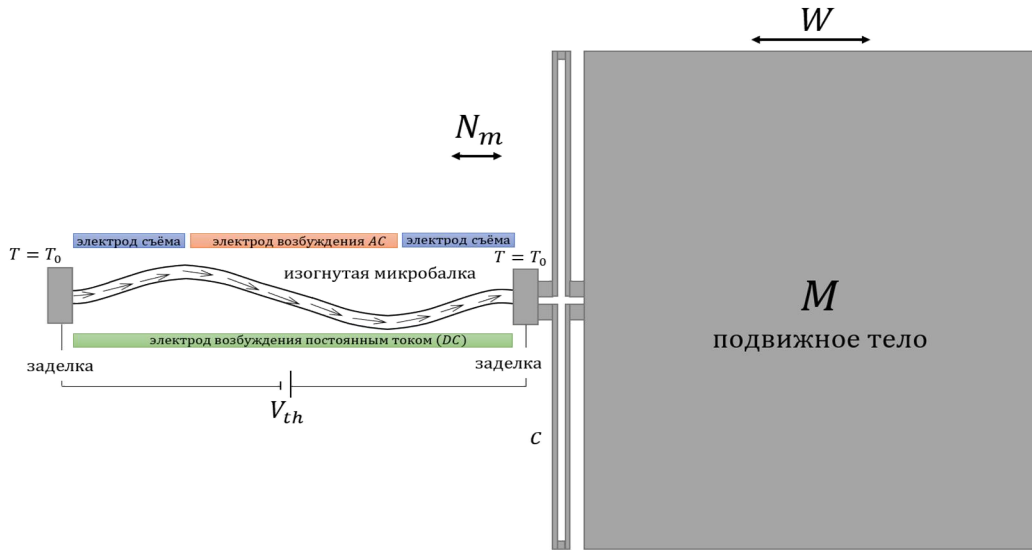


Рис. 1. Модель акселерометра

Предлагаемая модель чувствительного элемента. Рассматривается изначально изогнутая микробалка длины L , заделанная с двух сторон и имеющая прямоугольное поперечное сечение с толщиной d и шириной b (см. рис. 2). Форма начальной погиби описывается функцией $z_0(x) = h w_0(x)$, где x – координата вдоль оси балки, h – начальное отклонение центрального поперечного сечения, $w_0(x)$ – безразмерная функция, описывающая первую собственную форму изгибных колебаний прямой балки, нормированная на единицу. Предполагается, что $d \ll L$ и что прогиб балки под действием силы много больше толщины балки d , так что модель учитывает растяжение средней плоскости.

Кроме того, вдоль балки течёт ток из-за разности напряжений V_{th} , которая прикладывается на разные концы балки, вследствие чего балка нагревается по закону Джоуля, и в ней возникает распорное усилие N_{th} .

Уравнение движения рассматриваемой системы. Для описания движения чувствительного элемента (ЧЭ) используется следующее уравнение [8]:

$$EI(z'''' - z_0''') \rho b d z \ddot{z} \approx \left(N_{th} + N_m + N_0 + \frac{EA}{2L} \int_0^L ((z')^2 - (z'_0)^2) dx \right) z'' - \frac{\tilde{\lambda}}{(g_0 + z)^2};$$

где: E – модуль Юнга материала балки, $I = \frac{bd^3}{12}$ – момент инерции сечения, $z(x)$ – функция прогиба, штрихом обозначены производные по координате $\frac{d}{dx}$, точкой обозначены производные по времени $\frac{d}{dt}$, ρ – плотность материала балки, $A = bd$ – площадь поперечного сечения, $\tilde{\lambda} = \frac{\epsilon b [V_{DC}]^2}{2}$ – параметр электрического поля, ϵ и V_{DC} – относительная диэлектрическая проницаемость среды и постоянное напряжение в пространстве между микробалкой и неподвижным электродом соответственно, N_0 – распорное усилие механической природы, вызванное преднапряжённым состоянием балки.

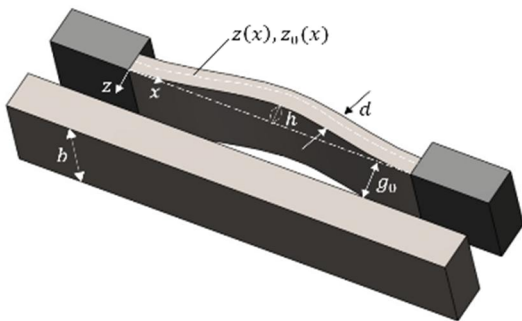


Рис. 2. Начально изогнутая микробалка в поле одного электрода

Решение задач статики – уравнение равновесия. Для нахождения положений равновесия ЧЭ в зависимости от параметров электростатического поля (λ) и осевого усилия (N) рассмотрена задача о статическом равновесии ЧЭ. В уравнении (1) рассматри-

вались только члены, не зависящие от времени, и после перехода к безразмерному виду функция прогиба раскладывалась в ряд по собственным формам прямой ненагруженной балки. Далее записаны проекционные условия на каждую учтённую в разложении собственную форму, и произведено интегрирование по длине балки. В результате была получена нелинейная система интегро-дифференциальных уравнений относительно коэффициентов в разложении функции прогиба по собственным формам. Полученная система решалась численно с помощью методов теории продолжения в программном комплексе MATLAB с помощью пакета MATCONT [14]. В результате решения были получены диаграммы положений равновесия микробалки в зависимости от параметра напряжения для различных величин параметра осевой силы и также в зависимости от параметра осевой силы для различных величин параметра напряжения (рис. 3).

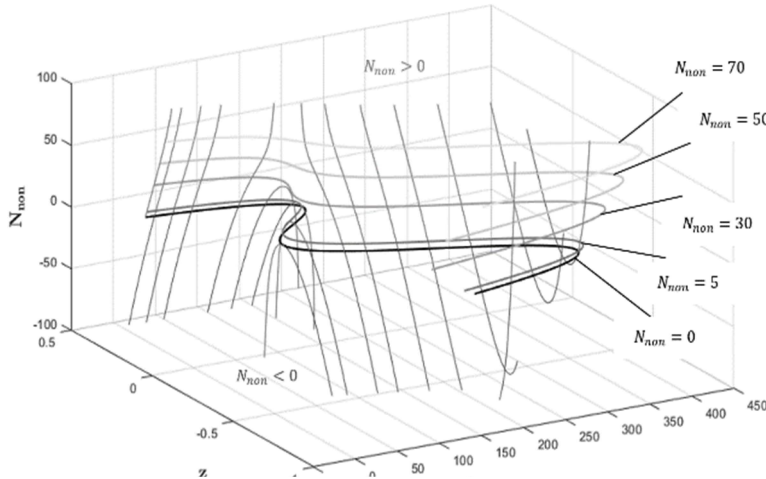


Рис. 3. Диаграмма положений равновесия микробалки в зависимости от параметров напряжения и осевой силы

мала. После подстановки функции прогиба в уравнение (1) можно отбросить слагаемые высших порядков по z_d в виду их малости. В результате уравнение малых колебаний будет иметь следующий вид:

$$z_d'''' + \ddot{z}_i = \left[\alpha_1 \int_0^1 \{(z_s')^2 - (z_0')^2\} dx + N_{non} \right] z_d'' + 2\alpha_1 \int_0^1 z_s' z_d' dx z_s'' - \frac{2\lambda z_d}{(1 + z_s)^3};$$

где: $\alpha_1 = 6 \left(\frac{g_0}{d}\right)^2$ – безразмерный параметр, $N_{non} = \frac{12L^2}{Eb d^3} N$ – безразмерный параметр осевой силы, $\lambda = \frac{6\varepsilon L^4}{Eb^3 d^3} V_{DC}^2$ – безразмерный параметр электрического поля.

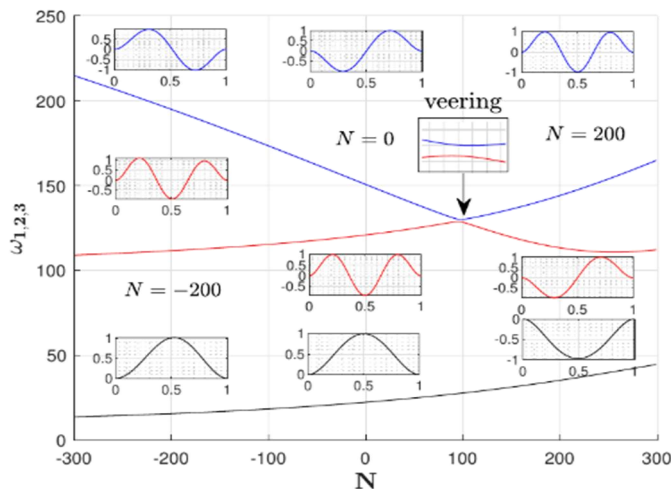


Рис. 4. Изменение собственных частот колебаний микробалки от параметра распорного усилия (погибь по второй собственной форме)

Решение задачи на собственные значения. Для анализа зависимости собственных частот ЧЭ от параметра осевой силы, возникающей в результате движения подвижной массы, рассмотрена задача о малых колебаниях вблизи положений равновесия, найденных при решении задачи статики для конкретных значений рассматриваемых параметров. Для этого функция прогиба $z(x, t)$ была разложена на статическую $z_s(x)$ и динамическую $z_d(x, t)$ составляющие, причем z_s удовлетворяет уравнению равновесия, а z_d –

Затем к уравнению (2) применяются такие же модификации, как и в задаче статики, после чего для полученного уравнения решается задача на собственные значения, по которым впоследствии строятся графики зависимости собственных частот ЧЭ от варьируемого параметра осевой силы (рис. 4). В результате получено, что при определенном образом подобранных значениях всех параметров системы – а проектируемыми параметрами здесь являются амплитуда начальной погиби и параметр электростатического поля – наблюдается эффект локализации колебаний, то есть близость частот, соответствующих первой симметричной и второй несимметричной собственным

формам ЧЭ. Этот эффект может использоваться как принцип работы резонансного акселерометра, описанного выше.

Заключение. В работе проведено исследование нелинейной статики и динамики начально изогнутой микробалки в поле одного электрода. Полученные результаты подтверждают тот факт, что начально изогнутая микробалка может быть использована в качестве чувствительного элемента в резонансном микромеханическом акселерометре, принцип действия которого основан на эффекте локализации форм колебаний.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-71-10009

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беляев Я.В. и др.** “Разработка микромеханического акселерометра”//Материалы XXV Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам, 2018, с. 1-7.
2. **N.F. Morozov et al.** “Nonlinear dynamics of mode-localized MEMS accelerometer with two electrostatically coupled microbeam sensing elements”. In: International Journal of Non-Linear Mechanics 138 (2022), p. 103852. ISSN: 0020-7462. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2021.103852. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020746221001864>.
3. **N.F. Morozov et al.** “A novel model of a mode-localized MEMS accelerometer”. In: Doklady Physics. Vol. 65. 10. Springer. 2020, pp. 371–375.
4. **Jing Yang, Jiming Zhong, and Honglong Chang.** “A Closed-Loop Mode-Localized Accelerometer”. In: Journal of Microelectromechanical Systems 27.2 (2018), pp. 210–217. DOI: 10.1109/JMEMS.2017.2787544.
5. **Erez Benjamin, Stella Lullinsky, and Slava Krylov.** “Bistable force/acceleration sensor based on pull-in voltage monitoring”. Feb. 2016, pp. 109–112. DOI: 10.1109/ISISS.2016.7435557.
6. **Erez Benjamin, Stella Lullinsky, and Slava Krylov.** “Design and Implementation of a Bistable Force/Acceleration Sensing Device Considering Fabrication Tolerances”. In: Journal of Microelectromechanical Systems PP (July 2018), pp. 1–12. DOI: 10.1109/JMEMS.2018.2852621.
7. **Naftaly Krakover, B. Ilic, and Slava Krylov.** “Displacement Sensing Based on Resonant Frequency Monitoring of Electrostatically Actuated Curved Micro Beams”. In: Journal of Micromechanics and Microengineering 26 (Sept. 2016), p. 115006. DOI: 10.1088/0960-1317/26/11/115006.
8. **Yoav Kessler et al.** “Flow Sensor Based on the Snap-Through Detection of a Curved Micromechanical Beam”. In: Journal of Microelectromechanical Systems PP (Sept. 2018), pp. 1–3. DOI: 10.1109/JMEMS.2018.2868776.
9. **Yoav Kessler, Alex Liberzon, and Slava Krylov.** “Flow Velocity Gradient Sensing Using a Single Curved Bistable Microbeam”. In: Journal of Microelectromechanical Systems PP (Aug. 2020), pp. 1–6. DOI: 10.1109/JMEMS.2020.3012690.
10. **Amal Hajjaj et al.** “A Resonant Gas Sensor Based on Multimode Excitation of a Buckled Microbeam”. In: IEEE Sensors Journal PP (Oct. 2019), pp. 1–1. DOI: 10.1109/JSEN.2019.2950495.
11. **Fehmi Najar, Mehdi Ghommem, and Eihab Abdel-Rahman.** “Arch microbeam bifurcation gas sensors”. In: Non-linear Dynamics 104 (Apr. 2021). DOI: 10.1007/s11071-021-06319-0.
12. **Rui Zhu et al.** “Semi-rigid ring-shaped electrode dielectric electroactive polymer membrane as buckling actuator”. In: Journal of Micromechanics and Microengineering 29 (Feb. 2019). DOI: 10.1088/1361-6439/ab078d.
13. **Sherif Tella and M.I. Younis.** “Toward cascable MEMS logic device based on mode localization”. In: Sensors and Actuators A: Physical 315 (Nov. 2020), p. 112367. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112367.
14. **Dhooge A., Govaerts W., Kuznetsov Yu. A., et al.** MATCONT and CL MATCONT: Continuation toolboxes in Matlab, 2006.

N.V. Mozhgova (Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Institute of Applied Mathematics and Mechanics, High School of Mechanics and Control Processes)

Microbeam with projected initial curvature as a sensitive element for wide class of microelectromechanical devices

This paper presents the results of investigation of statics and dynamics of microbeam with projected initial curvature from point of view the potential usage her as sensitive element for various microelectromechanical devices – a resonant accelerometer, that is working on effect of mode localization, and sensor of limit force, that is using a special static behavior of the system.

СЕКЦИЯ 8. НАВИГАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ ДВИЖЕНИЕМ В ШКОЛЬНЫХ ПРОЕКТАХ

УДК 681.51

П. А. КОНОВАЛОВ, А. Д. МЕЩЕРЯКОВ
(ГБОУ «Президентский физико-математический лицей № 239», Санкт – Петербург)

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РОБОТАМИ В ИДЕАЛЬНЫХ И НЕИДЕАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Работа посвящена разработке и сравнению алгоритмов управления роботами-футболистами в агрессивных условиях соревнований «RoboCup SSL» (Small Size League). Агрессивность условий обусловлена наличием на поле команды противника, которая может выступать препятствием при движении роботов.

Подвижной основой робота-футболиста является омни-платформа, построенная на четырех всенаправленных колесах, по всей длине окружности которых смонтировано несколько роликов, позволяющих производить движение в направлении, отличном от направления вращения самого колеса. Такие колёса позволяют осуществлять движение робота в любом направлении. Верхняя часть роботов маркирована цветными кругами для определения их положения на поле с помощью камеры и программы SSL-Vision. Управление роботом происходит посредством радиомодуля.

Разработаны 2 алгоритма управления роботами-футболистами в различных условиях: неидеальных (реальных) и идеальных (создаваемых в симуляторе). Первый алгоритм основан на базовых кинематических формулах, суть его заключается в том, что величина и направление ускорения реального робота подстраиваются таким образом, чтобы его скорость стремилась к скорости его математической модели, созданной в программе, в каждый момент времени. Этот алгоритм работает для любых роботов независимо от их характеристик, и подходит для реальных условий. Второй алгоритм выводится из таких же кинематических формул, но, в отличие от первого, не привязан к моменту времени и работает более универсально. Однако второй алгоритм актуален лишь в случае, если все роботы идентичны, и подходит только для идеальных условий.

УДК 681.51

О. А. КАРЮКОВ, П. А. КОНОВАЛОВ
(ГБОУ «Президентский физико-математический лицей № 239», Санкт – Петербург)

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ, ИГРАЮЩИМИ В ФУТБОЛ

Работа посвящена разработке алгоритмов навигации и управления роботами-футболистами в агрессивных условиях соревнований RoboCup SSL.

Передвижение робота-футболиста производится с помощью установленной в нём омни-платформы, представляющей собой 4 всенаправленных колеса, по длине окружности каждого из которых смонтированы ролики. Эти ролики позволяют осуществлять движение в направлении, отличном от направления вращения самого колеса.

У каждого робота есть ударный механизм – кикер, предназначенный для того, чтобы пинать мяч, а также индивидуальная цветовая метка для идентификации команды, за которую он играет с помощью камеры, установленной над полем. Управление роботом происходит посредством радиомодуля.

Цикл управления роботом состоит из следующих шагов: оценка его положения на поле средствами программного обеспечения SSL-Vision, отправка данных о его положении на компьютер, формирование управляющих команд, отправка команд роботам.

В работе рассматривается команда, состоящая из двух роботов: атакующего и вратаря. Атакующий осуществляет удар по воротам противника и пытается забить гол, вратарь мешает атакующему противника забить гол в свои ворота. При атаке анализируется положение роботов противника, при защите – траектория движения мяча. Алгоритмы управления роботами реализованы с использованием конечного автомата.

УДК 681.51

Ю. С. ГЛАЗОВ, П. А. КОНОВАЛОВ
(ГБОУ «Президентский физико-математический лицей № 239», Санкт – Петербург)

АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗОВ В ЗАДАЧАХ ФУТБОЛА РОБОТОВ

В работе реализованы алгоритмы построения прогнозов при игре в футбол роботов-вратарей по правилам соревнований RoboCup SSL (SmallSizeLeague).

Подвижная часть роботов-футболистов – омни-платформа, основой которой являются четыре всенаправленных колеса, обеспечивающих движение робота в любом направлении. Верхняя часть каждого робота маркирована несколькими цветными кругами для распознавания команды, к которой он относится, а также для определения его ориентации и местоположения на поле с помощью камеры и программы SSL-Vision. Управление происходит посредством специального радиомодуля.

Робот-вратарь двигается по отрезку, проложенному вдоль линии ворот. Для защиты ворот он осуществляет прогнозирование потенциальной траектории движения мяча и перемещается в точку её пересечения с линией ворот. В работе рассмотрены три варианта построения прогноза траектории движения мяча в зависимости от его положения на игровом поле:

- 1) мяч катится в сторону ворот: прогноз производится с использованием регрессионного анализа на основе данных о нескольких последних положениях мяча на поле;
- 2) мяч находится у атакующих роботов команды соперника: прогноз траектории движения мяча строится на основе информации о местоположении на поле атакующего робота противника и его ориентации;
- 3) мяч находится у атакующих роботов своей команды: прогнозирование невозможно, при этом вратарь перемещается к точке пересечения отрезка, по которому робот осуществляет движение, и линии, соединяющей мяч и центр ворот.

В дальнейшем планируется доработка рассмотренных алгоритмов для построения прогнозов более сложных траекторий движения мяча.

УДК 681.51

А.В. БАЛАКИРСКИЙ, К.А.СИНЦОВ
(ГБОУ «Президентский физико-математический лицей № 239»), Санкт-Петербург)

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ НАВИГАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ LEGO-РОБОТОМ ПО РАЗЛИЧНЫМ ОРИЕНТИРАМ

В работе предложено решение задачи навигации и управления LEGO-роботом по различным ориентирам в рамках международных соревнований RoboCupJunior (категория Rescue Line).

В ходе проведения соревнований роботом должны быть выполнены два задания:

- движение по узкой линии сложной траектории, содержащей препятствия (например, лежащие полицейские и горки);
- доставка груза в зоне эвакуации (пространство размером 120 x 90 см²): роботу необходимо донести заранее загруженный в него на старте спасательный набор (куб размерами 3 x 3 x 3 см³) в заданную точку (прямоугольный треугольник с катетами 30 см, находящийся на возвышении 6 см).

После выполнения всех заданий робот отправляется на финиш. За правильное выполнение заданий начисляются баллы. Побеждает тот, кто набирает больше всего баллов.

При создании робота была использована платформа LEGO EV3, предоставляющая широкий выбор решений для разработки конструкции и позволяющая встраивать большое количество датчиков. Для выполнения заданий соревнований RoboCupJunior при проектировании робота были использованы 5 датчиков: 2 датчика освещённости, направленные вниз (для контроля линии, по которой необходимо осуществлять движение); 2 датчика расстояния, один из которых направлен вперёд (для обнаружения препятствий), а другой - вправо (для контроля расстояния до стены в зоне эвакуации), а также гироскоп (для ориентации робота в направлении точки эвакуации). Центр масс робота был смещён максимально близко к полу для повышения его устойчивости.

Перечисленные технические решения в совокупности с использованием программных средств позволили разработанному LEGO-роботу с высокой эффективностью выполнять задания соревнований.

УДК 681.51

Г. Н. ФИЛИПОВ

(Президентский физико-математический лицей № 239, г. Санкт-Петербург)

ОСОБЕННОСТИ АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО ПРОХОЖДЕНИЯ МАРШРУТА ПРОТОТИПОМ АВТОНОМНОГО НАДВОДНОГО АППАРАТА

Работа посвящена созданию прототипа автономного надводного аппарата и алгоритма управления его движением.

Алгоритм был разработан и реализован в виде программы на языке LUA в рамках научно-технического конкурса «ИнтЭРА». С помощью программы осуществляется перемещение автономного надводного аппарата «Кадет-М» через заданные точки за минимальное время с учетом ветра и течения. Особенностью алгоритма является отказ от расчета поправок для компенсации ветра и течения в пользу ПИД-регулятора, что позволило упростить программу без ущерба для точности и скорости прохождения маршрута. Первые испытания алгоритма, проведенные при помощи симулятора, подтвердили его работоспособность.

Впоследствии был разработан прототип нового автономного надводного аппарата, использующий ряд конструктивных особенностей платформы «Кадет-М», в частности принцип управления: вместо общепринятой двухвинтовой конструкции с управлением за счет изменения скоростей вращения винтов была использована поворотная ось гребного винта по принципу лодочного мотора. Поскольку прототип предназначался для использования в бассейне, для его управления отпала необходимость в расчете сферических координат, и была применена упрощенная версия алгоритма. В ходе испытаний в бассейне было выявлено, что разработанный алгоритм совместно с примененной конструкцией системы управления обеспечивает оптимальное прохождение маршрута прототипом надводного аппарата, о чем свидетельствует победа в соревнованиях аквароботов с большим отрывом.

В дальнейшем планируется доработка предложенного алгоритма для использования прототипа надводного аппарата в реальных акваториях.

УДК 621.3.083.6

А.Г. ЧЕРНЯЕВ, С.Ю. УЛИВАНОВ
(Общество популяризации науки и техники «CanSat в Самаре», Самара)

РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ ТОКА, ПОТРЕБЛЯЕМОГО АППАРАТАМИ ФОРМАТА CANSAT

Целью работы является создание устройства, предназначенного для измерения силы тока, потребляемого пикоспутниками формата CanSat. Предложена схема построения устройства и произведен выбор элементной базы. В ходе запуска аппарата формата CanSat были проведены экспериментальные исследования, результаты которых подтверждают работоспособность предложенного устройства.

Введение. При разработке автономного устройства, например, аппарата формата *CanSat* [1], вычисляется время его работы от аккумулятора. Обычно эта задача решается посредством расчёта энергобаланса [2]. Зная информацию о потребляемом токе, ёмкости используемого аккумулятора и его номинальном напряжении, можно спрогнозировать время автономной работы устройства. Однако такой расчетный метод является не совсем точным, поскольку при вычислениях используется фиксированное (среднее) значение силы тока, потребляемого каждой микросхемой на аппарате, которое приводится в документации, при этом на практике сила потребляемого тока может колебаться в относительно широких диапазонах. Кроме того, существует риск, что какие-то потребители тока не будут учтены при теоретическом расчёте энергобаланса.

Целью настоящей работы является разработка устройства измерения силы тока, потребляемого, например, аппаратами формата *CanSat*, а также проведение эксперимента и сравнение его результатов с теоретическим расчетом.

Концепция построения устройства измерения силы тока. Предлагается определять силу тока с помощью шунтирующего резистора и операционного усилителя посредством измерения напряжения с помощью АЦП микроконтроллера (бортового компьютера) аппарата формата *CanSat*. Схема предлагаемого устройства приведена на рисунке 1. Подобные схемы, именуемые в зарубежных источниках как *Low-side Current Sensing* [3] (на русский язык можно перевести как «Измерение тока в отрицательном полюсе нагрузки» [4]), можно встретить в системах, используемых и в других искусственных спутниках [5].

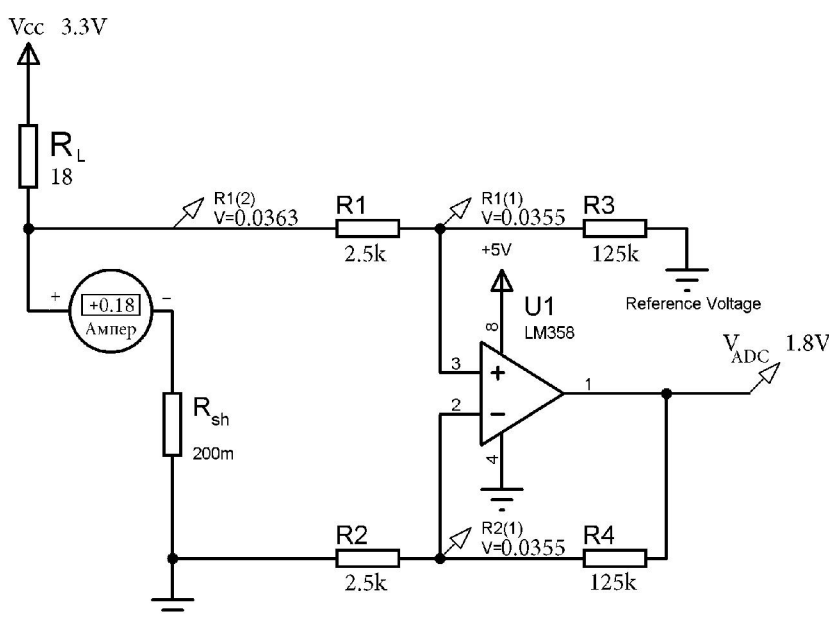


Рис. 1. Схема устройства измерения силы тока

На рисунке 1 изображена полезная нагрузка R_L , в качестве которой может быть микроконтроллер, трансивер или же весь аппарата в целом. Шунтирующий резистор сопротивлением R_{sh} подключен в разрыв цепи полезной нагрузки. Опорное напряжение схемы обозначено как *Reference Voltage*. При измерении силы потребляемого тока опорное напряжение берётся в точке нулевого потенциала. Если будет поставлена задача измерения силы тока, протекающего и в обратном направлении (например, при зарядке аккумулятора), значение опорного напряжения необходимо будет выбрать иным.

Теоретически, для определения силы тока было бы достаточно с помощью АЦП микроконтроллера измерить напряжение на шунтирующем резисторе. Однако на практике это напряжение слишком мало, чтобы быть измеренным. Таким образом, его необходимо сначала усилить, для чего используется операционный усилитель. Напряжение V_{ADC} является результатом работы схемы, пригодным для измерения с помощью АЦП микроконтроллера.

Отметим, что на практике сопротивление полезной нагрузки изменяется со временем с непредсказуемо большой скоростью, при этом скорость дискретизации АЦП ограничена. Для учета вклада изменения тока в то время, когда измерение АЦП не производится из-за недостаточной частоты дискретизации, рекомендуется использовать интегрирующую цепочку перед входом АЦП (не является частью схемы и не показана на рисунке 1).

Сопротивление резисторов $R1$ и $R3$ должны быть равны соответственно сопротивлениям резисторов $R2$ и $R4$, как этого требует архитектура *Low-side Current Sensing* [3]. Коэффициент усиления определяется по формуле

$$K = \frac{R_4}{R_2}. \quad (1)$$

Сила потребляемого тока вычисляется следующим образом

$$I = \frac{V_{ADC}}{K \cdot R_{sh}}. \quad (2)$$

На рисунке 1 также изображены дополнительные элементы, не являющиеся непосредственно схемой измерения силы тока, но поясняющие принцип её работы. Так, на схеме присутствует амперметр, который отображает значение сила тока, потребляемого полезной нагрузкой. Косые стрелки показывают напряжение в ключевых точках схемы.

Подбор элементной базы. Подбор элементной базы производится в следующем порядке:

1. Теоретический расчёт энергобаланса, производимый согласно [2].
2. Выбор номинала шунтирующего резистора, который подойдёт для измерения силы тока в диапазоне, полученном в пункте 1. Если использовать шунтирующий резистор с большим сопротивлением (1 или 2 Ом), то по закону Ома на этом резисторе будет относительно большое падение напряжения, что недопустимо, так как может привести к некорректной работе электроники аппарата. Если выбрать шунтирующий резистор со слишком низким сопротивлением (0,001 Ом), то падение напряжения на нём будет настолько малым, что потребуются значительное усиление, которое приведет к появлению шума, и, как следствие, к неточным результатам измерения. Таким образом, необходимо искать компромисс: резистор с не слишком большим и не слишком маленьким сопротивлением и усилитель с небольшим коэффициентом усиления. Для измерения силы тока на аппарате формата *CanSat* был выбран шунтирующий резистор сопротивлением 0,2 Ом, удовлетворяющий указанным требованиям.
3. Выбор типоразмера шунтирующего резистора, позволяющего рассеивать мощность, потребляемую аппаратом. Для определения рассеиваемой мощности необходима информация о силе тока, проходящего через шунтирующий резистор (определяется в пункте 1) и его сопротивлении (определяется в пункте 2). Например, расчёт энергобаланса показал, что сила тока, потребляемого аппаратом, составит 200 мА. Тогда, согласно закону Ома, мощность, выделяемая на шунтирующем резисторе сопротивлением 0,2 Ом, составит 8 мВт. С учетом этой информации, в качестве шунтирующего резистора был выбран резистор типоразмером 0603, на котором рассеиваемая мощность может достигать 100 мВт, что вполне достаточно для устройства измерения силы тока, потребляемого аппаратом формата *CanSat*.

4. Подбор усилителя напряжения. В случае измерения напряжения на шунтирующем резисторе посредством АЦП микроконтроллера необходимо определить разрешающую способность. Например, для АЦП микроконтроллера разрядностью 10 бит при опорном напряжении 3,3 В разрешающая способность составит 3,2 мВ (на 1 код АЦП приходится 3,2 мВ). Поделив это напряжение на сопротивление шунтирующего резистора R_{sh} (0,2 Ом), можно определить, что разрешающая способность АЦП для значений силы тока, протекающего через шунтирующий резистор, составит 16 мА. Таким образом, невозможно точно определить конкретное значение силы тока на шунтирующем резисторе, поскольку оно может быть равно от 16 мА включительно до 32 мА не включительно, а из показаний АЦП будет следовать, что сила тока равна всего 16 мА, это может существенно отразиться на результатах измерения в целом. Очевидно, что для повышения точности необходимо усиливать напряжение. Однако, как было сказано выше, значительное усиление повлечет за собой появление шума, также приводящего к погрешности измерения. На практике для аппарата формата *CanSat* достаточно усиления порядка 50 – 100 раз.

Для корректной работы схемы при любых значениях силы тока необходимо обеспечить напряжение питания операционного усилителя на 1,5 В больше напряжения питания V_{cc} . Если же в схеме доступно напряжение только одно уровня, необходимо использовать *Rail-to-rail* операционный усилитель [6].

Было проведено моделирование предложенной схемы (рисунок 1). При моделировании были заданы параметры элементов, соответствующие выбранным выше, и сопротивление полезной нагрузки 18 Ом. Сила тока, определенная согласно формулам (1), (2) по измеренному напряжению V_{ADC} 1,8 В, составила 0,18 А, что успешно согласуется с показаниями амперметра, отображающего, что через полезную нагрузку протекает ток 0,18 А.

Экспериментальный образец. В соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1, для аппарата формата *CanSat* был собран экспериментальный образец устройства измерения силы тока. В аппарате использовались аккумулятор *Li-ion*, номинальное напряжение которого составляет 3,7 В, и микроконтроллер *ATmega128A* разрядностью 10 бит. В качестве полезной нагрузки рассматривался аппарат формата *CanSat* в целом. Была спроектирована плата питания [7], оснащённая DC-DC преобразователями на 3,3 В и на 5 В.

Промышленность выпускает готовые решения, в которых части схемы (рисунок 1) уже интегрированы в единый корпус. Именно такое решение, известное под названием микросхема *TSC101BILT*, обладающее усилением 50 раз, и было выбрано при создании экспериментального образца устройства измерения силы тока.

Результаты испытаний. В рамках конкурса «Воздушно-инженерная школа *CanSat* в России» в 2021 г. был проведён запуск аппарата формата *CanSat*. Перед запуском был проведён расчёт энергобаланса, в результате которого было определено, что сила тока, потребляемого аппаратом во время полета, составит 200 мА. Во время запуска аппарата с помощью предложенного устройства измерения силы тока были получены данные, представленные на рисунке 2. Сила потребляемого тока варьировалась в диапазоне от 180 до 190 мА (изменения силы тока обусловлены изменениями сопротивления полезной нагрузки в процессе работы). Таким образом, измерения соответствуют расчету, что подтверждает работоспособность предлагаемого устройства.

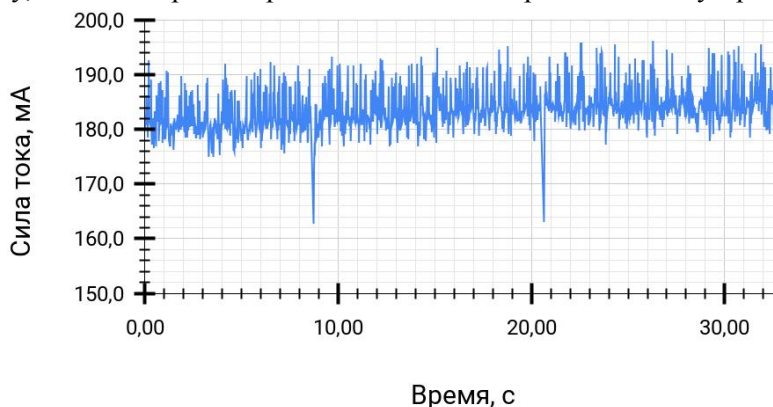


Рис. 2. График зависимости силы тока, потребляемого аппаратом формата *CanSat*, от времени

Заключение. Предложено устройство для измерения силы тока аппаратами формата *CanSat*. Разработана его схема, произведён выбор элементной базы, проведено моделирование. Устройство было реализовано на печатной плате экспериментального образца. Результаты экспериментальных исследований соответствуют теоретическим расчётам, что подтверждает работоспособность предлагаемого устройства измерения силы тока.

Настоящая разработка может быть использована для создания отдельного устройства, предназначенного для измерения силы потребляемого тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ивлев С.Д., Селезнёва Л.А., Ищанов А.В., Черняев А.Г., Кумарин А.А.** Конструкция зонда школьного чемпионата CANSAT // Международная молодежная научная конференция «XV Королевские чтения», посвященная 100-летию со дня рождения Д.И. Козлова. Тезисы докладов. Самара. - 2019. С. 49.
2. **Кумарин А.А.** Расчет потребления электроприбора и времени работы от аккумулятора URL — <https://www.youtube.com/watch?v=voF-Ov8Oa5I>
3. **Texas Instruments.** Low-Side Current Sense Circuit Integration. Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265 Copyright ©2017, Texas Instruments Inc. www.ti.com/lit/an/sboa190/sboa190.pdf?ts=1654704553342&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
4. **Пушкарев М.** Микросхемы для измерения тока // Компоненты и технологии. 2006. № 10(63). С. 116-121. EDN MTFIYL.
5. **A. Kumarin, I. Kudryavtsev.** Electrical Power Supply System For A Maneuvering System Of A Nanosatellite. Samara University, Samara, Russia 2016 г. UTR — <https://elibrary.ru/item.asp?id=35172587>
6. Схемы измерения тока: сайт. – URL: <https://www.e-core.ru/shemyi-izmereniya-toka> (дата обращения: 10.10.2021). – Текст: электронный.
7. **Уливанов С.Ю.** Разработка планетохода «Луноходь» // Сборник работ финалистов 2021. Конкурс Спутник, Самарский Университет.- 2021. С. 222-228.

A.G. Cherniaev, S.Y. Ulivanov (Society for Science «CanSat in Samara», Samara). **Development of a current measuring device for CANSAT satellites**

This paper is devoted to development of a current measuring device for CanSat satellites. The concept of the device is proposed and component selection is made. During the launch of the CanSat satellite the experimental studies were carried out. The results of the experimental studies confirm the efficiency of the developed device.

УДК 681.51

Р.В. КАРВОВСКИЙ, И.А. ЗОТОВ
(ГБОУ ДО РК «МАН «Искатель», Симферополь)

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИСЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Настоящая работа посвящена созданию мультисенсорной системы мониторинга различных параметров окружающей среды, предназначенной для использования в составе комплексов, в которых необходимо контролировать климат. На основе информации, вырабатываемой такой системой, прогнозируются возможные проблемы, и подготавливается комплекс мер для их предотвращения.

Основным новшеством разрабатываемой системы является возможность подключения к ней различных датчиков, выбираемых исходя их требований заказчика.

В ходе работы создан прототип системы, позволяющей владельцам виноградников отслеживать температуру и влажность воздуха, а также влажность почвы. В составе устройства были использованы датчики влажности почвы, воздуха и температуры, а также микроконтроллер, элементы питания, модуль беспроводной связи GSM. Разработано встроенное программное обеспечение для микроконтроллера, позволяющее отправлять информацию с прототипа на сервер для дальнейшей обработки.

УДК 681.51

Е.С. СКУРИХИН, М.А. ТАНАСИЙ
(ГБУ ДО ЦДЮТТ Московского района, г. Санкт-Петербург)

ФИЛЬТРАЦИЯ МЕТОДОМ КАЛМАНА ИЗМЕРЕНИЙ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

В рамках работ по созданию бесплатформенной инерциальной навигационной системы рассматривается обработка измерений инерциальных микромеханических датчиков с помощью Калмановского метода фильтрации. Приводятся результаты использования фильтра Калмана при работе с данными разной степени зашумленности.

Научный руководитель: педагог дополнительного образования Кириллов Артем Владиславович

СЕКЦИЯ 9. ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ

УДК 520.8, 528.52, 531.749

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ КАЛИБРОВКИ ДАТЧИКА УГЛА АЗИМУТАЛЬНОГО ПРИВОДА АСТРОНОМИЧЕСКОГО УНИВЕРСАЛА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЗВЕЗД

Рассматриваются алгоритмы калибровки азимутального привода астрономического универсала по наблюдениям звезд вблизи круга равных высот и в околоризитной области. С помощью моделирования исследуются погрешности определения опорных значений угла поворота по данным астрономических наблюдений при проведении калибровки датчика угла. По результатам моделирования проводится сравнительный анализ рассматриваемых алгоритмов калибровки.

Введение. Измерение горизонтальных углов является неотъемлемой частью работ по развертыванию и поддержанию астрономо-геодезических сетей [1]. Современные автоматизированные приборы, предназначенные для определения горизонтальных углов, такие как тахеометры и теодолиты, а также близкие к ним по конструкции астрономические приборы, например, автоматизированный астрономический универсал (ААУ, рис. 1), оснащаются азимутальными приводами (АП) наведения на основе цифровых датчиков угла [2, 3]. Высокая точность определения горизонтальных углов обеспечивается калибровкой датчиков в заводских условиях с использованием прецизионных углоизмерительных систем [3, 4].

В результате калибровки формируется таблица погрешностей датчика угла АП в зависимости от угла поворота ротора датчика в виде разностей

$$\Delta\gamma_{ДУi} = \gamma_{ОПi} - \gamma_{ДУi}, \quad (1)$$

где $\gamma_{ОПi}$ – опорное значение угла поворота, рассчитанное с использованием прецизионной углоизмерительной системы;

$\gamma_{ДУi}$ – угол поворота, рассчитанный по разности показаний калибруемого датчика угла до и после i -го поворота на угол $\gamma_{ОПi}$.

При выполнении режимов работы ААУ компенсация погрешностей датчика угла АП осуществляется с использованием поправок $\Delta\gamma_{ДУ}$, полученных в результате калибровки в табличном виде или в виде аналитических выражений, соответствующих модели погрешностей датчика.

Однако из-за погрешностей установки датчика на ось вращения привода и изменения температуры окружающей среды возникает необходимость повторной калибровки датчика угла в полевых условиях перед проведением работ.

В ААУ калибровку датчика угла в полевых условиях возможно выполнить по наблюдениям звезд [5]. В этом случае опорным значением угла поворота АП $\gamma_{ОП}$ служит один из следующих параметров:

- приращение астрономического азимута визирной оси прибора при наблюдении звезд вблизи круга равных высот [5];
- приращение угла поворота системы координат (СК) фотоприемного устройства (ФПУ) прибора при наблюдении звезд в околоризитной области.

Настоящая работа посвящена исследованию и сравнительному анализу двух алгоритмов калибровки датчика угла АП ААУ по наблюдениям звезд вблизи круга равных высот и в околоризитной области.



Рис. 1. Внешний вид ААУ

зенитной области с целью выбора алгоритма, обеспечивающего наибольшую точность определения опорных значений угла поворота АП $\gamma_{оп}$.

Описание рассматриваемых методов калибровки. В работе [5] представлена методика калибровки датчика угла АП по наблюдениям звезд вблизи круга равных высот. В соответствии с этой методикой наблюдения звезд осуществляются на высоте визирной оси $h_{во}$ в диапазоне углов поворота АП от 0 до 360° . Угол поворота АП $\gamma_{ду}$, рассчитанный по разности показаний калибруемого датчика угла до поворота (индекс «I») и после поворота (индекс «II»), сопоставляется с опорным значением угла поворота АП $\gamma_{оп}$, вычисленным по разности азимутов визирной оси $A_{во}^I$ и $A_{во}^{II}$, определенных в двух положениях ААУ с помощью алгоритма, приведенного в [2] (рис. 2а).

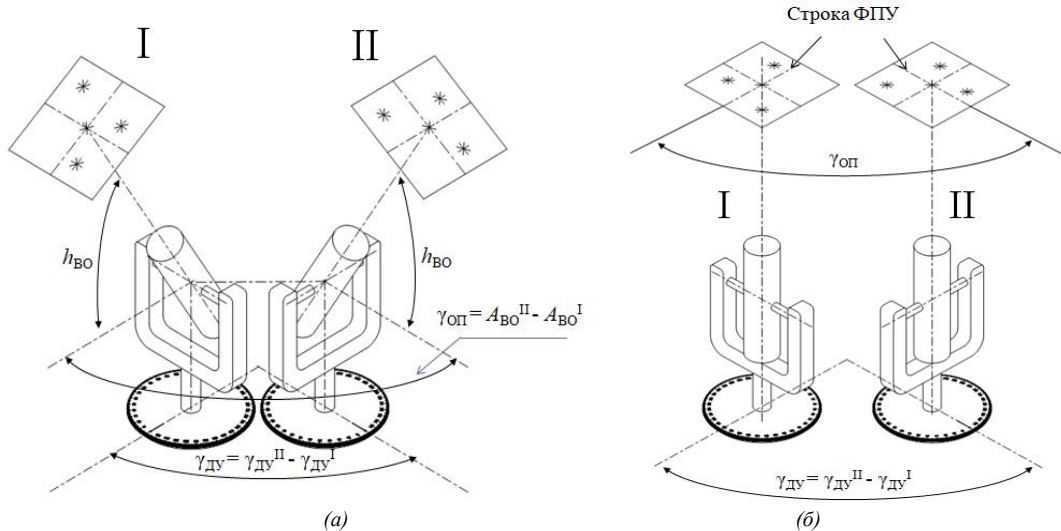


Рис. 2. Калибровка по наблюдениям звезд вблизи круга равных высот (а) и в околозенитной области (б)

В случае калибровки по наблюдениям звезд в околозенитной области (рис. 2б) визирная ось ААУ направлена в зенит перпендикулярно плоскости горизонта. Опорные значения угла поворота $\gamma_{оп}$ при этом рассчитываются по изменению ориентации СК ФПУ при поворотах АП.

На рис. 3 представлена блок-схема, поясняющая принцип определения опорных значений угла поворота.

Определение опорных значений угла поворота $\gamma_{оп}$ сводится к определению параметров преобразования $C_{11}, C_{12}, C_{13}, C_{21}, C_{22}, C_{23}$ (рис. 3) [2, 6], характеризующих связь СК ФПУ до и после поворота.

Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма калибровки по наблюдениям звезд в околозенитной области является регистрация фиксированного участка небесной сферы, что позволяет оценивать параметры преобразования только по координатам изображений звезд в плоскости ФПУ до поворота $x_{звi}, y_{звi}$ и после поворота $x_{звi}^*, y_{звi}^*$, не прибегая к их идентификации и использованию данных звездного каталога.



Рис. 3. Блок-схема определения угла поворота СК ФПУ

Сравнительный анализ алгоритмов калибровки. В рамках сравнительного анализа оценивались случайная σ_γ и систематическая $\Delta\gamma$ составляющие погрешности определения опорных значений угла поворота при калибровке обоими алгоритмами.

Для случая калибровки по наблюдениям звезд вблизи круга равных высот оценка погрешности проводилась с использованием формул для расчета случайной $\sigma_{Аво}$ и систематической $\Delta A_{во}$ составляющих погрешностей определения астрономического азимута, учитывающих ошибки определения экваториальных координат (прямого восхождения и склонения) центра видимой

области небесной сферы в виде централизованных случайных величин с нормальным законом распределения и средними квадратическими отклонениями (СКО) σ_α , σ_δ и ошибки определения астрономических координат (широты и долготы) $\Delta\varphi$ и $\Delta\lambda$, которые в случае калибровки, проводимой в одной точке, носят систематический характер [7]:

$$\sigma_{A_{BO}} = \sqrt{\frac{\sin(q)^2}{\cos(h_{BO})^2} \sigma_\delta^2 + \frac{\cos(q)^2 \cos(\delta_{BO})^2}{\cos(h_{BO})^2} \sigma_\alpha^2}, \quad \Delta A_{BO} = \frac{\cos(q) \cos(\delta_{BO})}{\cos(h_{BO})} \Delta\lambda + \frac{\sin(A_{BO})}{\text{ctg}(h_{BO})} \Delta\varphi, \quad (2)$$

где q - параллактический угол, рассчитываемый по формуле

$$q = \arctg\left(\frac{\sin(t_{BO})}{\text{tg}(\varphi) \cos(\delta_{BO}) - \sin(\delta_{BO}) \cos(t_{BO})}\right), \quad (3)$$

где α_{BO} , δ_{BO} – экваториальные координаты точки, соответствующей пересечению визирной осью ААУ небесной сферы;

$t_{BO} = \theta + \lambda - \alpha_{BO}$ – часовой угол точки, соответствующей пересечению визирной осью ААУ небесной сферы, где θ – Гринвичское истинное звездное время; λ – астрономическая долгота места.

Как видно из формул (2), значения составляющих погрешности $\sigma_{A_{BO}}$ и ΔA_{BO} уменьшаются вместе с высотой наблюдения звезд h_{BO} . Однако, при наблюдениях на высотах ниже 40° появляются существенные погрешности определения азимута из-за воздействия боковой рефракции, поэтому наблюдение звезд на высотах ниже указанного значения нецелесообразно [8, 9].

На рис. 4 представлены результаты расчета составляющих погрешности определения азимута визирной оси ΔA_{BO} , обусловленных ошибками определения астрономических координат места (широты и долготы). Представленные результаты получены для высоты наблюдения звезд $h_{BO} = 40^\circ$, астрономических широт места установки ААУ $\varphi = (40 \div 70)^\circ$ и ошибок определения астрономических координат $\Delta\varphi = 0,9''$ и $\Delta\lambda = 1,35''$.

Случайная составляющая погрешности $\sigma_{A_{BO}}$ при $\sigma_\delta = 0,3''$, $\sigma_\alpha = 0,3'' \sec(\delta_{BO})$ [10] и высоте наблюдения звезд $h_{BO} = 40^\circ$ равняется $0,4''$ и не зависит от угла поворота АП.

Результаты расчета показали:

- систематическая составляющая погрешности, обусловленная ошибкой широты $\Delta\varphi$ (верхний график на рис. 4), зависит от угла поворота АП относительно плоскости меридиана и принимает максимальные значения на углах поворота 90° и 270° и минимальные при наблюдениях в плоскости меридиана (0° и 180°);
- систематическая составляющая погрешности, обусловленная ошибкой долготы $\Delta\lambda$ (нижний график на рис. 4), зависит от угла поворота АП и широты места установки ААУ и принимает максимальные значения вблизи плоскости меридиана при угле поворота 0° и минимальные при удалении от меридиана на 180° .

Погрешность определения опорных значений угла поворота также может быть выражена в виде случайной σ_γ и систематической $\Delta\gamma$ составляющих, которые рассчитываются по формулам

$$\sigma_\gamma = \sqrt{2} \cdot \sigma_{A_{BO}}, \quad \Delta\gamma = |\Delta A_{BO}^{II} - \Delta A_{BO}^I|. \quad (4)$$

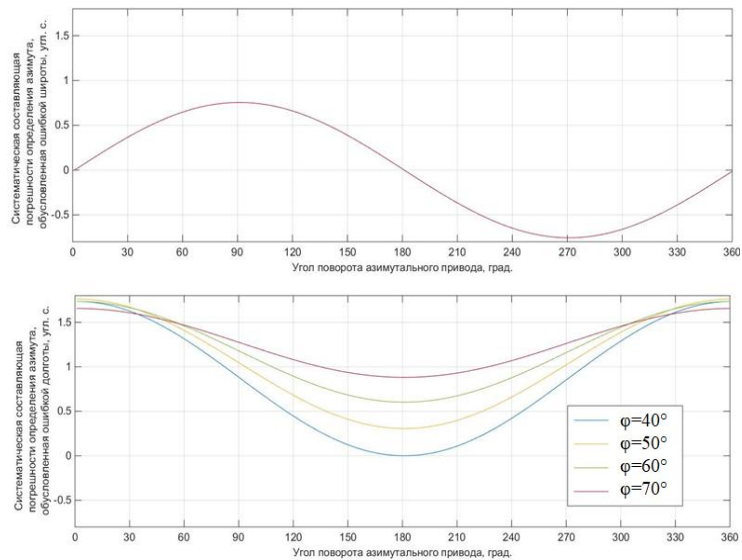


Рис. 4. Значения систематических составляющих погрешности определения азимута в зависимости от широты места и угла поворота азимутального привода относительно плоскости меридиана

При $h_{\text{BO}} = 40^\circ$ случайная составляющая погрешности определения опорных значений угла поворота $\sigma_\gamma = 0,57''$. Составляющая погрешности $\Delta\gamma$ зависит от угла поворота АП относительно плоскости меридиана и шага поворота АП в процессе калибровки.

При исследовании погрешностей определения опорных значений угла поворота в процессе калибровки по наблюдениям звезд в околосенитной области было проведено моделирование процесса астрономических наблюдений, которое подробно описано в работе [11].

На рис. 5 представлены результаты расчета погрешностей определения опорных значений угла поворота при различном количестве кадров в каждом положении АП N_k и количестве наблюдаемых звезд в каждом кадре $N_{\text{зв}}$. Предложенный алгоритм калибровки, в отличие от рассмотренного ранее, не зависит от шага поворота АП, а следовательно, не имеет систематической составляющей погрешности. По представленным результатам можно сделать вывод, что погрешность определения опорных значений угла поворота уменьшается пропорционально увеличению N_k и $N_{\text{зв}}$.

В околосенитной области определение опорных значений углов поворота может быть обеспечено с СКО σ_γ на уровне $0,5''$ при $N_k = 300$ и $N_{\text{зв}} = 20$, и на уровне $0,3''$ при $N_{\text{зв}} = 40$.

Таким образом, алгоритм калибровки датчика угла АП по наблюдениям звезд в околосенитной области обладает преимуществами по сравнению с алгоритмом калибровки по наблюдению звезд вблизи круга равных высот (меньшее значение СКО σ_γ и отсутствие систематической погрешности $\Delta\gamma$).

Заключение. Исследованы погрешности определения опорных значений угла поворота азимутального привода по данным астрономических наблюдений в околосенитной области и вблизи круга равных высот.

По результатам сравнительного анализа сделан вывод, что алгоритм калибровки по наблюдениям звезд в околосенитной области обладает потенциально более высокой точностью, не имеет систематической составляющей погрешности определения опорных значений угла поворота, зависящей от шага поворота азимутального привода, и его следует использовать при калибровке датчика угла азимутального привода автоматизированного астрономического универсала.

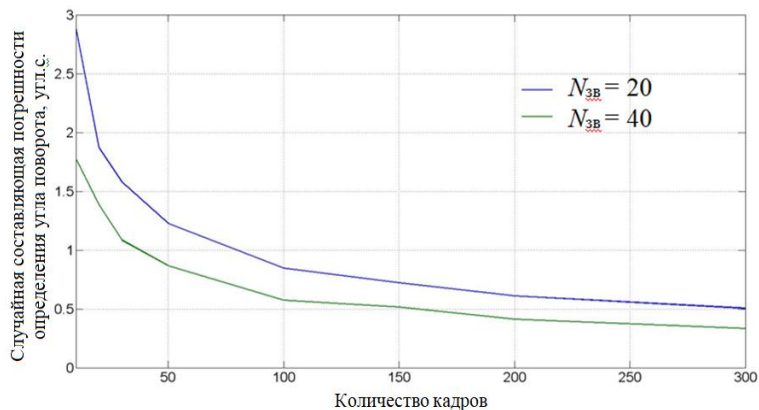


Рис. 5. Погрешность определения опорных значений угла поворота при наблюдениях звезд в околосенитной области

ЛИТЕРАТУРА

1. Глазунов А.С. Современные тенденции в геодезической астрономии // Интерэкспо Гео-Сибирь. Новосибирск: СГГА, 2008. С. 183-188.
2. Тарасов С.М. Исследование влияния инструментальной погрешности автоматизированного астроуниверсала в задаче определения азимута наземного ориентира // Гироскопия и навигация. Том 29. №2 (113), 2021. С. 97-109.
3. Бохман Е.Д., Иванов П.А., Ларичев Р.А., Николаев М.С., Павлов П.А., Филатов Ю.В., Беркович С.Б., Котов Н.И. Автоматизированная углоизмерительная система для передачи направлений // Гироскопия и навигация. – 2019. – №2. – С. 95-105.
4. Кирьянов В.П. Высокоточные системы контроля углоизмерительных структур на прозрачных носителях // Интерэкспо Гео-Сибирь. Новосибирск: СГУГиТ, 2005. С. 81-90.
5. Куприянов В.В., Девяткин А.В. Калибровка углоизмерительных инструментов по ПЗС-наблюдениям звездных площадок // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – №4. – С. 8 – 15.
6. 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.
7. Блажко С.Н. Курс практической астрономии.//М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979,с.393-408.

8. **Копчинский И.Г.** Оптическая нестабильность земной атмосферы при наблюдении звезд – Киев: Наукова думка, 1967. 184 с.
9. **Сычев В.В.** Влияние атмосферы на качество изображения в оптических телескопах // Наука и образование: Научное издание МГУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. - №5. – С. 26. – DOI 10.7463/0512.0414002
10. **Тарасов С.М., Цодокова В.В.** Исследование влияния характеристик оптико-электронного блока автоматизированного астрономического универсала на точность определения азимута наземного ориентира // Материалы XXIII конференции молодых ученых «Навигация и управление движением» с международным участием . СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2021. С. 22-25.
11. **Tarasov S.M.** Calibration of the azimuth drive angle sensor of the mobile automated astronomical system by stars observation // The International Workshop on Navigation and Motion Control. 2021.

S.M. Tarasov, V.V. Tsodokova (Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg). **The comparative analysis of the azimuth drive angle sensor calibration algorithms by stars observation**

This work describes the analysis of the reference azimuth drive rotation angle determination errors by stars observation in the circumzenithal and almucantar areas. Based on the results of modeling, the comparative analysis of considered calibration algorithms is carried out.

УДК 629.7.054.07

В. П. НАУМЧЕНКО, П. А. ИЛЮШИН, Д. Г. ПИКУНОВ
(Филиал АО «ЦЭНКИ» - «НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова», Москва)**СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ УГЛОВ ОРИЕНТАЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ БЛОКОВ**

Рассмотрен подход построения автономного алгоритма определения начальной ориентации инерциальных измерительных блоков, основанный на применении оптимизационного математического аппарата. Алгоритм позволяет проводить угловую выставку инерциальных блоков различного класса точности и подбирать оптимальный метод статической оптимизации.

Введение. Особенностью эксплуатации инерциальных навигационных систем (ИНС) является необходимость их начальной выставки. Автономная выставка совершается по показаниям инерциальных измерительных элементов, которые объединяются в инерциальные измерительные блоки (ИИБ), являющиеся наряду с цифровым вычислителем главными подсистемами ИНС [1]. Информационный выход ИИБ в первую очередь содержит вектор кажущегося ускорения и вектор угловой скорости, измеряемые инерциальными датчиками.

Вопрос автономности критически важен при навигации ракет космического назначения, когда системы управления строятся на базе ИНС без применения иных корректирующих систем. Очевидно, что начальная ошибка решения навигационной задачи будет определяться погрешностью начальной выставки ориентации ИИБ, поскольку координаты и скорости в местах запуска известны с геодезической точностью. В работе рассматривается способ физической начальной угловой выставки ИИБ платформенного типа на базе аппарата статистической многофакторной оптимизации. Рассматриваемый способ в полной реализации совмещает в себе этапы горизонтирования и гирокомпасирования, являющимися основными этапами угловой выставки.

Предлагаемый алгоритм выставки. Подходы, осуществляемые при начальной выставке ИНС широко известны в технической литературе [2-7] и реализуются на базовом принципе измерения векторов ускорения свободного падения и угловой скорости вращения Земли, проекции которых на оси чувствительности инерциальных датчиков зависят от ориентации платформы. То есть, приведение платформы в такое угловое положение, которое обеспечивает оптимальность показаний инерциальных датчиков и соответствует решению задачи выставки. Под оптимальностью в данном случае будем понимать совмещенность осей географического сопровождающего базиса и базиса, образованного ортогональной триадой осей инерциальных датчиков с погрешностью, не превышающей заданной требованием к точности начальной выставки. Использование конструкции ИИБ в виде конуса не позволяет решить указанную задачу в явном виде, ввиду невозможности прямого физического совмещения базисов. В этом случае для совмещения последних необходимо производить пересчет показаний датчиков ИИБ в географический базис, что реализуемо в программном виде.

Такой подход к построению алгоритма начальной выставки в высокой степени схож с оптимальным синтезом систем автоматического управления, когда создаваемая система должна обладать наилучшими в некотором смысле качествами с точки зрения минимизации функционала от величин, характеризующих состояние системы.

Общая структура оптимизационной модели может быть записана следующим образом:

$$\mathbf{x}^* = \arg \min_{\mathbf{x} \in X} \mathbf{f}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}), \quad \mathbf{g}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\xi}) \leq 0, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} = (\psi \ \vartheta \ \gamma)^T$ – вектор углов ИИБ (курс, тангаж, крен); $\mathbf{x}^* = (\psi^* \ \vartheta^* \ \gamma^*)^T$ – вектор углов ИИБ, соответствующих ориентации модельного географического трёхгранника; $\boldsymbol{\xi}$ – шумы гироскопов и акселерометров; $\mathbf{f} = (A^1 \ A^2 \ A^3 \ G^1 \ G^2 \ G^3)^T$ – вектор показаний акселерометров A^i и датчиков угловой скорости G^i ; $\mathbf{g} = (t_{max} \ \Delta \boldsymbol{\varepsilon})^T$ – вектор ограничений по

максимально допустимому времени выставки t_{max} и допустимой ошибке выставки $\Delta \boldsymbol{\varepsilon} = (\psi - \psi^* \quad \vartheta - \vartheta^* \quad \gamma - \gamma^*)^T$.

Алгоритм заканчивает работу при $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$ с точностью до $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$, когда два акселерометра расположены в плоскости горизонта, третий – направлен по линии действия ускорения силы тяжести, а оси чувствительности двух горизонтальных гироскопов ориентированы на Север и Восток. Другое условие окончания работы алгоритма при достижении лимита времени t_{max} ,

Вычисления углов поворота может выполняться на базе различных оптимизационных методов [8]. Причем выбор того или иного метода оптимизации способствует увеличению быстродействия или точности выставки, или установлению некоего компромисса между ними. Для примера рассмотрим алгоритм, построенный на основе метода градиентного спуска с переменным шагом:

$$\begin{aligned} \mathbf{W}_{k+1} &= \mathbf{W}_k + \mu \mathbf{p}_k \\ \mathbf{p}_k &= -\mathbf{g}_k + \beta_k \mathbf{p}_{k-1} \\ \mathbf{g}_k &= \nabla \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{W}_k), \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{W}_k = (A_k^1 \quad A_k^2 \quad A_k^3 \quad G_k^1 \quad G_k^2 \quad G_k^3)^T$ – вектор показаний акселерометров A_k^i и датчиков угловой скорости G_k^i на k -ом шаге работы алгоритма; $\mu \in (0; 1]$ – коэффициент скорости поиска экстремума, подбираемый при настройке алгоритма; \mathbf{p}_k – направление поиска экстремума; \mathbf{g}_k – градиент показаний датчиков; вектор коэффициентов β_k , зависящих от \mathbf{p}_k и \mathbf{g}_k ; $\nabla \boldsymbol{\varepsilon}$ – допустимая ошибка выставки. Способы расчета коэффициентов вектора β_k изложены в [9], среди которых наибольшее распространение получили алгоритм Флетчера-Ривза, алгоритм Полака-Рибьера и алгоритм Хестенса-Штейфеля.

Шумы измерений заключены непосредственно в показаниях датчиков, то есть в векторе \mathbf{W}_k . Если шумы датчиков несмещенные $M[\xi_k] = 0$ и центрированные, имеющие ограничения дисперсии $M[|\xi_k|^2] \leq \sigma^2$, тогда метод сходится в окрестность минимума за счет осреднения показаний датчиков в каждом промежуточном положении платформы. Размеры области минимума тем меньше, чем меньше шаг поиска. При этом ограничение числа итераций приведет к увеличению быстродействия алгоритма, но уменьшит его конечную точность.

Выходом алгоритма является шаг поворота платформы по всем углам. Такой способ позволяет совместить в себе сразу два этапа выставки горизонтирование и гироскопирование. Однако в начальный момент необходимо сделать пробный разворот для выявления направления дальнейшего приближения к требуемому положению платформы. Выбор шага пробного разворота реализуется, как правило, эмпирическим путем, что выявляет негибкость алгоритма на начальном этапе его работы. Наличие информации о широте места позволяет провести сравнение модельных проекции угловой скорости вращения Земли и ускорения свободного падения, измеренных датчиками, для более гибкого подбора начального шага поворота.

Заключение. В работе предложен способ определения начальной ориентации ИИБ на базе оптимизационного подхода. Рассмотрена модель решения оптимизационной задачи на примере метода градиентного спуска с переменным шагом. В перспективе рассматривается построение адаптивного алгоритма, позволяющего проводить настройку вычислений по определенному методу в зависимости от удаления от экстремума.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин Б.С., Тювин А.В., Черноморский А.И., Плеханов В.Е. Проектирование бесплатформенных инерциальных навигационных систем М.: МАИ-Принт, 2009. — 396 с.
2. Липтон А. Выставка инерциальных систем на подвижном основании, главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», М., 1971, 168 с.
3. Емельянец Г.И., Степанов, А.П., Блажнов А.П. О начальной выставке корабельной БИНС в условиях качки // Гироскопия и навигация. 2020. №3. С. 3-17.
4. Ривкин С.С., Ивановский Р.И., Костров А.В. Статистическая оптимизация навигационных систем. – М.: Судостроение, 1976.

5. Салычев О.С., Мкртчян В.И. Подходы к выставке на подвижном основании для бесплатформенной инерциальной навигационной системы авиационного типа различного класса точности // Инженерный журнал: наука и инновации. 2018. №11 (83). С. 1–10.
6. Андреев А.Г., Ермаков В.С., Мафтер М.Б. Модифицированный алгоритм начальной выставки режима приведения МИМСНис «Кама-НС-В» // 27th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, 2020.
7. Анучин О.Н., Емельянец Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов; Под общей ред. чл.-кор. РАН Пешехонова В.Г. - СПб., 1999 – 357 с.
8. Мальшев В.В. Методы оптимизации в задачах системного анализа и управления: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 440 с.
9. Тюменцев Ю.В., Чернышев А.В. Обучение многослойных нейронных сетей прямого распространения: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2012. – 48 с.

V.P.Naumchenko, P.A.Plyshin, D.G.Pikunon (Branch of JSC “CENKI” – Research Institute of applied mechanics named after academician V. I. Kuznetsov, Moscow). **Method for determining the orientation angles of inertial measurement units**

The approach of constructing an autonomous algorithm for determining the initial orientation of inertial measurement units based on the use of optimization mathematical apparatus is considered. The algorithm allows for an angular exhibition of inertial blocks of various accuracy classes, allowing to choose the most optimal method of static optimization.

УДК 629.7.05

Е. А. ПОПОВ
(ООО «НПП «ИТЭЛМА», Москва)

Г. Ю. КИРЯЧЕНКО
(АО «ЦНИИАГ», Москва)

Ю. Г. ЕГОРОВ
(МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОГРАММ ИНВАРИАНТНОЙ КАЛИБРОВКИ ВЕКТОРНОГО ИЗМЕРИТЕЛЯ

Доклад посвящен исследованию различных аспектов, связанных с выбором измерительных положений, в задаче инвариантной калибровки избыточных векторных измерителей (триад акселерометров, датчиков угловой скорости, магнитометров и т.д.).

Приводятся результаты теоретического исследования и математического моделирования.

Введение. Калибровка инерциальных чувствительных элементов и систем на их основе является одним из ключевых этапов подготовки перечисленных устройств к работе. В настоящий момент существует множество подходов к калибровке, подробный анализ которых приводится, например, в [1]. Некоторые из этих подходов используют в качестве измерений непосредственные показания чувствительных элементов, другие – преобразованные значения показаний, в том числе показания инерциальной системы в целом.

В нашем докладе речь пойдет об инвариантной калибровке [2-8] – методе, подразумевающим переход от измеренных проекций векторной физической величины к её модулю. Этот подход позволяет калибровать не только инерциальные чувствительные элементы, но и любые другие устройства, которые измеряют проекции векторных физических величин (например, магнитометры). Такие устройства в рамках доклада называются векторными измерителями.

Основным преимуществом инвариантного подхода является снижение требований к точности установки векторного измерителя в заданное измерительное положение (ИП). В отличие от методов калибровки по измерению проекций вектора, при которых погрешность получаемых оценок линейно зависит от ошибки установки в заданные ИП, погрешность оценок инвариантного метода зависит от квадрата указанной ошибки. Таким образом, при относительно малой точности позиционирования – до 2° , погрешности оценок не превосходят 4 угл. мин. Это позволяет использовать менее точное испытательное оборудование при том же допустимом уровне погрешности оценок параметров векторного измерителя.

При калибровке избыточного векторного измерителя минимально необходимо 9 измерительных положений [4]. Однако использование программ (наборов) с большим количеством ИП позволяет существенно уменьшить погрешность получаемых оценок параметров векторного измерителя.

Известны работы, посвященные синтезу оптимальных [4] (основанных на аналитических методах) и субоптимальных [7] (основанных на численных методах) программ калибровки. Проведенное в [7] сравнение синтезированных программ было недостаточно подробным и может быть расширено развитием идей синтеза программ калибровки, чему и посвящена настоящая работа.

Исследование влияния количества измерительных положений. В работе проведен сравнительный анализ значений обобщенной дисперсии [7,10] (определителя матрицы ковариации ошибок оценок), вычисленной по информационной матрице, для ИП, синтезированных различными методами. Приведена зависимость точности оценок, полученных при различных программах калибровки, от количества ИП, численно определена предельная точность, отнесенная к количеству ИП, а также минимальный набор ИП для его достижения.

Исследование величин дисперсий погрешностей отдельных параметров векторного измерителя для различных программ калибровки подтвердило обратную зависимость точности оценок масштабных коэффициентов от точности оценок неортогональностей осей чувствительных элементов, представляемую ранее [7]. Численно определена величина указанной зависимости для программы из 18 положений. Также отмечено отсутствие изменения точности оценок смещений нулевых сигналов, приведенной к количеству ИП, при различных программах калибровки.

Исследование влияния формы распределения ошибок. В дополнение к моделированию, приведенному в [7], исследованы зависимости статистических характеристик оценок (математическое ожидание, дисперсия, форма распределения) от статистических свойств случайной составляющей измерений. В результате получено, что при нормальном, равномерном и би-нормальном (сформированном как сумма случайных величин, имеющих нормальное и дискретное распределение) распределениях ошибок измерений распределение погрешностей оценок стремится к нормальному, а отношения их дисперсий, приведенные к количеству ИП, совпадают. Однако при ограниченном распределении Коши ошибок измерений гистограммы погрешностей оценок также имеют вид распределения Коши. При этом также отмечена ранее неизвестная зависимость отношений приведенных дисперсий от количества ИП.

Заключение. В докладе развиваются идеи предыдущих работ авторов, позволяющие ответить на различные вопросы, возникающие при выборе измерительных положений при калибровке векторных измерителей (триад акселерометров, датчиков угловой скорости, магнитометров и т.д.).

Вычисляемая предельная точность калибровки, приведенная к количеству ИП, позволяет уравнивать и оптимизировать существующие программы по времени набора измерений (при условии, что среднеквадратическое отклонение случайной составляющей измерений убывает пропорционально корню из времени осреднения в одном положении).

Обратная зависимость точности оценивания масштабных коэффициентов от неортогональностей подтвердила необходимость введения расширенного критерия оптимизации для более гибкой его настройки, что позволяет синтезировать программы калибровки приборов различного назначения.

Получаемые ранее оценки точности при математическом моделировании в [7] справедливы для нормального, равномерного и би-нормального распределений случайной составляющей измерений. Причины возникновения отличных от теоретических соотношений между погрешностями оценок параметров векторного измерителя, наблюдающихся при различных формах распределений ошибок измерений, являются одним из возможных направлений дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Водичева Л.В., Парышева Ю.В.** Оценка точностных параметров датчиков бесплатформенного инерциального измерительного блока с помощью относительно грубого поворотного стола // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. № 2 (105). С. 162–178.
2. **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.
3. **Тарановский Д.О.** Стендовая калибровка блока маятниковых поплавковых акселерометров корабельной инерциальной навигационной системы // Гироскопия и навигация. 2008. № 4 (63). С. 65.
4. **Акимов П.А., Деревянкин А.В., Матасов А.И.** Гарантирующий подход и 11-аппроксимация в задачах оценивания параметров БИНС при стендовых испытаниях. М.: Издательство Московского университета, 2012. 296 с.
5. **Егоров Ю.Г., Попов Е.А.** Исследование минимально избыточных программ калибровки триады акселерометров // Авиакосмическое приборостроение. 2016. №6. С. 3–8.
6. **Егоров Ю.Г., Попов Е.А.** Анализ погрешностей скалярной калибровки векторного измерителя // Гироскопия и навигация. 2020. №4 (111). С. 37–52.
7. **Егоров Ю.Г., Киряченко Г.Ю., Попов Е.А.** Синтез субоптимальных программ калибровки блока акселерометров численными методами // Гироскопия и навигация. Том 29 №2 (113), 2021г. с. 47 – 58
8. **Crassidis, J.L., Cheng, Y.,** Three-Axis Magnetometer Calibration Using Total Least Squares, AIAASciTechForum, 2020.

9. **Егоров Ю.Г. Попов Е.А. Кирыченко Г.Ю.** Применение генетического алгоритма оптимизации в задаче выбора измерительных положений при калибровке блока акселерометров// Авиакосмическое приборостроение 2019г. вып.8 С.13-19
10. **Fedorov, V.V.**, *Theory of Optimal Experiments*, Academic Press, New York and London, 1972, 292 p.

E.A. Popov (NPP Itelma Ltd., Moscow), G.Yu. Kiryachenko (CRIAG, Moscow), Yu.G. Egorov (BMSTU, Moscow). **Study of vector meter scalar calibration programs.**

The report is devoted to the study of various aspects related to the choice of measurement positions in the process of scalar calibration of non-redundant vector meters (triads of accelerometers, angular velocity sensors, magnetometers, etc.). The results of theoretical research and mathematical modeling are presented

УДК 681.51

Е. Б. АМБРОСОВСКАЯ

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им В. У. Ленина “ЛЭТИ”,
АО “Навис”, Санкт-Петербург)

Д. В. КАЛИМОВ

(Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет им В. У. Ленина “ЛЭТИ”,
Санкт-Петербург)

ДАТЧИК ТИПА “НАТЯНУТЫЙ ТРОС” В СИСТЕМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ – АНАЛИЗ НАТУРНЫХ ДАННЫХ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА ПОГРЕШНОСТИ

Производится анализ натуральных данных системы динамического позиционирования - датчика типа «натянутый трос» (Taut Wire), производится анализ его работы на разных глубинах и оценка частотных свойств погрешности. Рассмотрена погрешность датчика относительно сигнала GPS. Приводится среднеквадратичное значение и анализируются ее частотные свойства.

Введение. Системы динамического позиционирования (СУ ДП) используются в настоящее время для широкого класса судов. В основном это суда обеспечения, буровые суда, суда, обслуживающие ветроэнергетические установки, кабелеукладчики, земснаряды. В настоящее время наблюдается спад в нефтяной отрасли, требуется меньше количество судов обеспечения и судов, развозящих персонал на нефтяные вышки. В Европе и в мире в целом наблюдается подъем в области добычи газа, а также в оффшорной ветроэнергетике – особенно в Европе. При работе вблизи таких конструкций в режиме ДП требуется иметь работающие на различных физических принципах системы определения местоположения. При этом развертывание гидроакустических систем или даже установка лазерных и микроволновых радаров, использование которых характерно для работы у нефтяных и газовых платформ, может быть невозможна. Поэтому используют не очень точные, но достаточно надежные на небольших глубинах (30-50-100 метров) датчики типа «натянутый трос».

Датчик типа «натянутый трос». Датчик типа «натянутый трос» [1,2] состоит из лебедки с барабаном для троса с измерителем длины вытравленного троса, карданова подвеса (gimbal head), в котором установлены датчики углов (инклинометры), а также из груза, который опускается на дно. Вес груза составляет 500-1000 кг. При позиционировании судна в некоторой области груз опускается на дно, при движении судна трос разматывается, автоматически управляемая лебедка поддерживает постоянное натяжение в рабочем режиме. В некоторых конструкциях предусмотрен пневмокомпенсатор [2]. Измеряя длину троса L и два угла (традиционно эти углы называют outboard angle α и right angle β) может быть вычислено положение судна относительно груза. Считая груз неподвижным, можно считать, что измеряется положение судна (то есть это относительная система измерения местоположения). Датчики типа «натянутый трос» производятся несколькими компаниями, отличаются конструкцией, номинальным значением натяжения, массой груза, используемыми датчиками углов. Датчики работают при глубине до 200 метров, но на глубинах более 100 метров погрешность уже достаточно велика и увеличивается влияние течения на погрешность [1]. При работе датчика область маневрирования судна относительно груза определяется допустимым изменением углов α и β (под борт до 5 градусов, от борта до 25 градусов, влево-вправо до 20 градусов).

Анализ погрешности датчика. В литературе не так много источников, в которых анализировалась бы работа датчика типа «натянутый трос» в режимах ДП. Система динамического позиционирования NavDP компании АО Навис (Navis Engineering) разрабатывается с 2000 года, установлена на более чем 200 судов различных классов. Среди них есть и суда, оборудованные датчиком типа «натянутый трос». За годы работы систем получено большое количество натуральных данных, которые позволяют судить об основных особенностях работы датчика типа «натянутый трос».

Настоящая работа посвящена анализу работы этого датчика на разных глубинах, оценки характера погрешности при работе датчика на волнении. Были рассмотрены записи с четырех судов. Рассматривались как маневры при удержании судна в одной точке (рис.1), различные маневры по смещению судна и поворотам, так и при выполнении маневра типа «квадрат», на которых наиболее характерно видны особенности работы датчика.

На рис.1 показано положение центра судна пересчитанное через положение антенны одного из GPS- приемника, на тот же график нанесено положение центра судна, пересчитанное по данным датчика типа натянутый трос.

На рис.2а показана погрешность датчика относительно сигнала GPS (по одной из координат) – фрагмент графика, на котором видны характерные частоты волнения, в том числе высокочастотные колебания, определяемые динамикой системы регулирования натяжения. Спектральные характеристики погрешности в сравнении со спектрами крена и дифферента приведены на рис.2б, определялись также полосы существенных частот [4] и производилось сравнение с динамикой натяжения троса.

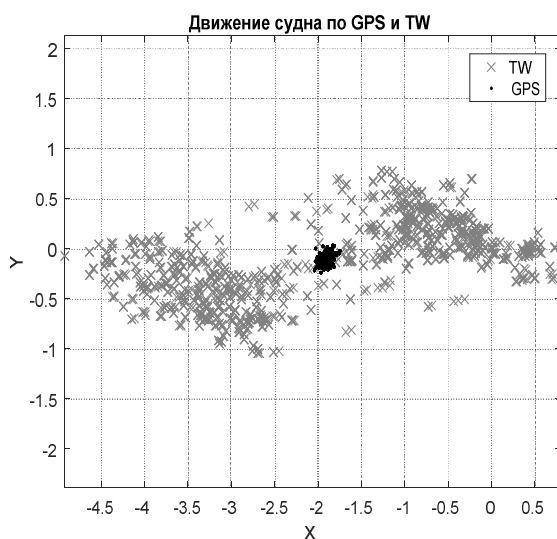


Рис.1. Движение судна по координатам GPS и TW. Удержание в точке

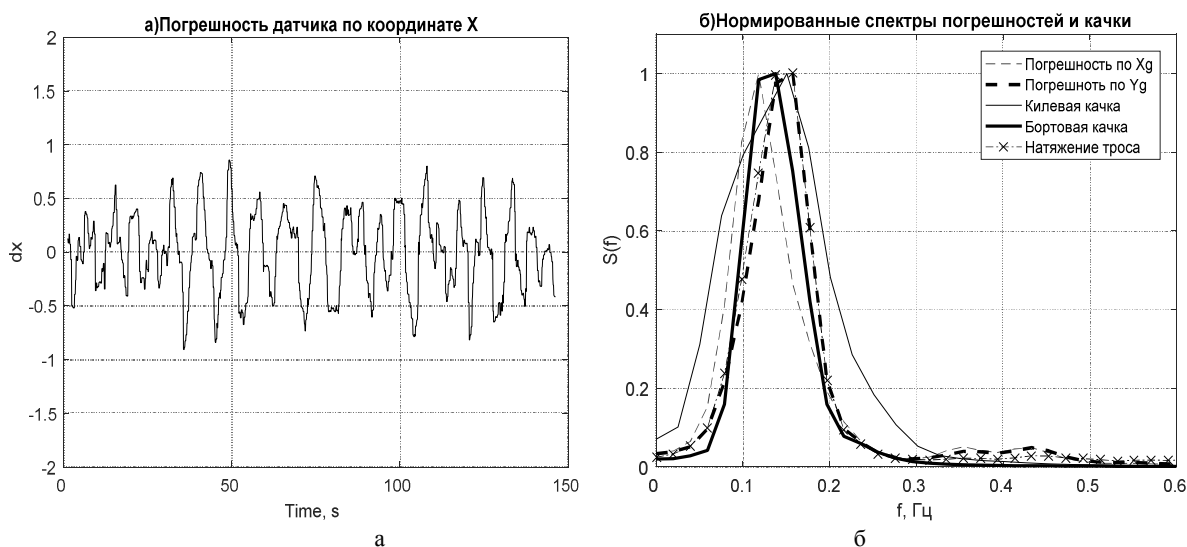


Рис. 2. Погрешность датчика относительно сигнала GPS и ее спектр

Проведен сравнительный анализ погрешности при работе датчика на различных глубинах. На рис.3 показано изменение среднеквадратичного отклонения погрешности от глубины, на рисунке так же нанесена кривая заявленной производителями допустимой погрешности [1].

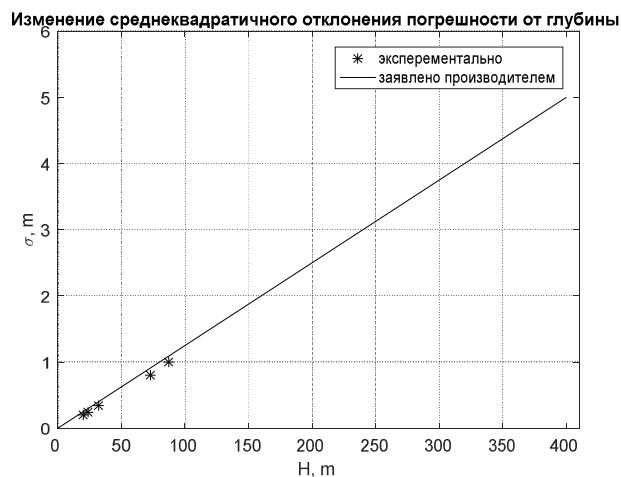


Рис. 3. Изменение среднеквадратичного отклонения погрешности от глубины

Заключение. В работе проведен анализ натурных данных работы датчика типа «натянутый трос» на различных судах в режимах динамического позиционирования, проведен анализ частотных свойств погрешности датчика, а также его погрешности от глубины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Doug Phillips and Brian Haycock. Taut Wire. DP conference, October 14-15, 2014. Алышев.
2. Алышев А.С., Ромаев Д.В., Мельников В.Г., Титов А.М., Коваленко А.Е. Идентификация параметров модели судна по углу крена на симметричных движениях // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2019. Т. 19. № 2. С. 347–358.
3. Nitilaksh Desai, Dynamic Positioning: Method for Disaster Prevention and Risk Management, Procedia.Earth and Planetary Science 11 (2015) 216 – 223.
4. Е. Б. Амбросовская, Д. В. Калимов, Е. В. Попова. Оценивание полосы частот действующего на судно волнового возмущения по результатам экспериментальных данных // Транспорт России: проблемы и перспективы - 2020 : Материалы Юбилейной международной-научно практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 ноября 2020 года / © ФГБУН Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко Российской академии наук, 2020 © Коллектив авторов, 2020. – Санкт-Петербург: Институт проблем транспорта им. Н.С. Соломенко РАН, 2020. – С. 94-99.

E. B. Ambrosovskaya, D.V. Kalimov (St. Petersburg State Electrotechnical University named after V.U. Lenin (LETI), Navis, Saint Petersburg, Russia), D.V. Kalimov (St. Petersburg State Electrotechnical University named after V.U. Lenin (LETI), Saint Petersburg, Russia). **Measurement error analysis of Taut Wire Position reference system in Dynamic Positioning modes**

Paper is devoted to the Sea Trials data processing results. The results of the error of the TW sensor by GPS coordinates and its spectrum are presented. Based on the spectra of the range of errors and pitching, the corresponding conclusions are drawn.

Статистика конференций молодых ученых «Навигация и управление движением»

Год проведения конференции	Дата проведения	Количество участников	Количество докладов (лекций)	Количество докладов (лекций) в сборнике	Количество организаций	Количество городов
1999	6-7 апреля	110	35 (4)	21 (4)	8	2
2000	28-30 марта	154	58 (6)	32 (6)	19	8
2001	12-14 марта	159	61 (3)	32 (2)	25	11
2002	12-14 марта	188	74 (4)	40 (3)	27	10
2003	11-13 марта	183	83 (3)	37 (2)	32	15
2004	16-18 марта	207	87 (4)	44(2)	30	13
2005	15-17 марта	229	83 (4)	47(2)	24	9
2006	14-16 марта	245	98 (4)	58(2)	34	12
2007	13-15 марта	235	106 (3)	57(2)	30	10
2008	11-14 марта	221	100 (3)	68(3)	41	15
2009	10-12 марта	240	99 (4)	60(4)	32	10
2010	16-19 марта	282	127 (3)	58(2)	44	14
2011	15-18 марта	292	138 (3)	59(3)	46	17
2012	13-16 марта	306	141 (3)	72(3)	41	16
2013	12-15 марта	302	141, из них 1 обзорный (3)	63(3)	48	13
2014	11-14 марта	318	135 (4)	58(2)	41	10
2015	17–20 марта	332 (в т.ч. 8 зарубежных)	155(4)	78(3)	38 (в т.ч. 2 зарубежных)	14 (в т.ч. 2 зарубежных)
2016	15-18 марта	353 (в т.ч. 14 зарубежных)	182(4)	95 (2)	46 (в т.ч. 3 зарубежных)	20 (в т.ч. 3 зарубежных)
2017	14-17 марта	313 (в т.ч. 6 зарубежных)	149 (4)	91 (3)	40 (в т.ч. 3 зарубежных)	17 (в т.ч. 3 зарубежных)
2018	20-23 марта	400	153 (4)	145 (4)	55 (в т.ч. 5 зарубежных)	18 (в т.ч. 8 зарубежных)
2019	19-22 марта	389 (в т.ч. 11 зарубежных)	151 (3)	127 (3)	36 (в т.ч. 5 зарубежных)	11 (в т.ч. 6 зарубежных)
2020	17-20 марта	300 (в т.ч. 4 зарубежных)	129 (3)	114 (0)	53 (в т.ч. 5 зарубежных)	16 (в т.ч. 5 зарубежных)
2021	16-19 марта	309(в т.ч. 5 зарубежных)	112(3)	101(0)	50 (в т.ч. 2 зарубежные)	12 (в т.ч. 2 зарубежных)
2022	15-18 марта	250 (в т.ч. 9 зарубежных)	105(3)	91(0)	36	12