



Научно-технический
журнал по вопросам
разработки и
производства
инновационной
продукции

Лицензионный договор
№ 285-1/2021 (НЭБ)

Журнал выходит
2 раза в год

Электронная версия
доступна по адресу
nos.goz.ru/magazine



Адрес редакции:
192012,
г. Санкт-Петербург,
вн.тер.г. муниципальный
округ Рыбацкое,
пр-кт Обуховской
Обороны, д. 120.

E-mail:
nos.mv@goz.ru
Тлф:
8 (812) 207-56-20

РАДИОНАВИГАЦИЯ
И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА
ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»
№ 16 (24) – 2025

АО «Обуховский завод»

Редакционный совет:

Подвязников Михаил Львович, д.т.н., доц.
Волокитина Ирина Николаевна, к.э.н.
Долбенков Владимир Григорьевич, к.т.н.
Брагин Алексей Юрьевич, к.э.н.
Король Виктор Михайлович, к.т.н.

Главный редактор

Баушев Сергей Валентинович, д.в.н., проф.
Заместитель главного редактора
Сайбель Алексей Геннадиевич, д.т.н., доц.
Технический редактор
Васильева Людмила Николаевна

Редакционная коллегия:

Безлепкин Николай Иванович, д.ф.н., проф.
Гаврилов Роман Сергеевич, к.т.н.
Геворкян Арвид Грайрович, д.т.н., проф.
Завгородний Александр Федорович, д.и.н., проф.
Зозуля Виктор Михайлович, к.т.н.
Королев Андрей Валерьевич, к.т.н.
Криворучко Юрий Тимофеевич, д.т.н.
Макавеев Александр Тимофеевич, к.т.н.
Марченко Борис Иванович, д.т.н., проф.
Синицын Евгений Александрович, д.т.н., проф.
Фёдоров Дмитрий Александрович, к.т.н.
Фридман Леонид Борисович, д.т.н.
Шатраков Юрий Григорьевич, д.т.н., проф.
Щеглов Дмитрий Константинович, к.т.н., доц.
Яковлев Андрей Вячеславович, д.т.н.

Санкт-Петербург

РАДИОНАВИГАЦИЯ И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ» №16 (24) – 2025: ТРУДЫ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО РЕГИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ». – СПб.: Балтийская печать, 2025. – 120 с. – ил.

Научно-технический журнал **РАДИОНАВИГАЦИЯ И ВРЕМЯ: ТРУДЫ СЗРЦ КОНЦЕРНА ВКО «АЛМАЗ – АНТЕЙ»** публикует результаты научных исследований, разработок и производства инновационной продукции в областях организации производства, вооружения и военной техники, радиофизики, организации воздушного движения, радионавигации, радиолокации.

К участию приглашаются сотрудники предприятий оборонного промышленного комплекса, научных и образовательных учреждений Российской Федерации.

Мнение редакции может не совпадать с точкой зрения авторов. Ответственность за достоверность материалов лежит на авторах публикаций.

Отсутствие в статьях сведений, содержащих государственную тайну, подтверждается наличием соответствующих Заключений о возможности опубликования с предприятий.

Журнал рассчитан на широкий круг специалистов.

© АО «Обуховский завод», 2025



Уважаемый читатель!

Очередной номер нашего журнала открывает статья *доктора технических наук И.Ю.Блинова и его ученика А.Ю.Моргунова* «Требования и особенности построения перспективных судовых навигационных комплексов», которая носит характер внешнего проектирования навигационно-связных комплексов – обосновывается состав выполняемых функций и обсуждаются вопросы их интеграции в систему мониторинга и обеспечения безопасности на море, и в частности, в Арктике.

В феврале 2025 года на 85 году ушел из жизни член редакционной коллегии и двух диссертационных советов *доктор технических наук профессор Калашиников Вадим Серафимович* – специалист в области проектирования фазированных антенных решеток и макроскопической электродинамики. В 2022 году Вадим Серафимович издал учебное пособие «Введение в макроскопическую электродинамику. Методы расчета полей». В текущем номере журнала редакция публикует его статью «Компенсация погрешностей измерения амплитудной диаграммы направленности антенн методом дальней зоны при «конечных» размерах измерительного стенда», в которой автор обобщает свой многолетний опыт экспериментальных исследований и выдает рекомендации по компенсации, с помощью ранее эмпирически полученных выражений, погрешности измерений методом дальней зоны в ситуациях, когда не удастся разнести зонд и исследуемую антенну на расстояние, при котором можно не учитывать размеры области, в которой в процессе измерений перемещается исследуемая антенна.

Статью аспиранта Хохлачева С.П., докторов технических наук Самонина В.В., Подвизникова М.Л. и кандидатат технических наук Спиридоновой Е.А. «Аддитивные технологии как новый подход к формообразованию блочных сорбционно-активных изделий» целесообразно охарактеризовать как аналитический обзор с обоснованием перспективных методов получения блочных сорбционно-активных изделий, используемых в статических и динамических условиях для целей защиты человека и техники. Рекомендуется переход к блочному исполнению сорбционных изделий, что позволит повысить прочность адсорбционного материала, снизить перепад давления, в результате чего повысить эффективность процессов очистки. С помощью аддитивных

технологий возможно создание блочных изделий сложных геометрий под конкретные задачи с заданным перепадом давления и распределением скоростей потока.

Большой коллектив авторов (*Афанасьев В.Б., Медведев В.М., Остапенко С.Н., Синельников А.О., Романов П.С., Тихменев Н.В., Ушанов А.А., Болотнов С.А., Бакутин С.А., Назаров С.И., Коротицкий Е.В.*) по итогам обширных экспериментальных исследований подготовил статью «Исследование параметров кольцевого лазера при воздействии внешних возмущений». Предложено использовать в направленном бурении скважин в качестве датчиков угловых перемещений в пространстве кольцевые лазеры. Исследованы изменения рабочего режима кольцевого лазера при колебательном внешнем воздействии и характер влияния воздействия на разность частот встречных волн. Рассмотрены возможности уменьшения влияния внешнего колебания на параметры лазера как одного из наиболее значащих факторов.

«Журнал в журнале: аспиранты» в 16-м номере представляет собой подборку четырех статей аспирантов СЗРЦ Концерна ВКО (*Липаков Н.Е. и Столяров И.И.*) и Военной академии воздушно-космической обороны (*Грошев Э.И., Максимович С.В.*), которые фактически завершили свои исследования в рамках работы над кандидатскими диссертациями, а также статьи находящихся на половине пути *Нестеровича А.В. и Мурсалова Д.Л.*

Липаков Н.Е. в статье «Вопросы практического применения алгоритмов автономной синхронизации в группах летательных аппаратов» представил результаты исследования метода автономного навигационного обеспечения группы летательных аппаратов на базе существующей аппаратуры определения взаимных координат в условиях снижения доступности сигналов спутниковых радионавигационных систем.

Столяров И.И. в статье «Метод автоматического управления с автокалибровкой для регулировки мощности сигнала возбуждения в квантовом стандарте частоты» обосновывает применение и исследует на математической и имитационной моделях оригинальный метод управления мощностью сигнала лазерного возбуждения с целью компенсации воздействия на атомно-лучевые КСЧ негативных внешних факторов, отыскивая оптимальное значение управляемого параметра.

Грошев Э.И. с научным руководителем доктором технических наук профессором *Жиронкиным С.Б.* представили статью «Объединение разнородных средств опознавания в зенитной ракетной системе с использованием мягких частных решений и искусственной нейронной сети», где с целью повышения достоверности государственного опознавания воздушных объектов предложили комплексирование информации от разнородных радиоэлектронных средств, которая может содержать сведения о государственной принадлежности опознаваемого объекта не в полной мере, например в данной статье показана возможность повышения достоверности опознавания воздушных объектов в зенитной ракетной системе за счёт объединения и комплексной обработки информации от запросчиков единой системы государственного опознавания и объединенной системы связи, навигации, обмена данными и опознавания. Для обработки интегрированной информации предложен вариант использования искусственной нейронной сети с мягкими частными решениями.

Максимович С.В. также предлагает применять нейронную сеть в «Алгоритме многопризнакового распознавания на основе калмановской фильтрации и нейронной сети» для распознавания классов летательных аппаратов «самолет с турбореактивным

двигателем – самолет с турбовинтовым двигателем – вертолет – ракета – беспилотный летательный аппарат» «поверх» калмановской фильтрации. Алгоритм предназначен для использования в радиолокационных станциях противовоздушной обороны.

Аспиранты *Нестерович А.В. и Мурсалов Д.Л.* представили решение задачи определения коэффициента разнотональности посадочной радиомаячной группы с использованием беспилотного летательного аппарата на основе анализа ряда Фурье огибающей сигналов. Приведены результаты математического моделирования радиосигнала посадочной радиомаячной группы и расчета коэффициента разнотональности. Предложена конфигурация оборудования беспилотного летательного аппарата и приводятся результаты верификации реализации на контрольно-проверочной аппаратуре.

Ярко выраженную практическую направленность имеет статья ведущего инженера *Польщикова К.А.* «Особенности применения электронной компонентной базы в космических программах иностранных государств». Актуальность темы вызвана необходимостью совершенствования отечественных руководящих документов в области применения электронной компонентной базы в космической технике. Ранее редакция уже обращалась к этой теме (*Ванюков С.М., Тананыкина Л.В.* «Роль испытаний электронной компонентной базы на стойкость к ионизирующим излучениям космического пространства при управлении качеством и надежностью ракетно-космической техники» // Труды СЗРЦ Концерна ВКО «Алмаз – Антей»: Радионавигация и время. 2022. № 9). С целью изучения опыта зарубежных коллег в статье анализируется нормативно-правовая база ряда космических агентств, фактический материал которой представлен на основании изучения информации сайтов космических агентств *NASA, ESA, CNSA*.

Завершающий раздел «Листая старые страницы» 16-го номера журнала содержит результаты больших исторических изысканий *докторов технических наук Сайбеля А.Г. и Геворкяна А.Г.* В статье «Интернет – правнук оптического телеграфа» авторы проводят исторические параллели современных средств и способов общения, или передачи информации сейчас и в незапамятные столетия. Пожалуй, наибольший интерес эта статья представляет в плане анализа развития инженерной мысли, решающей постоянно возникающие все новые трудности на пути движения к совершенству.

Доктор военных наук, профессор
С.В.Баушев

Содержание

Блинов И.Ю., Моргунов А.Ю.

Требования и особенности построения перспективных судовых навигационных комплексов 7

Калашиников В.С.

Компенсация погрешностей измерения амплитудной диаграммы направленности антенн методом дальней зоны при «конечных» размерах измерительного стенда 13

Афанасьев В.Б., Медведев В.М., Остапенко С.Н., Синельников А.О., Романов П.С., Тихменев Н.В., Ушанов А.А., Болотнов С.А., Бакутин С.А., Назаров С.И., Коротыцкий Е.В.

Исследование параметров кольцевого лазера при воздействии внешних возмущений 19

Хохлачев С. П., Самонин В. В., Спиридонова Е. А., Подвязников М.Л.

Аддитивные технологии как новый подход к формообразованию блочных сорбционно-активных изделий 33

Статьи аспирантов и соискателей*Липаков Н.Е.*

Вопросы практического применения алгоритмов автономной синхронизации в группах летательных аппаратов 49

Столяров И.И.

Метод автоматического управления с автокалибровкой для регулировки мощности сигнала возбуждения в квантовом стандарте частоты 59

Грошев Э.И., Жиронкин С.Б.

Объединение разнородных средств опознавания в зенитной ракетной системе с использованием мягких частных решений и искусственной нейронной сети 67

Максимович С.В.

Алгоритм многопризнакового распознавания на основе калмановской фильтрации и нейронной сети 73

Нестерович А.В., Мурсалов Д.Л.

Определение коэффициента разнослышимости посадочной радиомаячной группы на базе беспилотного летательного аппарата 81

Польщиков К.А.

Особенности применения электронной компонентной базы в космических программах иностранных государств 91

Листая старые страницы*Сайбель А.Г., Геворкян А.Г.*

Интернет – правнук оптического телеграфа 100

УДК 621.01:623

ТРЕБОВАНИЯ И ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ СУДОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Блинов И.Ю., Моргунов А.Ю.

В статье приводятся современные особенности, которые необходимо учитывать при построении судовых навигационно-связных комплексов (НСК). Определен перечень задач, решаемых такими комплексами. Обоснована необходимость их интеграции в систему мониторинга и обеспечения безопасности на море, и в частности, в Арктике. Приводятся технические требования, которые могут послужить основой для проектирования перспективных НСК.

Ключевые слова: навигационно-связной комплекс; геопро пространственная информация; мониторинг судов; безопасность на море.

Введение

Геополитические трансформации, тенденции их развития, непрерывно усложняющаяся помеховая обстановка при приеме сигналов глобальных навигационных спутниковых систем, опыт проводимых военных операций, расширение интересов многих стран в Арктической зоне, экономические и технологические ограничения существенно повысили требования к качеству и доступности геопро пространственной информации. При этом особую значимость приобретает влияние геопро пространственной информации на сферу безопасности, и в частности безопасности на море.

Информационные системы, являющиеся значимой компонентой безопасности международного, федерального и муниципального уровней, базирующиеся в основном на иностранном оборудовании, программном обеспечении, электронной компонентной базе, перешли в критическое состояние.

При этом количество потребителей услуг информационных систем увеличивается, и не только в традиционных сферах и территориях, но и в Арктической зоне. Например, компанией Атомфлот, по состоянию на 21 декабря 2023 года, за 2023 год по Северному морскому пути были перевезены рекордные 35 миллионов тонн грузов. В современной истории рекорд перевозок по СМП был поставлен в 2021 году: было перевезено 34,9 млн тонн. По плану развития СМП, утвержденному Правительством Российской Федерации и в соответствии с майскими указами Владимира Путина в следующем году грузопоток должен составить 80 млн. тонн, а к 2030 году – 150 млн. тонн [1].

Одними из основных элементов информационных систем являются системы связи и передачи данных, координатно-временные системы и системы навигации. Для обеспечения деятельности рыбопромысловых судов и выполнения ими требований законодательства при ведении промысла остается открытым вопрос разработки, создания и оснащения судов рыбопромыслового флота навигационно-связными сред-

ствами на основе использования сигналов навигационных систем наземного и космического базирования.

НСК должна строиться в виде модульной системы, предназначенной для спасения экипажей кораблей при неблагоприятных сценариях, а также для контроля и противодействия незаконному, неучтенному, нерегулируемому промыслу водных биологических ресурсов (далее – ННН промысел).

1 Особенности судовых навигационно-связных комплексов. Задачи и функции

Ключевыми задачами создания НСК являются обеспечение контроля положения рыбопромысловых судов в режиме реального времени и мониторинг вылова водных биологических ресурсов.

Северное полушарие признано уязвимым для спутниковых систем позиционирования из-за ионизации атмосферы (полярное сияние), что осложняет использование космических навигационных систем (КНС) в Арктике (акватория Севморпути). Кроме того, в КНС возможно осуществление подмены координат (спуфинг), при этом в системе позиционирования будут отображаться ложные координаты, либо зашумление сигнала (джамминг), что делает невозможным прием навигационных сигналов.

Таких недостатков лишены радионавигационные системы, основанные на принципе определения местоположения объекта с помощью наземных передатчиков радиосигнала. Несмотря на вытеснение радиотехнических систем дальней навигации (РСДН) в массовом потребительском сегменте спутниковыми системами ГЛОНАСС/GPS, РСДН имеют ряд преимуществ.

В состав модуля НСК входит система получения и передачи координат судна, сигналов бедствия, а также специализированное программное обеспечение, позволяющее обеспечить передачу данных в некорректируемом виде оперативному дежурному геоинформационной системы (ГИС) «Отраслевая система мониторинга». Передача сигналов бедствия возможна как в ручном, так и в автоматическом режиме. В случае потери сигнала РСДН модуль использует спутниковую навигацию ГЛОНАСС/GPS.

Модульная система необходима для создания нескольких классов устройств, от компактного радиоприбора с низким энергопотреблением (маломерные суда), так и полноразмерные комплексированные устройства, объединяющие в себе несколько системотехнических решений. Модули должны включать следующие компоненты и функции:

- определение координат судна;
- отправка исходящей информации на территорию Российской Федерации (включая не только географические координаты и сигналы бедствия, но и короткие сообщения, которые сейчас отправляются через другие системы, например судовые суточные донесения или передача сообщений, подаваемых на 15-е и последнее число каждого месяца, передача ежеквартальной статистической отчетности, передача данных о местоположении судов рыбопромыслового флота);
- прием входящей информации с территории Российской Федерации;
- обеспечение резервного автономного питания;
- ведение электронного журнала (регистратор, осуществляющий функцию ве-

дения журнала событий) с указанием географических координат и времени события в национальной шкале времени Российской Федерации *UTC(SU)*, а также коротких сообщений (при наличии такой технической возможности) [3].

При этом комплексированное устройство может предусматривать интеграцию с различными датчиками, включая средства контроля за работой разрешенных рыбопромысловых снастей (например, использование трала), датчиков крена, индикаторов работы судового двигателя и движителей (корабельных пропульсивных систем), что позволит вместе с передачей текущих географических координат обеспечить передачу коротких сообщений, включающих указанную телеметрическую информацию.

Для противодействия ННН промыслу модули должны включать в себя следующий функционал:

- система определения координат должна усложнять искажение получаемых координат, оценивать их точность и факты воздействия (снятие с мест креплений, включение средств подавления радиосигнала и т.д.);

- использование в технических средствах контроля (ТСК, самоходные суда с главным двигателем мощностью более пятидесяти пяти киловатт и валовой вместимостью более восьмидесяти тонн) открытых сетей связи (3G/4G) ввиду угрозы перехвата информации представляется нецелесообразным. Кроме того, радиопокрытие сотовой связи отсутствует в ряде регионов Дальнего Востока и акватории Северного морского пути. При этом целесообразно проработать вопрос об использовании *SDR* (*Software-defined radio*) – программно определяемая радиосистема;

- для недопустимости изменения данных необходимо использование электронных подписей целостности данных;

- подпись внешних сообщений с добавлением времени подписи из устройства (для осложнения ретроспективной подписи данных «задним числом»);

- интеллектуальное определение нештатных ситуаций (от смены характера вибраций до выхода крена (тангажа) за типичные величины);

- возможность интегрирования с другими системами судна и другими техническими средствами контроля;

- использование стандартных интерфейсов, например, выход *NMEA* сигнала навигации как альтернатива спутниковым навигационным системам и т.д.;

- передача сообщений и истории перемещений от устройств меньшего форм-фактора к большему для дальнейшей агрегированной отправки через спутниковые каналы связи при их доступности и наоборот;

- возможность реализации функционала низкобюджетного АИС с ГЛОНАСС для маломерных судов (таких устройств-терминалов нет в Российской Федерации).

Необходимые форм-факторы НСК:

- для маломерных судов (максимально компактное и дешевое устройство с низким энергопотреблением);

- для судов среднего класса;

- для больших судов, эксплуатируемых в сложных рыбопромысловых районах,

– комплексированное изделие. Может включать в себя интеграцию с системами ГЛОНАСС/*GPS* навигации и др., модулем систем низкоорбитальной отечественной спутниковой связи «Гонец», Ситроникс, Бюро 1440 и др.

2 Перспективный облик. Общая потребность

Основными принципами, которые будут отличать перспективный НСК от существующих (в том числе иностранных), станут опциональное наполнение функционалом, подключение к общему информационному полю и унификация:

- интеграция информационных и функциональных возможностей комплексов и систем бортового оборудования;
- автоматизация решения навигационных и ряда специальных задач;
- обеспечение ситуационной осведомленности и информационной поддержки;
- автономная федеративная обработка данных от источников информации;
- централизованная комплексная обработка информации датчиков и систем судна;
- радиально-шинная архитектура аппаратной части;
- модульность на уровне аппаратных блоков и отдельных исполняемых программ;
- горячее резервирование основных вычислителей и других блоков;
- программируемый информационно-управляющий интерфейс средства отображения;
- унификация программного обеспечения (ПО) на уровне алгоритмов и исходных кодов.

Данный принцип позволит обеспечить:

- многофункциональное и многоцелевое применение по назначению;
- минимизацию числа отказов, влияния «человеческого фактора»;
- повышение эффективности жизненного цикла;
- минимизацию времени разработки, снижение сроков и стоимости разработки, эксплуатации и модернизации;
- обеспечение высокого запаса на модернизацию;
- минимизацию массогабаритных и энергетических характеристик;
- внедрение единых алгоритмов и ПО не только на новых, но и на существующих судах.

Более перспективной архитектурой, обеспечивающей оптимизацию ресурсов и улучшение конструкторских характеристик, а также открывающей новые возможности по наращиванию функций, является интегрированная модульная архитектура аппаратных и программных средств [2].

Ориентировочная текущая потребность по маломерным судам – более 5000 комплектов; по судам среднего класса – более 2000 комплектов; по большим судам – около 1000 комплектов. Дополнительно, за счет строительства новых судов, устаревания и (или) выхода из работоспособного состояния существующих НСК, необходимость в восполнении требуется в размере 700-800 комплектов ежегодно.

3 Структурная схема

Структурная схема навигационно-связного комплекта представлена на рисунке 1.



Рисунок1 – Структурная схема навигационно-связного комплекта

Заключение

В статье представлены требования и облик навигационно-связных комплексов, разработанных для обеспечения функций судов различного класса, в том числе Рыболовства.

Показано, что НСК также должны осуществлять функции обеспечения безопасности на море, а также служить инструментом для обмена информацией в различных информационных системах.

Показано, что перспективный НСК – это модульное цифровое оборудование, выполняющее автоматическое или автоматизированное решение всего комплекса задач координатного, временного, навигационного и др. обеспечения, с обеспечением накопления опыта эксплуатации и его учета для оперативного расширения перечня решаемых задач и повышения качества их выполнения.

Учитывая новые качества создаваемого НСК, расширяется сфера его применения для повышения безопасности мореплавания, спасательных мероприятий на море, повышения точностных характеристик оценки ледовой обстановки и прогнозирования её изменения.

Литература

1 Паспорт федерального проекта «Развитие Северного морского пути» <https://mintrans.gov.ru/documents/8/12714?ysclid=lrpz7zmefo145120046>

2 Демин И.М., Анохин С.В., Требухов А.В., Кавинский В.В., Бабиченко А.В., Орехов М.И. Искусственный интеллект БРЭО перспективных летательных аппаратов // Радиоэлектронные технологии. 2023. № 1. С. 16-22.

3 Приказ Минсельхоза России от 26.12.2019 N 721 (ред. от 27.01.2022) Об утверждении Порядка передачи данных в отраслевую систему мониторинга водных биологических ресурсов (Зарегистрировано в Минюсте России 04.02.2020 N 57421).

4 Желтов С.Ю. Основные направления создания комплексов бортового оборудования воздушных судов с учетом требований по унификации, импортозамещению и внедрению критических технологий / Материалы III Всерос. НТК «Навигация, наведение и управление летательными аппаратами». 21-22 сентября 2017. М.: ГосНИИАС.

Блинов Игорь Юрьевич – доктор технических наук, заместитель генерального конструктора, АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей»», г. Москва.

Область научных интересов: организация производства, оптимизация производственных процессов.

Email: i.blinov@almaz-antey.ru.

Моргунов Алексей Юрьевич – ведущий инженер-разработчик, АО «Концерн ВКО «Алмаз – Антей»», г. Москва.

Область научных интересов: организация производства, оптимизация производственных процессов.

Email: a.morgunov@almaz-antey.ru.

Почтовый адрес: 121357, Москва, ул. Вереysкая, 41

REQUIREMENTS AND FEATURES OF THE CONSTRUCTION OF ADVANCED SHIP NAVIGATION SYSTEMS

The article presents modern features that should be taken into account for construction ship navigation and communication systems. The tasks solved by such complexes is defined. The need for their integration into the system of monitoring and ensuring safety at sea, and in the Arctic region particularly is defined. The technical requirements that can serve as the basis for the design of complexes are given.

Key words: navigation and communication system, monitoring and safety at sea, ship equipment.

Blinov Igor Yurievich – Doctor of Technical Sciences, Deputy of the Main Constructor, Almaz-Antey Concern, Moscow.

Research interests: Satellite and on-Earth navigation, communication.

Morgunov Alexey Yurievich – leading engineer, Almaz-Antey Concern, Moscow.

Research interests: manufacturing organization, manufacturing processes optimization.

УДК 001.891.34

КОМПЕНСАЦИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ АМПЛИТУДНОЙ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕНН МЕТОДОМ ДАЛЬНОЙ ЗОНЫ ПРИ «КОНЕЧНЫХ» РАЗМЕРАХ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Калашников В.С.

При экспериментальном определении амплитудных диаграмм направленности антенн методом дальней зоны не всегда удается разнести зонд и исследуемую антенну на расстояние, при котором можно не учитывать размеры области, в которой в процессе измерений перемещается исследуемая антенна. Возникающие при этом погрешности измерений могут быть скомпенсированы расчетным путем с помощью приводимых в настоящей работе формул, справедливость которых подтверждена экспериментально проверкой.

Ключевые слова: антенна; диаграмма направленности; дальняя зона; измерительный стенд.

Введение

При проведении измерений амплитудных диаграмм направленности (ДН) антенн методом дальней зоны по схеме, в которой используется неподвижный зонд и вращающаяся исследуемая антенна (ИА), необходимо совмещать фазовый центр ИА с осью вращения ИА. Если выполнить это требование не удастся, то возникают погрешности измерений, анализ и методы компенсации которых рассматриваются в настоящей работе.

Пусть неподвижный зонд работает на передачу, а ИА, вращающаяся в процессе измерений - на прием.

Погрешности измерения ДН связаны со следующими явлениями:

- изменением расстояния от неподвижного зонда до фазового центра ИА в процессе вращения ИА (рисунок 1);
- отличием угла между направлением нормали к раскрытию ИА и направлением из фазового центра ИА на неподвижный зонд от угла поворота ИА (рисунок 2).

Первое явление приводит к тому, что изменение амплитуды принятого сигнала оказывается вызванным не только изменением ДН антенны, но и изменением плотности потока мощности сигнала, падающего на ИА.

Второе явление приводит к тому, что истинное значение угловой переменной измеряемой ДН оказывается отличным от угла поворота ИА в процессе измерений.

Введем следующие обозначения (рисунок 2):

($\cdot$) О – центр вращения ИА в процессе измерений;

r – радиус окружности, по которой перемещается фазовый центр ИА в процессе измерений;

β – угол поворота ИА в процессе измерений;

R_0 – расстояние от фазового центра ИА до зонда при нулевом угле поворота ИА;

$R(\beta)$ – расстояние от фазового центра ИА до зонда при повороте ИА на угол β ;

$|U(\beta)|$ – измеренное значение амплитуды принятого сигнала, при совмещении фазового центра ИА с осью вращения ИА;

$|U(\beta)|'$ – измеренное значение амплитуды принятого сигнала, при смещении фазового центра ИА относительно оси вращения ИА на расстояние r ;

$|U(\beta)|''$ – откорректированное значение амплитуды принятого сигнала, с учетом изменения плотности потока мощности электромагнитной волны, падающей на ИА;

β' – угол между нормалью к раскрыву ИА и направлением из фазового центра ИА на зонд при перемещении фазового центра по окружности радиуса r (откорректированное значение угловой переменной);

$|U(\beta')|$ – откорректированное значение амплитуды принятого сигнала, соответствующее углу β' диаграммы направленности ИА;

$|U(\beta)|'''$ – значения амплитуды принятого сигнала, полученные путем интерполяции значений β' и $|U(\beta')|$ на равномерную сетку углов β .

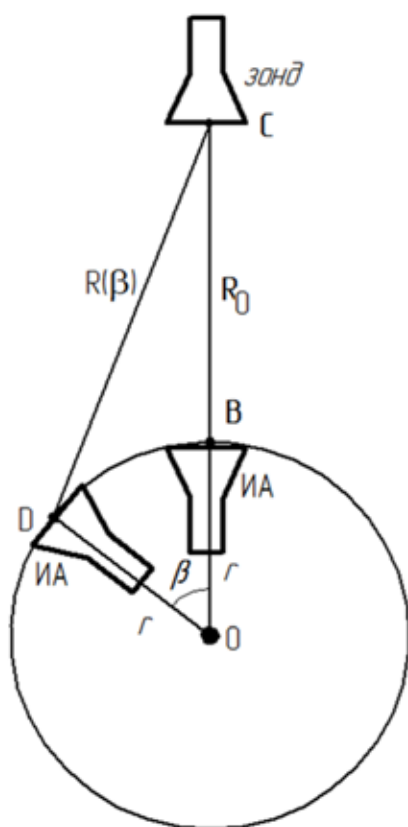


Рисунок 1 – Определение расстояния $R(\beta)$

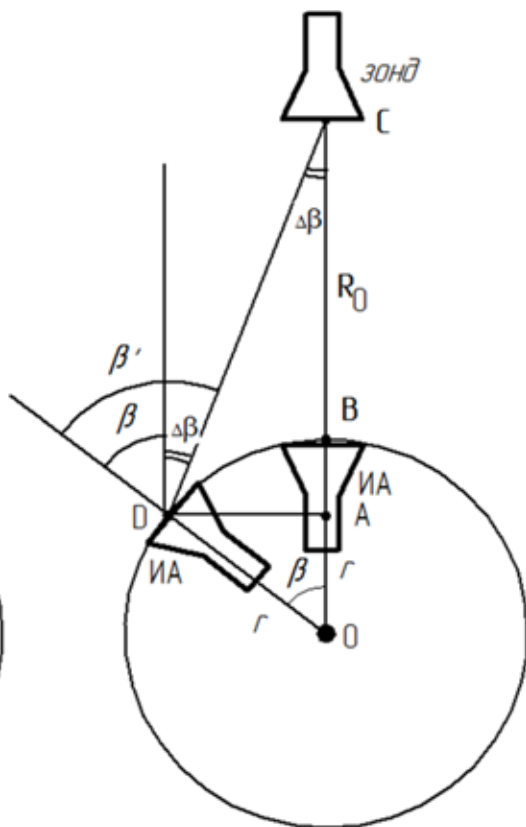


Рисунок 2 – Определение угловой переменной β'

Расстояние от фазового центра ИА до зонда определяется как сторона тре-

угольника ODC , лежащая напротив угла β (рисунок 1)

$$R(\beta) = \sqrt{r^2 + (R_0 + r)^2 - 2r(R_0 + r)\cos\beta}. \quad (1)$$

Плотность потока мощности электромагнитной волны, падающей на ИА, уменьшается пропорционально квадрату расстояния $R(\beta)$, следовательно, для компенсации зависимости амплитуды напряжения принятого ИА сигнала от изменения расстояния между зондом и ИА в процессе измерения необходимо умножить измеренное значение амплитуды $|U(\beta)|'$ на корректирующий множитель $R(\beta)/R_0$

$$|U(\beta)|'' = |U(\beta)|' \cdot (R(\beta)/R_0). \quad (2)$$

Угол между нормалью к раскрыву ИА и направлением из фазового центра ИА на зонд (β') определяется из геометрических построений, приведенных на рисунке 2:

$$\operatorname{tg}\Delta\beta = DA/AC = r \cdot \sin\beta / (R_0 + r(1 - \cos\beta)), \quad (3)$$

$$\beta'(\beta) = \beta + \Delta\beta(\beta) = \beta + \operatorname{arctg}[r \cdot \sin\beta / (R_0 + r(1 - \cos\beta))]. \quad (4)$$

Следовательно, истинное значение угловой переменной измеряемой ДН при повороте ИА на угол β будет равно β' , а соответствующее углу β' значение амплитуды напряжения $|U(\beta')|$ будет равно откорректированному значению напряжения принятого ИА при повороте на угол β , т. е. $|U(\beta)|''$

$$|U(\beta')| = |U(\beta)|''. \quad (5)$$

Необходимо отметить, что если при организации измерений сетка углов β была равномерной, то сетка углов β' окажется неравномерной.

Таким образом, полученные в результате измерений и откорректированные в соответствии с приведенными формулами данные позволяют построить ДН для неравномерной сетки углов.

Для получения численных значений амплитуды принятого сигнала, соответствующих равномерной сетке углов, можно воспользоваться программой интерполяции с помощью встроенной функции программного обеспечения для выполнения математических расчетов под названием «*interp1*».

Для проверки справедливости выведенных формул были выполнены два эксперимента, в которых ИА представляла собой вибраторную антенну с рефлектором.

Параметры экспериментальной установки:

$R_0 = 8090$ мм;

$r = 2003$ мм;

Рабочие частоты – 8200, 9000, 10000, 11000 МГц;

ИА – линейно поляризованная вибраторная антенна с рефлектором;

Максимальный линейный размер ИА – $L = 0,3$ м; $2L^2/\lambda_{\min} = 6,5$ м.

В первом эксперименте ИА устанавливалась на измерительном стенде таким образом, чтобы ее фазовый центр совпадал с осью вращения, затем снимались данные, необходимые для построения ДН (углы β и амплитуды принятого сигнала $|U(\beta)|$);

Во втором эксперименте ИА устанавливалась на измерительном стенде таким образом, чтобы ее фазовый центр был сдвинут относительно оси вращения на расстояние r , затем снимались данные, необходимые для построения ДН (углы β и амплитуды принятого сигнала $|U(\beta)|'$);

Измеренные значения углов поворота ИА и амплитуд принятых сигналов, по-

лученные во втором эксперименте, были откорректированы с использованием выведенных формул. Откорректированные данные сравнивались с результатами первого эксперимента.

На рисунках 3-6 изображены ДН исследуемой антенны, построенные по результатам первого и второго эксперимента для частот 8,2 ГГц, 9 ГГц, 10 ГГц и 11 ГГц. Красным цветом изображены ДН, полученные в результате первого эксперимента. Зеленым цветом изображены неоткорректированные ДН, полученные в результате второго эксперимента. Синим цветом изображены ДН, полученные в результате второго эксперимента, откорректированные по формулам (4), (5) и пересчитанные на равномерную сетку углов с помощью встроенной функции «*interp1*» программного обеспечения для выполнения математических расчетов.

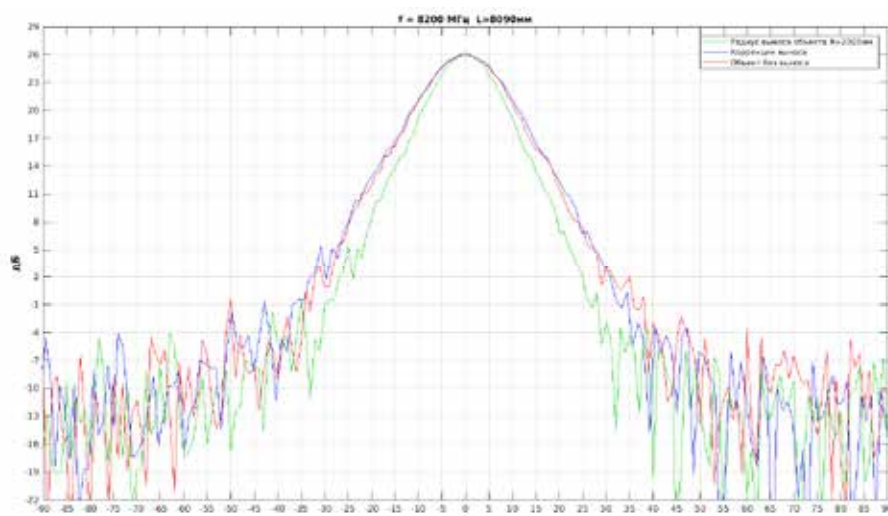


Рисунок 3 – Диаграммы направленности ИА в плоскости Е на частоте 8,2 ГГц

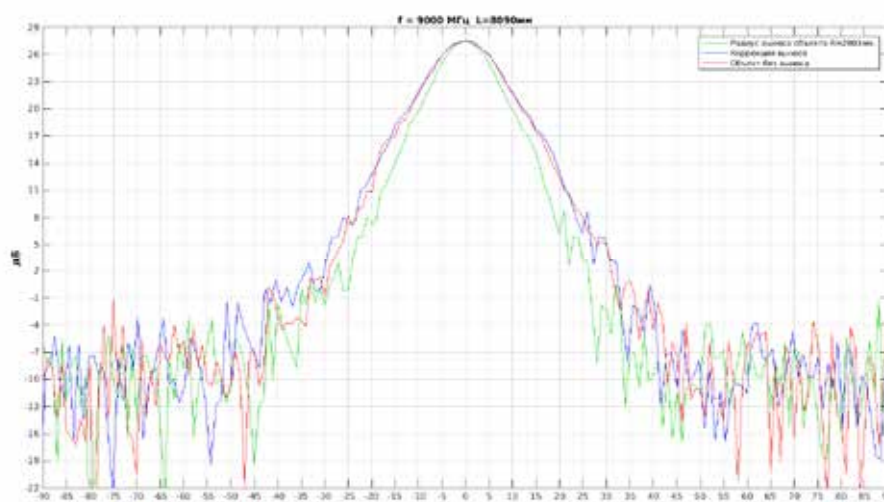


Рисунок 4 – Диаграммы направленности ИА в плоскости Е на частоте 9 ГГц

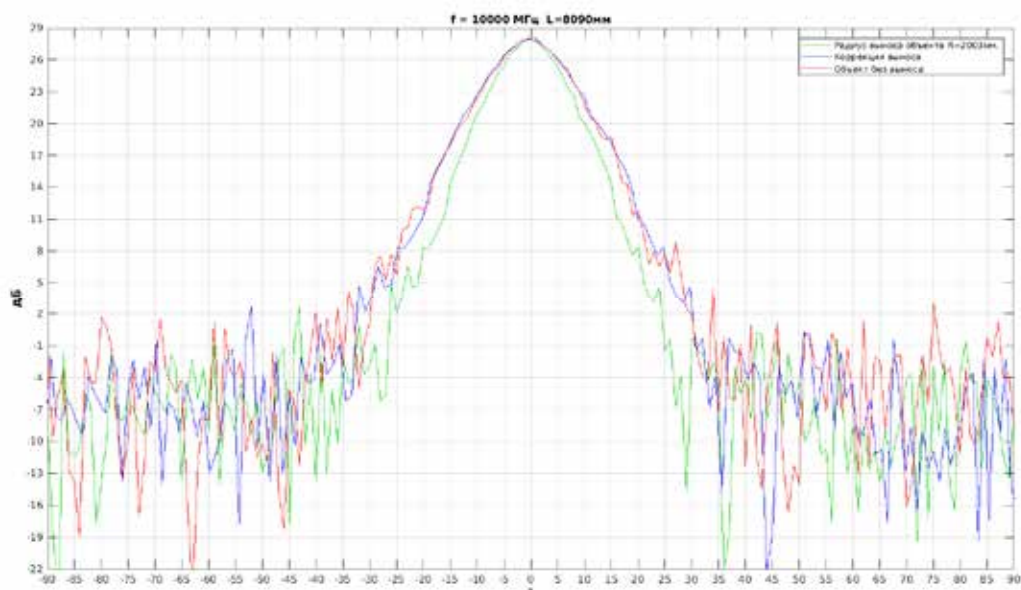


Рисунок 5 – Диаграммы направленности ИА в плоскости Е на частоте 10 ГГц

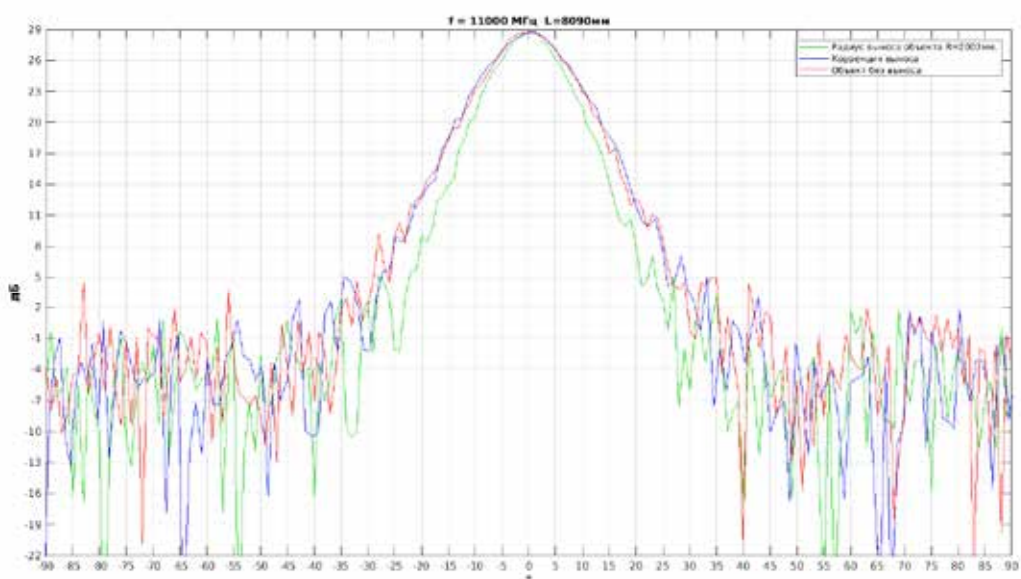


Рисунок 6 – Диаграммы направленности ИА в плоскости Е на частоте 11 ГГц

Анализ полученных результатов показывает высокую эффективность корректировки экспериментальных данных по предложенному методу.

Выводы

Выведенные формулы могут быть использованы для коррекции экспериментальных данных при измерении амплитудных ДН антенн методом дальней зоны.

Калашников Вадим Серафимович – доктор технических наук, начальник бюро, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: антенные системы; испытания антенн.

Email: 01kvs07@goz.ru.

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

COMPENSATION OF MEASUREMENT ERRORS OF THE ANTENNA RADIATION AMPLITUDE DIAGRAM BY THE FAR-ZONE METHOD WITH "FINITE" DIMENSIONS OF THE MEASURING STAND

When experimentally determining the antenna radiation amplitude diagram by the far-zone method, it is not always possible to separate the probe and the antenna under study at a distance that does not require taking into account the dimensions of the region in which the antenna under study moves during the measurements. The resulting measurement errors can be compensated by calculation using the formulas given in this paper, the validity of which has been confirmed by experimental verification.

Keywords: antenna; radiation pattern; far zone; measuring stand.

Kalashnikov Vadim Serafimovich – Doctor of Technical Sciences, Head of Bureau, JSC "Obukhov Plant", St. Petersburg.

Research interests: antenna systems; antenna testing.

УДК 621.372.8

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ КАК НОВЫЙ ПОДХОД К ФОРМООБРАЗОВАНИЮ БЛОЧНЫХ СОРБЦИОННО-АКТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Хохлачев С. П., Самонин В. В., Спиридонова Е. А., Подвязников М.Л.

Приведен обзор современных методов получения блочных сорбционно-активных изделий, используемых в статических и динамических условиях для целей защиты человека и техники. Блочное исполнение сорбционных изделий позволяет повысить прочность адсорбционного материала, снизить перепад давления, в результате чего повысить эффективность процессов очистки. Показаны наиболее перспективные аддитивные технологии для получения блочных изделий сложных геометрий.

Ключевые слова: адсорбент; динамика адсорбции; осушка; перепад давления; блочные сорбционно-активные изделия; блоки сотовой структуры; аддитивные технологии; селективное лазерное спекание.

Введение

Создание заданной газовой атмосферы играет большую роль в обеспечении защиты человека и техники. Основные задачи создания заданной газовой атмосферы включают в себя:

- удаление легколетучих органических соединений (ЛОС);
- удаление кислых газов и паров;
- удаление углекислого газа;
- осушка воздуха и технологических газов.

Первые три задачи, в большей степени, характерны для целей защиты органов дыхания человека, тогда как четвертая задача направлена на защиту техники и повышение эффективности химических и физических процессов.

Осушка воздуха необходима для предотвращения конденсации паров воды при изменении внешних условий. В связи с этим осушка газовых сред, в частности воздуха, необходима во многих областях техники, среди них можно выделить:

- космическая электроника;
- оптическое оборудование;
- пневматическое оборудование;
- линии связи;
- осушка технологических газов;
- изолированные объекты.

Наиболее распространенными методами осушки являются конденсационный и сорбционные методы. Конденсационный метод осушки основан на повышении относительной влажности паров воды либо понижением температуры, либо повышением давления. При достижении относительной влажности 100 % начинается процесс кон-

денсации воды, в результате чего уменьшается абсолютная влажность воздуха. Адсорбционный метод основан на явлении адсорбции — процессе поглощения вещества на активной поверхности или в объеме микропор твердой фазы (адсорбента). На рисунке 1 различным цветом выделены интервалы использования приведенных методов.

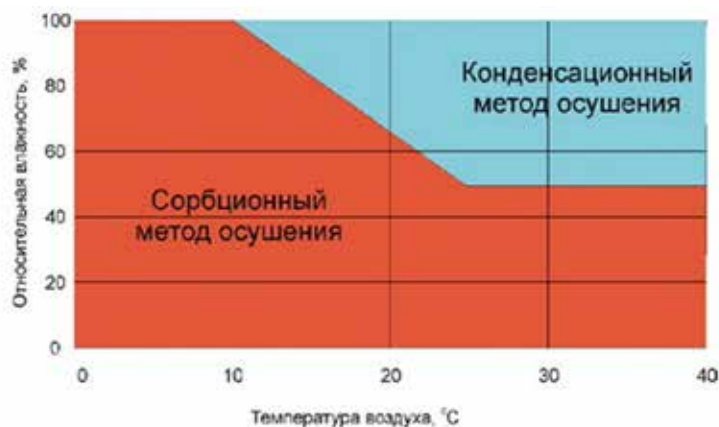


Рисунок 1 – Применимость методов осушки

Конденсационный метод применяется в случаях, когда не требуется глубокая степень осушки. Однако для целей защиты техники зачастую необходима осушка с достижением точки росы до минус 60 °С. Такую степень осушки возможно получить только с применением адсорбционного метода, что иллюстрирует приведенная диаграмма.

Основными типами осушителей являются крупно- и мелкопористые силикагели, цеолиты природные и синтетические, активный оксид алюминия. В таблице 1 приведены наиболее важные характеристики этих осушителей [1].

Таблица 1 – Свойства основных промышленных осушителей

Свойство	Силикагель	Алюмогель	Цеолит
Равновесная влагоемкость при низких парциальных давлениях воды	Низкая	Низкая	Высокая
То же при высоких парциальных давлениях	Высокая	Высокая	Высокая
Пригодность для осушки горячих газовых сред	Не пригоден	Не пригоден	Пригоден
Устойчивость к капельной влаге	Не устойчив	Устойчив	Ограниченно устойчив
Устойчивость к присутствию в газе кислых компонентов	Устойчив	Не устойчив	Ограниченно устойчив
Каталитическая активность в реакциях полимеризации ненасыщенных соединений	Активен	Не активен	Активен
Механическая прочность	Прочный	Прочный	Ограниченно прочный
Стоимость	Низкая	Очень высокая	Высокая

Для достижения точки росы в диапазоне от минус 20 до минус 40°C чаще всего используются силикагели ввиду их низкой стоимости. Достижение более глубоких степеней осушки возможно только на цеолитах, которые имеют самую высокую равновесную адсорбционную емкость по парам воды при низком парциальном давлении паров воды.

В зависимости от поставленной задачи, процесс осушки может проводиться как в статических, так и в динамических условиях. Адсорбция в статических условиях применяется для осушки внутреннего пространства электроники и оптических устройств для предотвращения конденсации паров воды на деталях оборудования. Адсорбция в динамических условиях используется для обеспечения газовой средой крупногабаритных устройств, линий связи и др. В статических условиях адсорбент используется в виде блочных изделий, в динамических условиях, как правило, адсорбент используется в виде насыпной шихты гранулированного материала.

Реализация процесса адсорбции в динамических условиях крайне разнообразна, однако в циклических процессах присутствует две основных стадии: адсорбция и десорбция. По методам десорбции процессы делятся на тепловые (регенерация адсорбента за счет подвода теплоты) и безнагревные (регенерация за счет продувки очищенным газом при меньшем давлении). Возможность проведения безнагревных процессов обусловлена малой длительностью стадий адсорбция/десорбция. За счет отсутствия нагревания адсорбента и короткого времени цикла адсорбции/десорбции в России безнагревные процессы называют короткоцикловой безнагревной адсорбцией (КБА).

В условиях короткоцикловой безнагревной адсорбции насыпная шихта испытывает колоссальные нагрузки за счет перепада давления в адсорбере при смене стадий адсорбции/десорбции, ввиду чего к шихте адсорбента предъявляются жесткие требования по прочности и устойчивости в цикловой работе. В различных системах адсорбер с насадкой адсорбента может испытывать ударные нагрузки с ускорением до 10g, вибронагрузки с частотой 20-25 Гц в течение нескольких часов работы оборудования. Кроме этого, адсорбер и адсорбент должны стабильно работать в различных климатических зонах (от минус 56 до 65°C).

В статье [2] показано, что насыпная шихта гранулированного силикагеля не способен работать при приведенных механических нагрузках. Крупная фракция силикагеля диспергируется, в результате чего нарушается упаковка шихты, и начинается интенсивное истирание, что приводит к снижению эффективности процесса осушки и выходу из строя оборудования. Повышение прочности насыпной шихте возможно ее заменой на блочное исполнение адсорбента.

1 Преимущества блочного исполнения сорбционно-активных изделий

Блочные исполнения адсорбентов могут быть представлены монолитными блоками, закрепленной шихтой гранулированного адсорбента, блоками «сотовой» структуры. Монолитные изделия используются чаще всего в статических условиях в изолированных объектах. Главные требования к ним заключаются в высокой адсорбционной емкости, прочности и отсутствие пыления. Блоки сотовой «структуры» представляют собой блочное изделие с изолированными прямыми каналами различных геометрических форм: квадратные, круглые, шестигранные, треугольные и т. п. Блоки

«сотовой» структуры предназначены для работы в динамических условиях. Течение газовых сред в блоках «сотовой» структуры отличается от течения сред в насыпной шихте отсутствием его перемешивания. В связи с чем встает вопрос, отличается ли процесс динамики сорбции на блочных изделиях сотовой структуры и насыпной шихте гранулированного материала? Надо сказать, что «сотовые» структуры достаточно широко используются в области катализа, однако использование таких структур в качестве адсорбентов развито не столь значительно.

В работах зарубежных ученых показано, что процессы, происходящие в условиях динамической адсорбции, на блоках «сотовой» структуры схожи с таковыми на насыпной шихте. Показано, что при выпуклой изотерме адсорбции образуется стационарный фронт адсорбции. Ширина фронта адсорбции зависит от структуры монолита, а именно от количества каналов на единицу площади, диаметра канала и толщины стенки. Методами математического моделирования показано, что при количестве каналов на см^2 более 155 ширина фронта адсорбции составляет меньшую величину в сравнении с насыпной шихтой гранулированного адсорбента с диаметром гранул 0,7 мм [3]. Уменьшение фронта адсорбции связано с малой толщиной стенки каналов (0,2-0,4 мм), в результате чего диффузия внутрь материала занимает меньшее время и коэффициент продольной диффузии уменьшается, то есть достигается более быстрое насыщение адсорбента. Также блоки «сотовой» структуры имеют более низкий перепад давления в сравнении с насыпной шихтой и меньшую зависимость перепада давления от скорости потока.

Сравнивая ширину фронта адсорбции, а в некоторых случаях и более меньшая, низкий перепад давления делает возможным применение блочных изделий в адсорбционных процессах, особенно в средствах индивидуальной и коллективной средств защиты органов дыхания человека. В СИЗОД гидравлическое сопротивление имеет решающее значение. Так по ГОСТ 12.4.121-2015 перепад давления фильтрующей коробки, в зависимости от типа противогазовой коробки, не должен превышать 150-330 Па при расходе воздуха 30 $\text{дм}^3/\text{мин}$ и 550-1240 при расходе воздуха 95 $\text{дм}^3/\text{мин}$. Снижение перепада позволит повысить комфортность работы в СИЗОД.

Кроме СИЗОД сотовые блоки могут быть использованы в процессах осушки и разделения воздуха методом короткоцикловой безнагревной адсорбции. Уменьшение перепада давления, уменьшение ширины фронта адсорбции позволяют увеличить скорость потока или уменьшить габариты устройства.

За счет изолированности каналов и ламинарности течения блоки «сотовые» структуры имеет неравномерное распределение скорости потока по сечению изделия. Распределение скорости имеет параболический профиль, в связи с чем и форма фронта адсорбции так же имеет параболический профиль. На рисунке 2 показано распределение концентрации изопропанола в блоке с «сотовой» структурой [4].

Из приведенного рисунка видно, что фронта адсорбции в каналах центральной части блока размыт в большей степени, чем в каналах на периферии блока. Неравномерность распределения адсорбата по изделию связана с неравномерным распределением скоростей потока по блоку. Размытие фронта приводит к более раннему проскоку загрязняющего вещества.

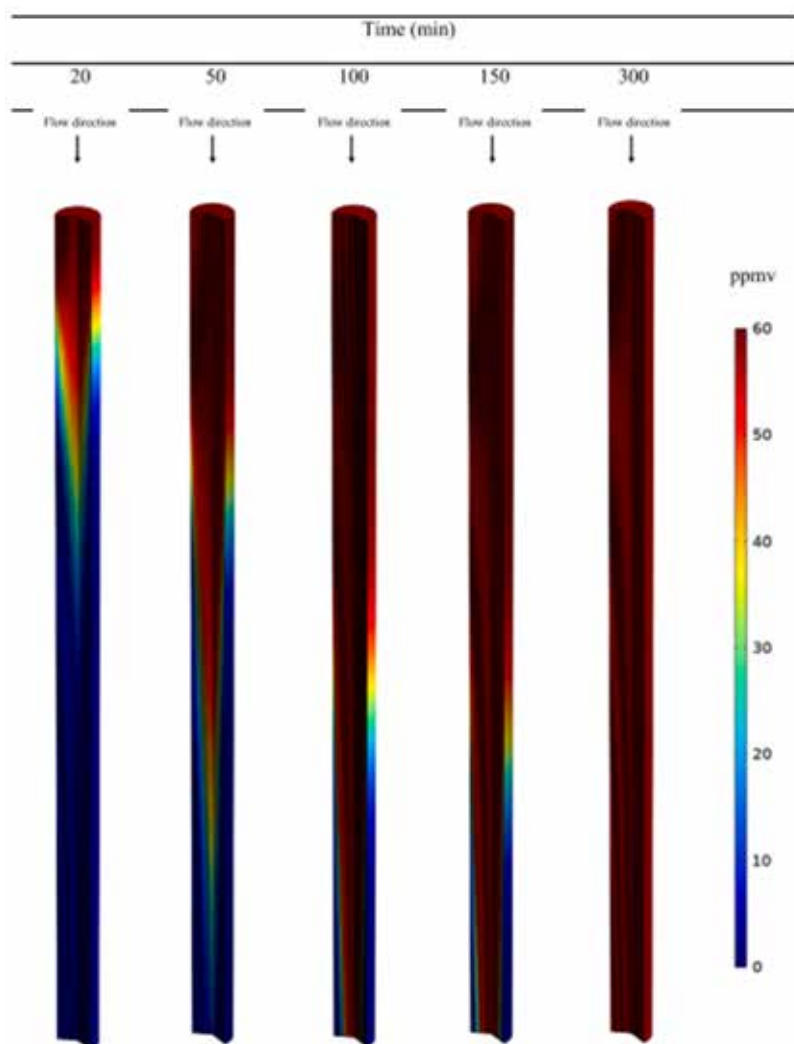


Рисунок 2 – Визуализация распределения концентрации изопропанола по высоте цеолитового блока «сотовой» структуры [4]

2 Технологии получения блочных изделий

Можно выделить следующие технологии получения блочных сорбционно-активных изделий:

- закрепление насыпной шихты;
- прессование;
- экструзия;
- аддитивные технологии.

На рисунке 3 показаны изображения блочных сорбционно-активных изделий, полученных по различным технологиям. Технология закрепленной шихты была развита на кафедре «Химии и технологии материалов и изделий сорбционной техники». Технология заключается в проливке насыпной шихты полимерным связующим, которое склеивает гранулы между собой, но при этом не блокирует пористую структуру, не сказывается на порозности шихты и, как следствие, на перепаде давления. Основ-

ной целью данной технологии является предотвращение истирания гранул в циклических процессах. На основе данной технологии был разработан адсорбер для осушения осушки воздуха в экстремальных условиях эксплуатации. Данная технология проста и не требует особого оборудования для производства.

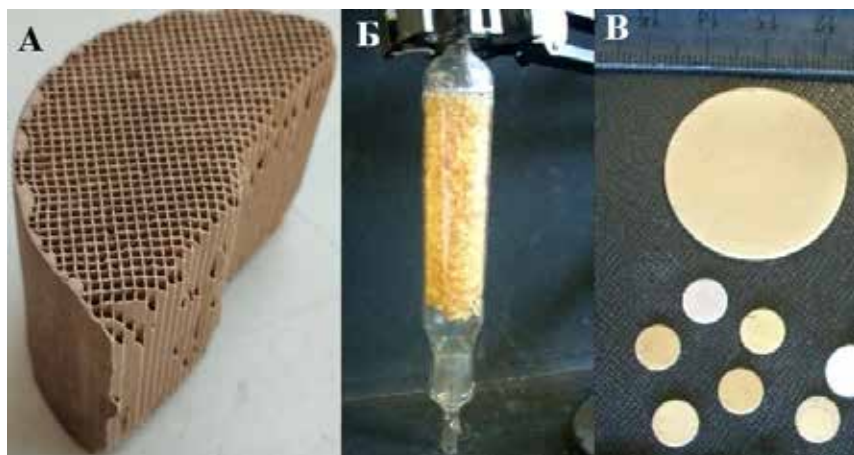


Рисунок 3 – Примеры блочных сорбционно-активных изделий полученных по технологии экструзии (А), закрепленной шихты (Б), прессования (В)

Прессование является классическим способом получения блочных сорбционно-активных изделий. Технология заключается в смешении сорбционно-активного наполнителя и полимерного органического или минерального связующего и дальнейшим прессованием с заданным давлением. Зачастую методом прессования получают изделия, которые работают в статических условиях или однократно.

Основным способом получения блочных изделий, предназначенных для работы в динамических условиях, является экструзия. Методом экструзии возможно получение блочных изделий сотовой структуры. Получение сорбционно-активных изделий возможно несколькими способами:

- нанесение сорбционно-активного материала на «сотовый» блок из кордиеритовой керамики;
- экструзия пасты типа сорбционно-активный наполнитель : связующее, зачастую глинистое;
- экструзия сорбционно-неактивного «сотового» блока с дальнейшей его активацией.

Первый приведенный способ получения не позволяет получить изделия с большим содержанием сорбционно-активного наполнителя, в связи с чем практически не представляет практического интереса. В России на базе института катализа им Г.К.Борескова СО РАН разработаны технологии получения углеродных блоков «сотовой» структуры на базе мезопористого углеродного материала СИБУНИТА [5]. Технология заключается в экструзии композиции сажи и полимерного связующего с получением хрупкого блока с дальнейшим уплотнением структуры пироуглеродом.

Сорбционно-активные изделия сотовой структуры коммерчески доступны. Сотовые блоки из активированного угля производятся рядом китайских компаний, например, *HANYAN CARBON*. В ассортименте доступны изделия с числом каналов от 24

25 до 200 каналов на квадратный дюйм и толщина стенки от 0,5 до 1 мм [6]. В Европе действующего производства по производству сорбционно-активных изделий сотовой структуры, по всей видимости, нет. Опытно-промышленные образцы под маркой *Novacarb* выпускались компанией *MAST carbon*, Великобритания. Технология получения изделий *Novacarb* состоит из следующих этапов: измельчение резолюной фенолформальдегидной смолы, смешение с новолачной смолой и функциональными добавками, экструзия изделий, термоотверждение заготовки, карбонизация и парогазовая активация [7].

3 Приемы 3D печати для получения блочных изделий

Применение аддитивных технологий (или 3D печати) видится альтернативой экструзионного способа получения блочных сорбционно-активных изделий. В сравнении с экструзионными методами получения блочных изделий приемы 3D печати позволяют получать более сложные геометрические формы с заданным перепадом давления и распределением скоростей потока по изделию, что позволяет повысить эффективность сорбционных процессов.

Аддитивные технологии представляют собой послойное создание изделий из выбранного материала. Вне зависимости от типа аддитивной технологии процесс создания изделия можно разбить на несколько стадий:

- подготовка 3D модели с помощью САПР программ;
- разбивка 3D модели в специализированных программах на слои заданной толщины;
- перевод каждого слоя 3D модели в программный код понятный 3D принтеру;
- 3D печать по выбранной технологии;
- постобработка изделия.

Обзор научно-технической литературы показывает, что наиболее перспективными типами аддитивных технологий для создания сорбционно-активных изделий являются следующие:

- *DIW (Direct Ink Written)* – экструзионная печать вязкоупругими материалами (пастами).

- *SLA (Stereolithography)* (стереолитография) – выборочная фотополимеризация жидких смол. В состав входят олигомеры и мономеры (различные акрилаты), фотоинициаторы (зачастую пероксиды), и реологические добавки.

- *SLS (Selective Laser Sintering)* (селективное лазерное спекания) – выборочное сплавление углекислотным лазером слоя термопластичного порошка.

- *Binder Jetting* (нанесение связующего) – выборочное нанесение связующего (цианоакрилаты и эпоксидные, фенолформальдегидные, фурановые смолы) на слой порошкового материала.

Применительно к технологиям создания сорбционно-активных изделий, *DIW* технология заключается в приготовлении пасты из диспергированного сорбционно-активного наполнителя и связующего, которое может быть как сорбционно-активным, так и инертным. В качестве сорбционно-активного наполнителя могут выступать разнообразные материалы: цеолиты, силикагели, иониты, оксиды и гидроксиды металлов, *MOF* [8]. Широкий выбор сорбционно-активных наполнителей доступных для печати позволяет получать сорбционно-активные изделия под конкретные

практические задачи. На рисунке 4 приведены блочные изделия характерной формы, полученные по технологии *DIW* из различных материалов [8].

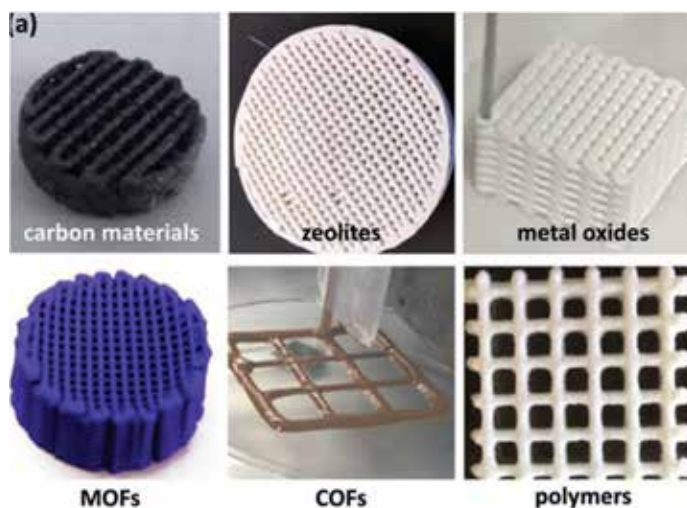


Рисунок 4 – Сорбционно-активные изделия, полученные из различных материалов

Поскольку сорбционно-активный наполнитель обладает развитой пористой структурой, при разработке печатающих составов приходится искать компромисс между достаточной для предполагаемого процесса прочностью и малой блокировкой пористой структуры. Кроме этого, для получения качественного изделия печатающий состав должен обладать необходимыми реологическими свойствами: высоким пределом текучести, быть тиксотропным, не содержать крупных частиц. Наиболее часто используемым связующим является бентонитовая глина. Для достижения необходимых реологических свойств используют поверхностно-активные вещества и электролиты.

Единственным примером промышленно выпускаемых сорбционно-активных изделий методом *DIW* печати являются сернокислотные катализаторы (O4-111 X3D и O4-115 X3D) производства компании *BASF* (рисунок 5) [9]



Рисунок 5 – Катализатор производимый по технологии *DIW* компанией *BASF* [9]

Одной из проблем промышленного внедрения данной технологии является

необходимость прерывания печати и загрузки печатающего материала. Итальянская компания *WASP* в настоящее время разрабатывает систему непрерывной подачи пластической массы для питания 3D принтера. На основе прототипа данной системы была осуществлена печать в полу промышленном масштабе блочных изделий диаметром 40 см и высотой 10 см общей массой 720 кг, производительность печати составила 5,3 кг/ч [10].

Основой процесса стереолитографии является смола, выборочно отверждаемая ультрафиолетовым излучением за счет лазера или светодиодных ламп и системы подвижных зеркал. Смола состоит из олигомеров основного полимера, мономеров и фотoinициатора, как правило, в качестве фотoinициатора используются различные малоустойчивые пероксиды. Под действием ультрафиолетового излучения фотoinициатор разрушается с образованием свободного радикала, который запускает реакцию полимеризации мономеров и олигомеров с образованием пространственно-сшитых полимеров.

Метод стереолитографии может быть использован для получения углеродных сорбционно-активных изделий. В данном случае печатается неплавкий полимерный блок с дальнейшей его карбонизацией и парогазовой активацией. Доступные на рынке фотополимеризующиеся смолы не пригодны для получения углеродных изделий ввиду практически полной газификации полимера на этапе карбонизации. Повышение выхода углерода во время стадии карбонизации возможно путем использования в качестве олигомеров ароматических соединений. В настоящее время наиболее подходящий состав смолы для получения углеродных изделий разработан в работе [11].

В научно-технической литературе описаны приемы получения неорганических сорбционно-активных изделий из фотополимерных суспензий. На рисунке 6 представлен внешний вид блочных изделий из оксида кремния (удельная площадь поверхности $185 \text{ м}^2/\text{г}$), полученных методом стереолитографии.

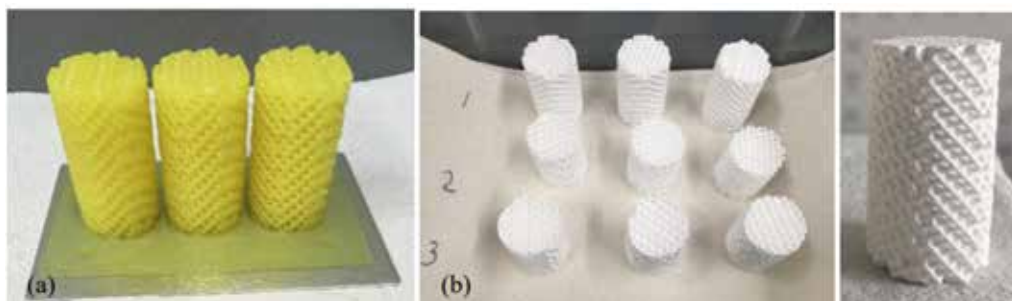


Рисунок 6 – Сорбционно-активные изделия из оксида кремния изготовленные методом стереолитографии [12]

Фотополимерная суспензия для получения неорганических изделий состоит из фотополимеризующейся смолы и высокодиспергированного наполнителя. После полимеризации смолы частицы наполнителя остаются в полимерном каркасе изделия. В дальнейшем полимерный блок термообрабатывается в окислительной атмосфере с целью спекания частиц наполнителя и выжигания полимерного каркаса. Таким способом возможно получение изделий из оксидных материалов, в том числе оксида кремния, цеолитов. Данная технология нашла свое применение в области создания

керамических изделий. В настоящее время коммерчески доступны различные фото-полимерные суспензии с различными наполнителями.

Большой интерес представляют аддитивные технологии, использующие в качестве печатающего материала порошки. Применительно к созданию сорбционно-активных изделий можно выделить технологию селективного лазерного спекания (*SLS*) и струйное нанесение связующего (*Binder Jetting*).

По технологии селективного лазера спекания наносимый порошок выборочно спекается углекислотным лазером. Движение лазерного луча осуществляется с помощью системы подвижных зеркал – сканатора. В качестве порошковых материалов используются термопластичные полимеры: полиамид, полиуретан, полистирол и др. Отличительной особенностью *SLS* технологии является ее масштабируемость до мелкосерийного производства, малое количество отходов (неиспользуемый порошковый материал можно повторно использовать), отсутствие растворителей, большое разнообразие геометрий.

В научно-технической литературе приводятся скудные данные о применении данной технологии к области создания сорбционно-активных изделий. Однако данная технология, ввиду своих плюсов, имеет потенциал. Наиболее вероятно применение технологии селективного лазерного спекания в области формообразования блочных углеродных изделий. В литературе приводятся данные по получению углеграфитовых изделий методом *SLS* из смеси порошков графита и фенолформальдегидных связующих [13]. В качестве связующего интерес представляют различные новолачные фенолформальдегидные смолы с добавлением сшивающего агента. При нагреве слоя порошка лазером новолачные смолы плавятся, связывая частицы графитового порошка между собой. В расплаве происходит сшивка новолачной смолы с образованием реактопласта. Подобный прием может быть применим для получения углеродных сорбционно-активных изделий.

Технология *Binder Jetting*, так же, как и *SLS* технология, основана на использовании порошка. По технологии *Binder Jetting* формообразование изделия происходит за счет склеивания частиц порошка сорбционно-активного материала связующим-клеем, в результате чего к системе не прикладывается давление и удается сохранить макропористую структуру, что положительно сказывается на диффузии молекул адсорбтива к активной поверхности изделия.

В промышленности данная технология находит применение в области создания песчаных литейных форм, металлических заготовок, кондитерских изделий. В области получения сорбционно-активных материалов данная технология может быть применена для создания блочных изделий из оксидных и гидроксидных материалов (ХП-И, гидроокись железа) и солей (карбонаты калия и натрия). В данном направлении основными работами являются разработки необходимого связующего состава, который с одной стороны позволит создавать прочные и термостабильные изделия, а с другой не будет приводить к блокировке активной поверхности сорбционного материала.

В лабораторных условиях СПбГТИ(ТУ) были получены образцы углеродных блочных сорбирующих изделий с прямыми продольными каналами (сотовой структуры) с использованием 3D печати. Суть технологии заключается в 3D печати литьевой формы из термопластичного полимера методом послойного наплавления (*FDM*) и за-

ливкой в нее резольной фенолформальдегидной смолы с температурой сшивки меньшей, чем температура плавления полимера литевой формы. Сшитая смола затем карбонизируется вместе с полимерной литевой формой, которая полностью газифицируется. Готовый углеродный блок подвергается парогазовой активации с целью развития микропористой структуры. На рисунке 7 показан внешний вид блочных изделий.



Рисунок 7 – Углеродные блочные изделия

В таблице 2 приведены данные по порозности изделий и перепаду давления.

Т а б л и ц а 2 – Сравнение перепада давления на блочных изделия и насыпной шихте

Материал	$D_{ГР}$, мм	Порозность, %	ΔP , Па
АГ-5	1	39	36
АГ-3	1,9	39	12
АР-А	3,2	39	10
Блочное изделие высотой 3 см	0,8*	27	< 2
Блочное изделие высотой 6 см	0,8*	27	2
Блочное изделие высотой 8,6 см	0,8*	27	2

* – приведена толщина стенки

Из данных таблицы видно, что данные изделия имеют на порядок более низкий перепад давления в сравнении с насыпной шихтой. При этом исследование динамики адсорбции паров бензола показало, что работа блочных изделий сопоставима с насыпной шихтой.

Также совместно с Санкт-Петербургским Государственным Университетом начата работа по получению углеродных блочных изделий по технологии селективного лазерного спекания. Первичные работы показали, что наиболее перспективным порошковым составом является смесь антрацита и новолачной фенолформальдегидной смолы с добавлением уротропина в качестве сшивающего агента. На рисунке 8 показаны тестовые изделия из различных составов порошковых композиций, полученные на *SLS* принтере.

Из приведенного рисунка видно, что технология *SLS* позволяет создавать изде-

лия с различными типами геометрий: отверстия, щели, тонкие стенки. На основе первичных исследований установлено, что оптимальным составом для печати является состав: 60 % мас. антрацита: 40 % мас. фенолформальдегидной смолы.



Рисунок 8 – Тестовые изделия, полученные по технологии селективного лазерного спекания. А (70 % мас. антрацита : 30 % мас. новолачная смола), Б – 60 % мас. антрацита : 40 % мас. п новолачная смола, В (50 % мас. антрацита : 50 % мас. новолачная смола)

Выводы

Создание заданного состава газовой атмосферы несомненно важная задача, обеспечивающая защиту жизни людей и технику. Повышение эффективности возможно путем создания блочных сорбирующих материалов, которые имеют более низкий перепад давления, неподвержены истиранию и пылению.

Применение аддитивных технологий видится перспективным в области создания сорбционно-активных изделий. С помощью аддитивных технологий возможно создание блочных изделий сложных геометрий под конкретные задачи с заданным перепадом давления и распределением скоростей потока. На данный момент методы 3D печати для формообразования сорбционно-активных изделий практически не вышли за рамки лабораторных исследований. Для внедрения аддитивных технологий в область создания сорбционно-активных изделий необходимо исследование процессов масштабирования технологий 3D печати.

Литература

- 1 Шумяцкий Ю.И. Промышленные адсорбционные процессы. Москва: Колосс, 2009. 183 с.
- 2 Соловей В Н., Самонин В.В., Спиридонова Е.А., Подвязников М.Л. Композиционные сорбирующие изделия на основе силикагеля для осушки газовых сред // Сорбционные и хроматографические процессы. 2019. Т.19. №2. С. 217-228.
- 3 Rezaei F., Webley P. Optimum structured adsorbents for gas separation processes // Chemical Engineering Science. 2009. Vol.64. P.5182-5191.
- 4 Pour S.E., Mamaghani A.H., Hashisho Z., Crompton D., Arellano H., Anderson J.E. Experimental and modeling study of volatile organic compounds adsorption over zeolitic monolith adsorbent // Chemical Engineering Science. 2024. Vol.482.
- 5 Бакланова О.Н. Технологии сорбентов и катализаторов на основе технического углерода: автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.17.01. ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет. Казань, 2019. 38 с.

6 HANYAN CARBON (электронный ресурс) - URL: <http://www.carbonhanyan.com/index.php?c=show&id=56> (дата обращения 25.01.2025)

7 Tennison S.R. Phenolic-resin-derived activated carbon // *Applied Catalysis A: General*. 1998. Vol.173. P.289-311.

8 Chen Q., Tain E., Wang Y., Mo J., Xu G., Zhu M. Recent Progress and Perspectives of Direct Ink Writing Applications for Mass Transfer Enhancement in Gas-Phase Adsorption and Catalysis // *Small methods*. 2023. Vol.7.

9 BASF (электронный ресурс) – URL: <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2022/09/p-22-362> (дата обращения 25.01.2025)

10 Krishnamurthy S., Roelant R., Blom R., Arstad B., Li Z., Rombouts M., Middelkoop V., Borrás A.B., Naldoni L. Scaling up 3D printed hybrid sorbents towards (cost) effective post-combustion CO₂ capture: A multiscale study // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2024. Vol. 132.

11 Steldinger H., Esposito A., Brunnengräber K., Gläsel J., Etzold Bastian J.M. Activated Carbon in the Third Dimension – 3D Printing of a Tuned Porous Carbon // *Advanced Science*. 2019.

12 Sluijter S.N., Boon J., James J., Krishnamurthy S., Lind A., Blom R., Andreassen K.A., Cormos A.M., Sandu V.C., de Boer R. 3D-printing of adsorbents for increased productivity in carbon capture applications (3D-CAPS) // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. 2021. Vol.112.

13 Alayavalli K., Bourell D.L. Fabrication of modified graphite bipolar plates by indirect selective laser sintering (SLS) for direct methanol fuel cells // *Rapid Prototyping Journal*. 2010. Vol.16, №4. P.268-74.

Хохлачев Сергей Павлович – аспирант, СПбГТИ(ТУ), инженер, ПИШ «Междисциплинарные исследования, технологии и бизнес-процессы для минерально-сырьевого комплекса России» СПбГУ, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: адсорбция, адсорбенты, блочные сорбционно-активные изделия, аддитивные технологии.

Самонин Вячеслав Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, СПбГТИ(ТУ), профессор, ПИШ «Междисциплинарные исследования, технологии и бизнес-процессы для минерально-сырьевого комплекса России» СПбГУ, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: процессы управляемой адсорбции, блочные адсорбенты, модифицирование адсорбционных материалов.

Спиридонова Елена Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, СПбГТИ(ТУ), доцент, ПИШ «Междисциплинарные исследования, технологии и бизнес-процессы для минерально-сырьевого комплекса России» СПбГУ, г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: химические поглотители, модифицирование адсорбционных материалов, углеродные адсорбенты.

Подвязников Михаил Львович – доктор технических наук, генеральный директор, АО «Обуховский завод», профессор, СПбГТИ(ТУ), профессор, ПИШ «Междисциплинарные исследования, технологии и бизнес-процессы для минерально-сырьевого комплекса России», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: адсорбция, процессы управляемой адсорбции, осушка газовых сред.

Почтовый адрес: 190013, Россия, Санкт-Петербург, Московский проспект, д.24-26/49, литера А.

ADDITIVE MANUFACTURING AS A NEW APPROACH TO THE FORMATION OF BLOCK SORPTION-ACTIVE PRODUCTS

The article provides an overview of modern methods for producing block sorption-active products used in static and dynamic conditions for the purpose of protecting people and equipment. Block design of sorption products allows increasing the strength of the adsorption material, reducing the pressure drop, thereby increasing the efficiency of cleaning processes. The most promising additive technologies for producing block products of complex geometries are shown.

Keywords: adsorption, breakthrough analysis, drying, pressure drop, monolithic adsorbents, honeycomb monolithic, additive manufacturing, selective laser sintering

Khokhlachev Sergei Pavlovich - post-graduate student, department CTMPST, SPSIT, engineer AES « Interdisciplinary research, technologies and business processes for the Russian mineral resource complex», SPSU, St. Petersburg

Research interests: adsorption, adsorbents, monolithic adsorbents, additive manufacturing

Samonin Vyacheslav Viktorovich - Doctor of Technical Science, professor, head of the department CTMPST, SPSIT, professor of the AES « Interdisciplinary research, technologies and business processes for the Russian mineral resource complex», SPSU, St. Petersburg

Research interests: controlled adsorption processes, monolithic adsorbents, modification of adsorbents.

Spiridonova Elena Anatol'evna - Candidate of Technical Science, associate professor, department CTMPST, SPSIT, associate professor of the AES « Interdisciplinary research, technologies and business processes for the Russian mineral resource complex», SPSU, St. Petersburg

Research interests: chemical adsorbents, modification of adsorbents, carbon adsorbents.

Podvyaznikov Mihail L'vovich - Doctor of Technical Science, managing director of «Obukhov Plant», professor, department CTMPST, SPSIT; professor of the AES « Interdisciplinary research, technologies and business processes for the Russian mineral resource complex», SPSU, St. Petersburg

Research interests: adsorption, Controlled adsorption processes, drying of the gas phase

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Афанасьев В.Б., Медведев В.М., Остапенко С.Н., Синельников А.О.,
Романов П.С., Тихменев Н.В., Ушанов А.А., Болотнов С.А.,
Бакутин С.А., Назаров С.И., Коротичский Е.В.

В работе представлены основные результаты исследований параметров кольцевых лазеров направленные на расширение сферы их применения и использования в направленном бурении скважин в качестве датчиков угловых перемещений в пространстве. Управляющие проходкой скважины приборы подвергаются жестким внешним механическим воздействиям. Исследованы изменения рабочего режима кольцевого лазера при колебательном внешнем воздействии и характер влияния воздействия на разность частот встречных волн. Рассмотрены возможности уменьшения влияния внешнего колебания на параметры лазера. Экспериментально подтверждена эффективность предложенных решений.

Ключевые слова: кольцевой лазер; механические колебания; резонансы системы; взаимодействие колебаний; Фурье-преобразование.

Введение

В добывающей промышленности и в строительстве широко применяется направленная прокладка скважин. Во многих случаях важно знать точную траекторию прохождения скважины, для этого используются специальные приборы, называемые инклинометрами [1-3]. Особое место среди данного класса приборов занимают гироскопические инклинометры, позволяющие отследить траекторию скважины в процессе проходки, в особенности при наклонном бурении [2]. В условиях сложной траектории бурения скважин большого диаметра, система управления инклинометром должна соответствовать требованиям, предъявляемым к навигационным системам. Важную роль играет устойчивость гироскопической системы к внешним, в особенности к механическим, воздействиям [3].

В современных системах управления и стабилизации получили широкое распространение датчики угловых перемещений на основе кольцевых лазеров (КЛ) [4, 5], именно эти инерциальные датчики более всего подходят для точных гироскопических инклинометров.

Принцип измерения угловых перемещений КЛ основан на эффекте Саньяка, приводящего к расщеплению частот встречных волн, пропорциональному угловому перемещению КЛ в инерциальном пространстве [6]. КЛ имеют широкий динамический диапазон, высокую точность и надежность, и другие положительные свойства, включая относительно низкие затраты на производство. Наиболее ограничивающим фактором точности КЛ эффектом является взаимная синхронизация частот встречных волн, приводящая к нелинейности выходной характеристики и зоне нечувствительности к

вращению при малых угловых скоростях (зоне захвата). Эту проблему можно устранить, установив КЛ на механический виброподвес, который колеблет блок резонатора вокруг оси чувствительности «подавляет», зону захвата и линеаризует выходную характеристику [6, 7].

В [4] приводится обширный статистический материал по применению гироскопов, построенных на разных физических принципах, в современных системах управления и навигации. КЛ используются в изделиях, работающих в условиях жестких внешних воздействий, что говорит о возможности их неограниченного применения в инклинометрии. Несмотря на наличие движущегося механического виброподвеса, КЛ обладают высокой устойчивостью к внешним воздействиям. В [5] приведены данные по устойчивости ко всем видам воздействий, включая климатические и механические. Сообщается, что суммарная нестабильность смещения нуля КЛ не превышает 0,002 град/ч.

Основополагающие исследования в области лазерной гироскопии относятся к 60-м – 70-м годам прошлого века [6, 7]. Однако актуальные информационные материалы публикуются до настоящего времени [8, 9]. Продолжаются исследования, направленные на оптимизацию виброподвесов, создающих крутильные колебания в том числе с целью повышения механической устойчивости КЛ. Методом конечных элементов с использованием программной среды *ANSYS* проводятся расчеты параметров колебаний виброподвесов и сравнение с экспериментом [10, 11]. Исследуются зависимости частоты основного типа крутильных колебаний (моды 0) и мод более высокого порядка от геометрических параметров виброподвеса.

Отечественные КЛ десятилетиями специализировались на применении в гражданской авиации [8, 13, 14] при умеренных механических возмущениях. Поэтому затруднено использование данных приборов в инклинометрах, в геологоразведке, проходческих работах и др. Отечественными специалистами также проводятся исследования, позволяющие уменьшить погрешности КЛ, обусловленные механическими воздействиями [15-17].

Целью настоящей работы является исследование влияния внешних колебательных возмущений на поведение параметров КЛ, анализ причин возникновения отклонений в разностной частоте встречных волн и поиск путей уменьшения погрешностей для расширения функциональных возможностей, и сферы применения отечественных КЛ, включая инклинометры и другие системы управления на основе КЛ.

1 Компьютерное моделирование механической системы КЛ

Объектом настоящего исследования являлся четырех зеркальный КЛ [13, 14] с активной газовой средой из смеси He и Ne, с линейной поляризацией генерируемого излучения на длине волны $\lambda=0,6328$ мкм. Для обеспечения функционирования КЛ при внешних колебательных возмущениях в системах управления применяется комплексная амортизация блока чувствительных элементов [18], что затрудняет выявление механизма возникновения погрешностей. Поэтому представленные в работе исследования КЛ проводились на жестком основании без амортизации.

Во многих работах [15-17] были обнаружены ошибки показаний КЛ, возникающие под действием колебательных возмущений. Очевидно, что внешнее механическое воздействие не может влиять на усиление активной среды КЛ, потери на зерка-

лах резонатора и на другие оптические параметры. Ошибки показаний КЛ могут быть обусловлены его механическими подвижными элементами: виброподвесом, который осуществляет крутильные колебания КЛ, линеаризующие его выходную характеристику, а также пьезокорректором (ПК), который обеспечивает постоянство длины резонатора с помощью перемещения подвижного зеркала [15, 19]. В [16, 17] было установлено, что сбои показаний КЛ происходят на определенных частотах возмущающих колебаний, которые должны совпадать с резонансами конструкции механических элементов КЛ.

Внешние механические колебания не могут возбуждать резонансов конструкции ПК, поскольку частоты собственных мод ПК [19] существенно выше верхней граничной частоты внешнего воздействия. На основе жесткости ПК [15], спектра собственных колебаний ПК [19] и допустимых внешних воздействий в настоящей работе были проведены расчетные оценки, которые позволяют предположить, что сбои работы ПК, приводящие к погрешностям показаний КЛ, обусловлены резонансами виброподвеса. Дальнейшее исследование даст возможность подтвердить это предположение.

Более вероятным источником ошибок является виброподвес, поскольку основная и две побочные собственные колебательные моды установленного на виброподвес КЛ лежат внутри стандартного спектра внешних колебательных воздействий [17].

Динамическая модель КЛ на виброподвесе была синтезирована методом конечных элементов в программной среде *ANSYS*. Расчеты динамического поведения КЛ подтвердили, что в спектр колебательных возмущений, кроме основной моды 0 (крутильных колебаний), укладываются две побочные моды 1 и 2, представляющие собой качания моноблока резонатора вокруг лежащих в плоскости оптического контура осей, амплитуда которых лежит в вертикальной плоскости [17]. В динамике мод 1, 2 отсутствуют угловые перемещения вокруг оси чувствительности КЛ, поэтому они не создают разность частот встречных волн и не могут «выводить» КЛ из зоны захвата. Между собственными модами и внешними возмущениями возникает сложное параметрическое взаимодействие, которое может нарушать режим крутильных колебаний и, следовательно, штатное функционирование КЛ. На рисунке 1а) представлена схема КЛ с восьмилопастным виброподвесом [13]. Эффективность данной конструкции обеспечивается противоположными (попеременно сходящимися–расходящимися) изгибами соседних лопастей, одна из которых крепится к основанию, другая к подвижному моноблоку КЛ [10-13]. Такая схема увеличивает эффективную длину лопасти и позволяет достичь значительной амплитуды крутильных колебаний при большой толщине и прочности лопастей. Однако имеются и недостатки.

Было установлено, что специфика конструкции восьми лопастного виброподвеса [13] определяет спектр собственных частот механических колебаний КЛ [12, 17] и не позволяет существенно увеличить частоты побочных резонансов. Поэтому для сохранения рабочего режима КЛ при внешнем воздействии требуется разработка нового виброподвеса. В спектре частот нового виброподвеса моды 1, 2 должны быть выше верхней границы частотного диапазона внешних колебаний, схема предлагаемой конструкции представлена на рисунке 1б).

Анализ динамической модели КЛ показал, что побочные резонансы возникают из-за винтового изгиба лопастей виброподвеса. Нормальный и винтовой изгибы лопа-

стей представлены на рисунках 2а) и 2б).

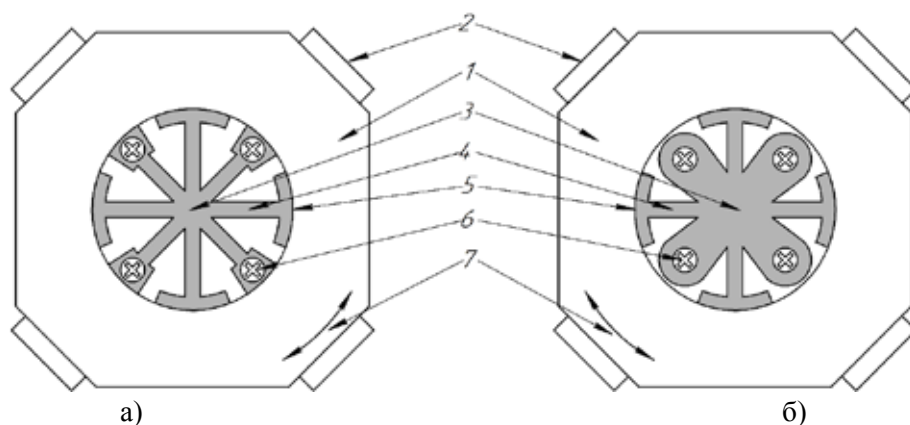


Рисунок 1 – Схемы КЛ с восьми лопастным (а) и разработанным (б) виброподвесами: 1 – моноблок КЛ; 2 – зеркала; 3 – виброподвес; 4 – изгибающиеся лопасти; 5 – места крепления лопастей к моноблоку КЛ, движущиеся относительно основания вместе с моноблоком; 6 – места крепления виброподвеса к основанию, неподвижные относительно основания; 7 – направления крутильных колебаний, создающих расщепление частот встречных волн КЛ

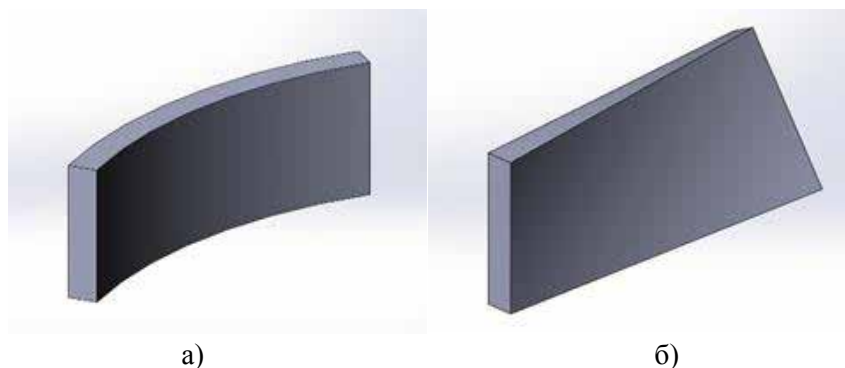


Рисунок 2 – Изгибы лопастей виброподвеса: а) нормальный изгиб при крутильных колебаниях на моде 0; б) винтовой изгиб при качаниях моноблока в вертикальной плоскости на модах 1, 2

Можно заметить, что винтовые изгибы лопастей приводят к наклону и боковому качанию моноблока лазера [17]. Повышение частоты побочных мод возможно за счет повышения упругости винтового изгиба, что достигается укорочением лопасти по радиальному направлению и увеличением ее размеров по вертикальному направлению [21]. Однако, эти возможности ограничены, поскольку увеличение жесткости лопастей приводит к увеличению частоты крутильных колебаний на моде 0, как следствие к уменьшению углового отклонения при той же мощности пьезопривода. Главным ограничением является ухудшение линеаризации выходной характеристики КЛ, вследствие возрастания динамического захвата при увеличении частоты крутильных колебаний [6-8]. Поэтому возникает противоречивая задача: увеличивать частоту моды 1 при сохранении частоты моды 0. Решить данную проблему позволяет учет взаи-

модействия мод при оптимизации геометрии виброподвеса.

Взаимодействие типов колебаний в многомодовых системах известно в общей теории колебаний [21] и изучалось в специальной монографии [7], где рассматривались проблемы конкуренции поперечных мод в КЛ и конкуренция встречных лучей. В настоящей работе модель взаимодействия мод использовалась при оптимизации механической системы виброподвеса КЛ. В расчетах учитывались отклики [21] конструкции всей системы виброподвес – КЛ на гармонические внешние воздействия. Проводилось моделирование взаимодействия основной моды 0, возбуждаемой штатным приводом виброподвеса с побочными модами 1, 2, которые возбуждались внешними механическими колебаниями. Геометрия виброподвеса выбиралась из условия преобладания отклика моды 0 над откликом моды 1. Как будет видно далее, этого оказалось достаточно для сохранения крутильных колебаний при внешнем колебательном воздействии. Используемая в настоящей работе методика позволила существенно улучшить эффективность разработанного виброподвеса по сравнению с результатами [12].

В рамках настоящей работы, на основе проведенного компьютерного моделирования, был спроектирован новый виброподвес, расчетные частоты побочных мод которого превышают верхнюю границу диапазона внешних колебаний, а также основная мода преобладает над побочными модами, возбуждаемыми внешними воздействиями. Согласно динамической модели, КЛ с новым виброподвесом должен сохранять рабочий режим в условиях воздействия внешних колебаний.

2 Экспериментальные исследования и результаты

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование взаимодействия собственных типов колебаний (мод) в механической системе КЛ при внешнем возмущении. Эксперименты проводились на вибростенде, исключающем обратное воздействие резонансов конструкции и позволяющем задавать необходимые режимы колебаний внутри рабочего диапазона частот.

В исследованиях использовалась обычная схема включения КЛ, представленная на рис. 3, со стандартными электронными модулями [8, 17]. На рис. 3 показаны обозначения элементов схемы и регистрация функциональных параметров КЛ. Крутильные колебания корпуса резонатора лазера относительно «закрепленного к Земле» основания регистрировались электромагнитным датчиком угловой скорости (ДУС) [13], выходной сигнал которого $U_{\text{ДУС}}$ наблюдали на осциллографе и записывали в память компьютера. Амплитуда крутильных колебаний моноблока оптического резонатора КЛ дополнительно контролировались по известной методике [20] с помощью оптического коллиматора. Данный контроль во всех экспериментах подтвердил соответствие угловых поворотов моноблока КЛ (горизонтальных и вертикальных) амплитуде сигнала $U_{\text{ДУС}}$.

Встречные лучи КЛ в смесительной призме (5) образовывали интерференционную картину [8], регистрируемую двухплощадочным фотоприемником (7), формирующим информационные квадратурные сигналы вращения $U_{\sin}$ и $U_{\cos}$ [8, 12]. Сигналы $U_{\sin}$, $U_{\cos}$ поступали на цифровой реверсивный детектор (ЦРД), который преобразовывал сигналы вращения в последовательности импульсов и разделял импульсы, накопленные в положительных и отрицательных полупериодах крутильных колебаний.

Сумма импульсов в двух соседних полупериодах соответствовала средней разности частот встречных волн, пропорциональной амплитуде крутильных колебаний относительно неподвижного основания. Разность импульсов в двух соседних полупериодах крутильных колебаний соответствовала постоянной угловой скорости КЛ в инерциальном пространстве.

Ось чувствительности КЛ была ориентирована по местной вертикали, поэтому показания КЛ Ω_n определяются как

$$\Omega_n = \Omega_3 + \Omega_{см}, \quad (1)$$

где $\Omega_3 = 12,44$ град/ч – проекция скорости вращения Земли на местную вертикаль, $\Omega_{см} \sim 0,1$ град/ч – собственное смещение нуля.

Соответственно $\Omega_n \approx 12,5$ град/ч. Следует отметить, что в большинстве современных КЛ зона захвата превышает скорость вращения Земли, поэтому при отсутствии крутильных колебаний, произойдет взаимная синхронизация частот встречных волн, и сигналы вращения обратятся в ноль. Внешнее воздействие последовательно задавалось в трех перпендикулярных направлениях: по оси чувствительности, перпендикулярной плоскости оптического контура; по оси, направленной между анодами, обозначенными на рисунке 3 цифрами 10; по оси, перпендикулярной двум предыдущим осям. Наибольшие ошибки показаний КЛ возникали при колебательном воздействии по одной из двух последних осей, лежащих в плоскости резонатора КЛ. В приводимых ниже экспериментах представлены результаты, полученные при внешнем воздействии по наиболее чувствительной оси.

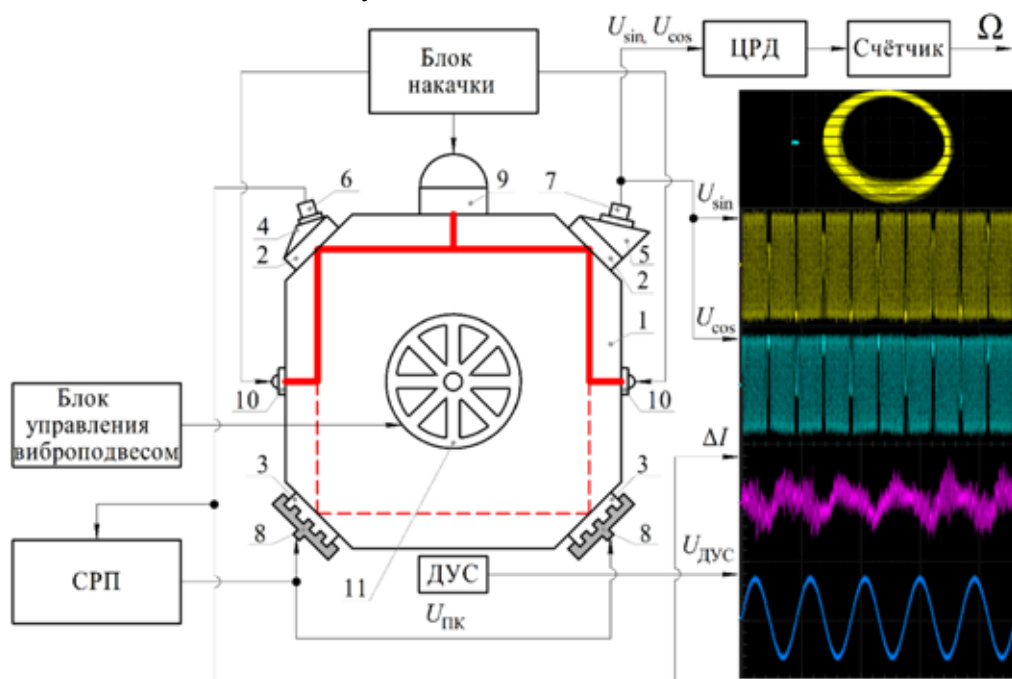


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки регистрации параметров КЛ при вибрационных воздействиях: 1 – моноблок резонатора; 2 – плоские зеркала; 3 – сферические пьезозеркала; 4 – призма системы регулировки периметра (СРП); 5 – смесительная призма; 6 – фотоприемник СРП; 7 – информационный двухплощадочный фотоприёмник; 8 – пьезокорректоры; 9 – катод; 10 – аноды

Экспериментальный анализ поведения функциональных параметров КЛ под действием внешних колебаний начинаем с крутильных колебаний моноблока резонатора. На рисунке 4 показан сигнал $U_{\text{ДУС}}$ в зависимости от частоты $f_{\text{В}}$ воздействующего на КЛ сканирующего внешнего синусоидального колебания в рабочем диапазоне частот. В большей части диапазона сканирования $f_{\text{В}}$ амплитуда $U_{\text{ДУС}}$ не зависит от внешнего воздействия и представляет собой синусоиду, с постоянной частотой, равной частоте крутильных колебаний $f_{\text{КК}}$. В окрестностях собственных частот системы «виброподвес – КЛ» [17] видны локальные изменения $U_{\text{ДУС}}$, обозначенные буквами А, Б, В.

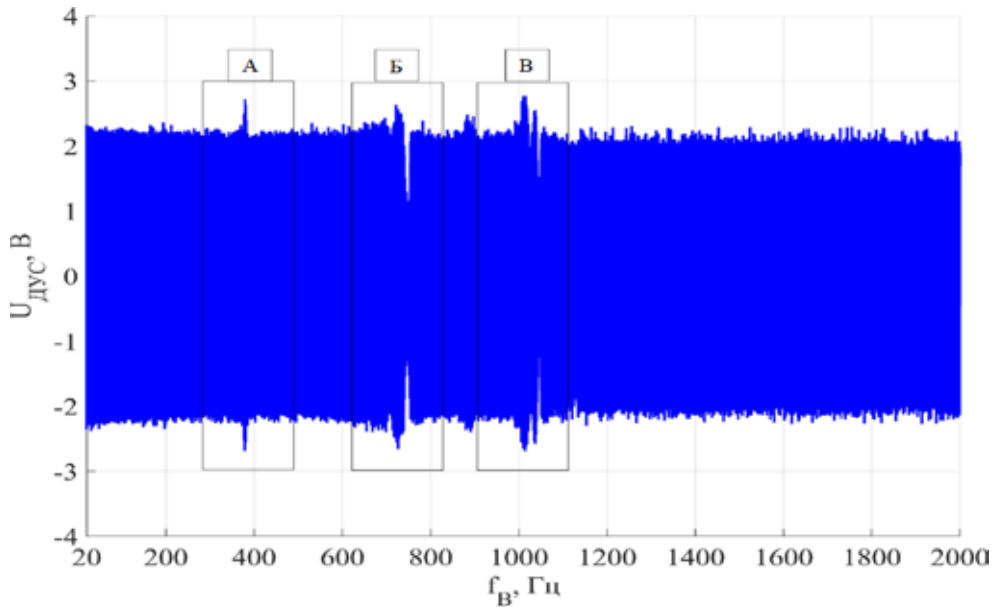


Рисунок 4 – Запись зависимости сигнала ДУС от сканирующей частоты внешнего синусоидального колебания: А – область крутильных колебаний; Б, В – области 1-го и 2-го побочных резонансов, соответственно

Наглядное представление о происходящих изменениях колебаний резонатора КЛ дает спектральный анализ сигнала $U_{\text{ДУС}}$ методом оконного преобразования Фурье [16], которое позволяет выделить гармоники (S_i) сигнала $U_{\text{ДУС}}$, соответствующие амплитудам собственных мод i , где $i=0, 1, 2$. Результаты преобразования приведены на трехмерной диаграмме рис. 5, по горизонтальным осям которой отложены: частота $f_{\text{ДУС}}$ сигнала $U_{\text{ДУС}}$ и сканирующая частота ($f_{\text{В}}$) внешних синусоидальных колебаний. По вертикальной оси показаны амплитуды гармоник S_i , и их изменения под внешним воздействием.

В окрестностях первого и второго резонансов побочных мод 1, 2 (области Б, В), в сигнале $U_{\text{ДУС}}$ возникают колебания на частотах резонансов побочных мод ~ 700 Гц и ~ 1100 Гц, соответствующие, предсказанные теоретической моделью [17]. На данных частотах амплитуды гармоник S_1 и S_2 достигают максимума, а гармоника S_0 обращается в ноль. В области А вблизи частоты основной моды ~ 400 Гц наблюдается периодическое изменение амплитуды $U_{\text{ДУС}}$, вызванное биениями между крутильными и

внешними колебаниями. Вне обозначенных областей на выходе ДУС наблюдается только одна гармоника S_0 , частота которой $f_{\text{ДУС}} = f_{\text{кк}} = 400$ Гц.

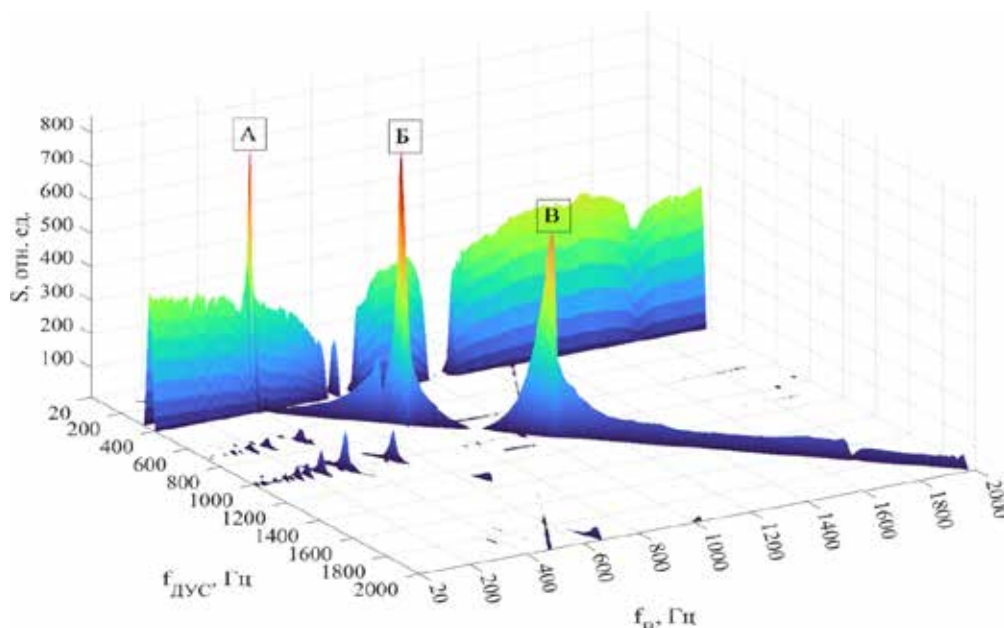


Рисунок 5 – Трехмерная диаграмма «оконного» преобразования Фурье сигнала $U_{\text{ДУС}}$. А – биения крутильных колебаний, вызванные внешней вибрацией (мода 0); Б, В – 1-ый и 2-ой побочные резонансы (моды 1, 2), соответственно

Из экспериментальных данных складывается следующая картина. Крутильные колебания постоянны в большей части диапазона сканирования частоты внешнего воздействия. Вблизи резонанса крутильных колебаний происходит осцилляция их амплитуды с разностной частотой ($f_{\text{в}} - f_{\text{кк}}$). В окрестностях побочных резонансов крутильные колебания КЛ вокруг оси чувствительности постепенно переходят в качания КЛ относительно осей, лежащих в плоскости оптического контура. Описанные изменения колебаний резонатора КЛ приводят к соответствующим изменениям разностной частоты встречных волн. Зависимости разностной частоты и показаний КЛ представлены на рисунке 6. Подавление крутильных колебаний приводит к уменьшению до нуля переменной составляющей разности частот встречных волн, что свою очередь приводит к взаимной синхронизации (захвату) частот встречных волн в КЛ [7 – 9], и исчезновению сигналов вращения. Описанные явления видны в окрестностях побочных резонансов. В этих зонах возникают сбои в измерениях угловой скорости вращения Земли, ошибки показаний достигают 100 град/ч.

Осцилляция амплитуды крутильных колебаний на частоте моды 0 (~ 400 Гц) не приводит к захвату частот встречных волн, но также вызывает ошибку измерений постоянной угловой скорости.

Проведенные эксперименты подтвердили результаты компьютерного моделирования динамики КЛ с восьми лопастным виброподвесом.

В настоящей работе был изготовлен и испытан виброподвес спроектированный в соответствии с построенной динамической моделью. В таблице 1 представлены рас-

четные и экспериментальные данные собственных частот виброподвесов различных конструкций: $f_{8л}$ – стандартного восьмиллопастного подвеса, $f_{4л}$ – представленного и разработанного авторами в настоящей работе подвеса, а также $f_{4л}^*$ – четырехлопастного виброподвеса зарубежных разработчиков [12].

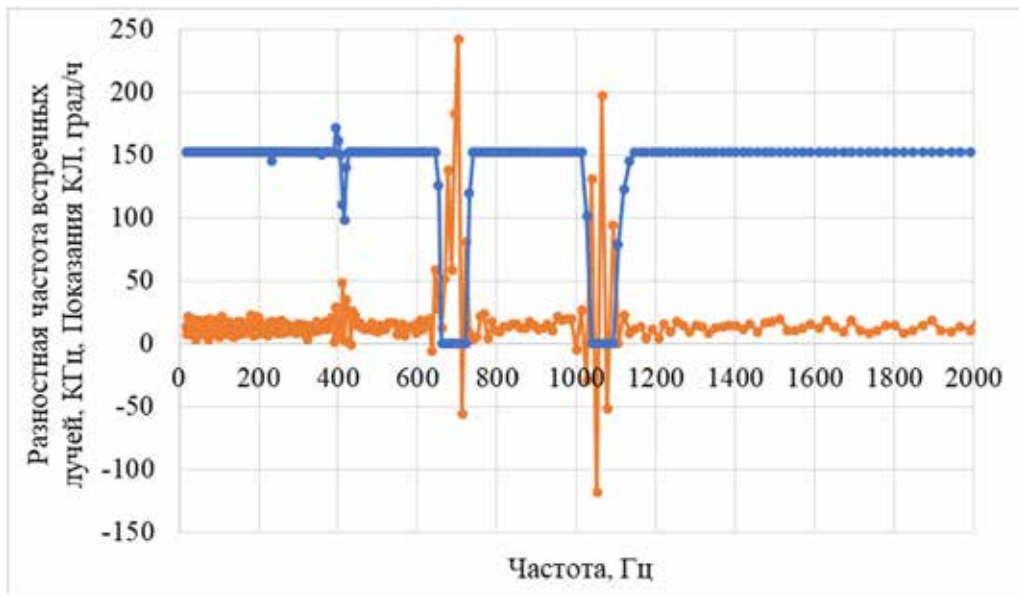


Рисунок 6 – Зависимость разностной частоты встречных лучей и показаний КЛ от сканирующей частоты внешнего синусоидального колебания для КЛ с 8-ми лопастным виброподвесом. Синяя кривая – разность частот встречных лучей; оранжевая кривая – показания КЛ при стандартной обработке сигналов вращения

Т а б л и ц а 1 – Частотные характеристики виброподвесов КЛ.

№ моды	Расчет $f_{8л}$, Гц	Расчет $f_{4л}$, Гц	Эксперимент $f_{4л}$, Гц	Расчет $f_{4л}^*$, Гц	Эксперимент $f_{4л}^*$, Гц
0	370	330	300	780	770
1	730	2330	1750	1980	1970
2	1100	4260	-	2400	2460
3	2020	-	-	-	-

Как видно из табл. 1 в реальной конструкции разработанного виброподвеса частоты побочных мод оказались меньше расчетных, частота резонансной моды 1 увеличилась до ~ 1750 Гц и вплотную приблизилась к верхней границе частотного диапазона внешних колебаний. Резонанс моды 2 вышел за границу данного диапазона и не проявлялся. Представленные результаты согласуются с данными работы [12]. Стоит заметить, что для достижения аналогичного результата авторам работы [12] пришлось повысить собственную частоту крутильных колебаний виброподвеса почти в 2 раза до 770 Гц, а разница в частоте между модой 0 и модой 1 составила 1200 Гц. Предложенный в настоящей работе виброподвес, работает на резонансной частоте крутильных колебаний 300 Гц, с разницей в 1450 Гц с модой 1. При этом разработанный виброподвес обеспечил достаточную амплитуду крутильных колебаний и такое же рас-

щепление частот встречных волн в сравнении с известным восьми лопастным виброподвесом. Чем больше разность частот моды 1 и моды 0, тем эффективнее конструкция виброподвеса, позволяющая сохранить эффективность линейаризации выходной характеристики (сохранением частоты крутильных колебаний) и обеспечить стабильные крутильные колебания в диапазоне частот внешних воздействий.

Экспериментальный анализ взаимодействия мод в новом виброподвесе проводился в соответствии с разработанными методиками по зависимостям сигнала $U_{\text{ДУС}}$ от частоты внешних колебаний. Спектр сигнала $U_{\text{ДУС}}$, полученный методом оконного преобразования Фурье представлен на рисунке 7, подавления гармоник основной моды S_0 не наблюдается. Эксперименты демонстрируют слабые искажения сигнала ДУС на превышающих основную моду частотах, следовательно, мода 0 доминирует над побочными резонансами конструкции. Как следствие, во всем частотном диапазоне внешних воздействий сохраняются крутильные колебания резонатора КЛ. Биения на моде 0 между крутильными колебаниями и внешним воздействием также сохраняются.

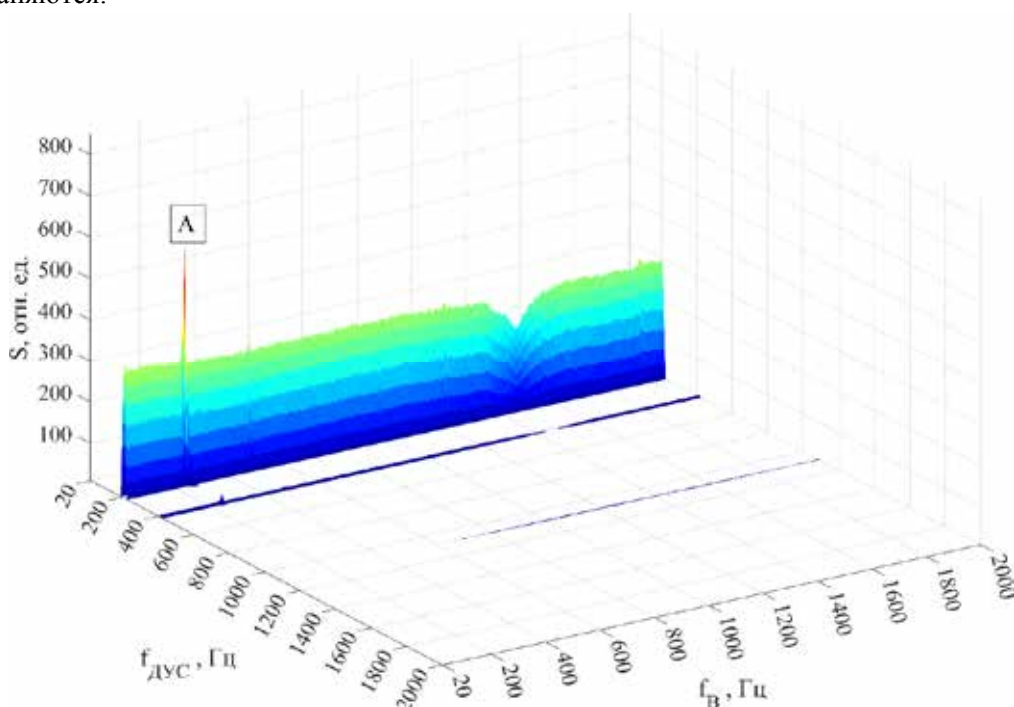


Рисунок 7 – Трехмерная диаграмма оконного преобразования Фурье сигнала ДУС для КЛ с новым виброподвесом: А – биения крутильных колебаний, вызванные внешней вибрацией (мода 0)

Экспериментальные зависимости выходных параметров КЛ с разработанным виброподвесом от частоты внешних колебаний представлены на рисунке 8. Искажения разностной частоты встречных волн f_n (пропорциональной амплитуде крутильных колебаний) проявились вблизи моды 0 и в области высоких частот, причем они не превышают 10% от номинала. При малых изменениях разности частот встречных волн практически устраняются сбои показаний КЛ. Разброс измеренных значений угловой скорости в КЛ с новым виброподвесом уменьшился на порядки, и составляет

$\sim 0,03$ град/ч, некоторое увеличение до $\sim 0,07$ град/ч наблюдается в области высокой частоты внешних колебаний. Наблюдаемые ошибки показаний КЛ обусловлены быстрыми изменениями переменной разностной частоты, вызванные влиянием биеений крутильных колебаний и остаточным резонансом конструкции. Данные ошибки показаний КЛ можно еще уменьшить обработкой выходной информации.

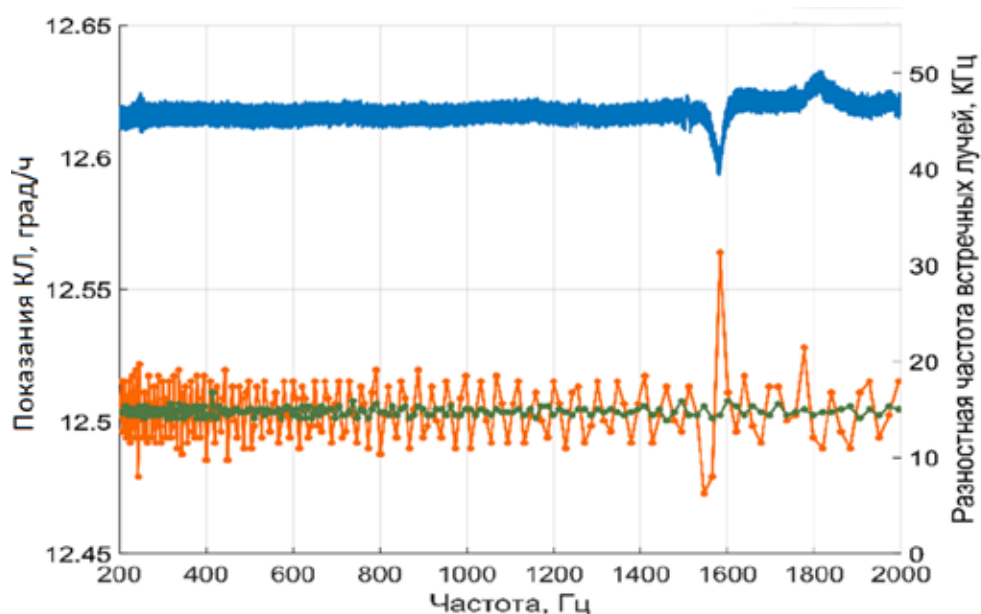


Рисунок 8 – Зависимость разности частот встречных волн и показаний КЛ от сканирующей частоты внешнего синусоидального колебания для КЛ с новым виброподвесом. Синяя кривая – разность частот встречных лучей; оранжевая кривая – показания КЛ при стандартной обработке сигналов вращения; зеленая кривая – показания КЛ при фильтрации сигналов вращения

В настоящей работе для уменьшения ошибок использовалась специально предложенная линейная фильтрация показаний КЛ, которая позволила уменьшить ошибки измерения угловой скорости Ω_n до величины, соизмеримой с ошибками в отсутствии внешнего воздействия (рисунок 8).

Столь значительное уменьшение ошибок показаний КЛ подтверждает сделанное выше предположение о незначительном влиянии изменения периметра на погрешность КЛ, обусловленную внешними колебаниями.

Представленные в настоящем разделе результаты подтверждают достоверность проведенных теоретических и экспериментальных исследований, а также эффективность предложенных технических решений по уменьшению погрешностей КЛ под воздействием внешних колебаний.

Заключение

В работе проведено детальное исследование воздействия внешних механических колебаний на параметры кольцевого лазера с механической линеаризацией выходной характеристики (виброподвесом). Выявлены причины возникновения откло-

нений параметров КЛ и возникновения погрешностей измерения угловой скорости. Показана возможность уменьшения отклонения показаний КЛ до величин, соизмеримых с отклонениями при отсутствии внешнего воздействия. Создан научно-технический задел для расширения области применения КЛ, включая инклинометры и бурение скважин со сложной траекторией.

Литература

- 1 Малюга А.Г. Инклинометры для исследования глубоких и сверхглубоких скважин. Тверь: Фактор, 2002. 519 с.
- 2 Арсланов И.Г. Особенности применения непрерывных гироскопических инклинометров // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2018. № 5. С.16-19.
- 3 Биндер Я.И., Мусолимов Б.М. Сергушин П.А., Соколов Д.А. Динамика гироскопического инклинометра // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, №2. С.7-11.
- 4 Robin L., Perlmutter M. Gyroscopes and IMUs for Defence Aerospace and Industrial // Report by Yole development, 2012.
- 5 Damianos D., Girardin G. High-End Inertial Sensors for Defense, Aerospace & Industrial Applications // Market and Technology Report by Yole Development. 2020.
- 6 Ароновиц Ф. Лазерные гироскопы / В сборнике Применение лазеров под ред. В.П. Тычинского М.: Мир, 1974. С.182-270.
- 7 Волновые и флуктуационные процессы в лазерах / Под ред. Ю.Л. Климонтовича. М.:Главное изд-во физ-мат. литературы, 1974.
- 8 Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2015. 316 с.
- 9 Медведев В.М., Синельников А.О., Тихменев Н.В., Ушанов А.А. Современное состояние и тенденции развития инерциальных навигационных систем на кольцевых лазерных гироскопах // Фотоника, 2024. Т. 18, № 6, С. 450-466.
- 10 Dong-Chen Lee, Jae-Ho Jang, Chang-Soo Han. Parametric design consideration of a vibro-elastic bimorph piezoelectric converter for a ring laser gyroscope. Smart Mater. Struct., 15 (2006), P. 1165-1171.
- 11 Xudong Yu, Xingwu Long. Parametric design of mechanical dither with bimorph piezoelectric actuator for ring laser gyroscope. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. 2015. №47. P.305-312.
- 12 Xu-dong Yu, Guo Wei, Xing-wu Long, Jian-xun Tang. Finite Element Analysis and Optimization of Dither Mechanism in Dithered Ring Laser Gyroscope. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 14, No. 3, March 2013, p. 415-421.
- 13 Кузнецов А.Г., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А. Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. 2015. Т. 45, № 1. С.78-88.
- 14 Енин В.Н., Санеев И.В., Волков Э.В. Малогабаритный прецизионный лазерный гироскоп с виброподставкой // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2017, № 5, С.105-118.
- 15 Грушин М.Е., Колбас Ю.Ю. Вибрационная ошибка лазерных гироскопов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2017. №4 (115). С.27-42.

16 Гаврилов А.В., Тихменев Н.В., Фимкин А.А., Синельников А.О. Анализ крутильных колебаний лазерного гироскопа на виброподвесе с использованием программного комплекса «Луч» // Естественные и технические науки. 2024. №3 (190). С.186-189.

17 Тихменев Н.В., Назаров С.И., Ушанов А.А., Синельников А.О. Исследование функционирования кольцевого лазерного гироскопа при вибрационных воздействиях // Управление большими системами. Выпуск 109. С. 293-309.

18 Тихомиров В.В., Дзуев А.А., Голиков В.П., Требухов А.В. Калибровка БИНС с блоком инерциальных датчиков, закрепленным на амортизаторах // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27. №1. С.33-46.

19 Болотнов С.А., Назаров С.И., Синельников А.О., Тихменев Н.В., Ушанов А.А. Анализ погрешностей лазерных гироскопов при активной стабилизации периметра // Гироскопия и навигация. 2024. Том 32. №3 (126). С.3-203.

20 Романов П.С., Синельников А.О., Ушанов А.А. Лабораторный стенд для исследования кольцевых лазерных гироскопов на виброподвесе // Бортвые комплексы управления: материалы Первой конференции молодых ученых, Москва, 8 ноября 2023 года. Москва: Издательско-торговая корпорация "Дашков и К", 2023. С.34-36.

21 Прочность, устойчивость, колебания: справочник / под ред. И.А.Биргера, Я.Г.Пановко. М.: Машиностроение, 1968.

Афанасьев Виктор Борисович – кандидат технических наук, начальник отдела, АО «ГосНИИП», Москва.

Область научных интересов: надежность и качество образцов ВТ и СТ, система управления качеством и надежностью предприятий машиностроения.

Email: corund@gosniip.ru

Медведев Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, генеральный директор, АО «ГосНИИП», Москва.

Область научных интересов: техническая диагностика, организационно-технические вопросы управления эксплуатацией изделий.

Email: corund1@gosniip.ru

Синельников Антон Олегович – кандидат технических наук, начальник лаборатории, АО «ГосНИИП», Москва.

Область научных интересов: лазерная гироскопия, инерциальные навигационные системы, газовые лазеры.

Email: corund2@gosniip.ru

Романов Павел Сергеевич – инженер-стажер, АО «ГосНИИП», Москва.

Область научных интересов: лазерная гироскопия, системы управления летательными аппаратами.

Email: corund3@gosniip.ru

Тихменев Николай Вадимович – кандидат физико-математических наук, начальник отдела, АО «ГосНИИП», Москва.

Область научных интересов: лазерная гироскопия, вакуумные и оптические технологии инерциальных датчиков, технологическое обеспечение надежности.

Email: corund4@gosniip.ru

Ушанов Александр Александрович – ведущий инженер, АО «ГосНИИП», Москва.

Область научных интересов: лазерная гироскопия, инерциальные навигационные системы, системный анализ.

Email: corund5@gosniip.ru

Болотнов Сергей Альбертович – кандидат технических наук, доцент, главный специалист, АО «ГосНИИП», Москва.

Область научных интересов: лазерная гироскопия, инерциальные навигационные системы.

Email: corund6@gosniip.ru

Бакутин Сергей Александрович – кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора, АО «ГосНИИП», Москва.

Область научных интересов: инерциальные навигационные системы, бортовые комплексы управления.

Email: corund7@gosniip.ru

Назаров Сергей Иванович – техник, АО «ГосНИИП», Москва.

Область научных интересов: лазерная гироскопия, математическое моделирование.

Email: corund8@gosniip.ru

129226, г. Москва, Проспект Мира, дом 125.

Коротичкий Евгений Викторович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург.

Область научных интересов: инерциальные навигационные системы, системы жизнеобеспечения лазерных гироскопов, алгоритмы обработки информации

Email: office@smtu.ru

190121, г. Санкт-Петербург, Лоцманская улица, дом 3.

Остапенко Сергей Николаевич – доктор технических наук, профессор, помощник генерального директора, Концерн ВКО «Алмаз – Антей», Москва.

Область научных интересов: надежность и качество образцов ВТ и СТ, система управления качеством и надежностью предприятий машиностроения

Email: quality@almaz-antey.ru

121357, г. Москва, Верейская улица, дом 41.

STUDY OF RING LASER PARAMETERS UNDER THE INFLUENCE OF EXTERNAL DISTURBANCES

The paper presents the main results of research on the parameters of ring lasers aimed at expanding the scope of their application and use in directional well drilling as sensors of angular displacements in space. Devices controlling the borehole penetration are subjected to rigid external mechanical influences. Changes in the operating mode of a ring laser under oscillatory external influence and the nature of the influence on the frequency difference of counter waves are investigated. Possibilities of reducing the influence of external oscillation on the laser parameters are considered. The efficiency of the proposed solutions is experimentally confirmed.

Keywords: ring laser, mechanical oscillations, system resonances, oscillation interaction, Fourier transform.

Afanasiev Victor Borisovich - Candidate of Technical Sciences, Head of Reliability Department, JSC "GosNIIP", Moscow.

Research interests: reliability and quality of VT and ST samples, quality and reliability management system of machine-building enterprises.

Medvedev Vladimir Mikhailovich - Doctor of Technical Sciences, Professor, General Director of JSC "GosNIIP", Moscow.

Research interests: technical diagnostics, organizational and technical issues of product operation management.

Sinelnikov Anton Olegovich - Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, JSC "GosNIIP", Moscow.

Research interests: laser gyroscopy, inertial navigation systems, gas lasers.

Romanov Pavel Sergeevich - student of N.E. Bauman Moscow State Technical University, trainee engineer, GosNIIP JSC, Moscow.

Research interests: laser gyroscopy, aircraft control systems.

Tikhmenev Nikolay Vadimovich - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Department, JSC "GosNIIP", Moscow.

Research interests: laser gyroscopy, vacuum and optical technologies of inertial sensors, technological reliability assurance.

Ushanov Alexander Aleksandrovich - postgraduate student of ANO DPO "Scientific and Educational Center of Air and Space Defense 'Almaz-Antey' named after academician V.P. Efremov", leading electronic engineer of JSC "GosNIIP", Moscow.

Research interests: laser gyroscopy, inertial navigation systems, system analysis.

Bolotnov Sergey Albertovich - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Specialist, JSC "GosNIIP", Moscow.

Research interests: laser gyroscopy, inertial navigation systems.

Bakutin Sergey Alexandrovich - Candidate of Technical Sciences, Deputy General Designer - Chief Designer in the direction of JSC “GosNIIP”, Moscow.

Research interests: inertial navigation systems, on-board control systems.

Nazarov Sergey Ivanovich - technician of the first category, JSC “GosNIIP”, Moscow.

Research interests: laser gyroscopy, mathematical modeling.

Korotitsky Evgeny Viktorovich - Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, “Saint-Petersburg State Marine Technical University”, Saint-Petersburg.

Research interests: inertial navigation systems, life support systems of laser gyroscopes, information processing algorithms.

Ostapenko Sergey Nikolayevich - Doctor of Technical Sciences, Professor, Assistant Director General for QMS, Almaz-Antey VKO Concern, Moscow.

Research interests: reliability and quality of VT and ST samples, quality and reliability management system of machine-building enterprises.

УДК 629.052.3

ВОПРОСЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМОВ АВТОНОМНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В ГРУППАХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Липаков Н.Е.

Рассмотрен метод автономного навигационного обеспечения группы летательных аппаратов на базе существующей аппаратуры определения взаимных координат в условиях снижения доступности сигналов спутниковых радионавигационных систем.

Ключевые слова: межсамолётная навигация; радиопеленгация; автономная синхронизация; определение взаимных координат.

Введение

В основе эффективной работы летательных аппаратов на всех этапах их действий является навигационное обеспечение, позволяющее реализовать предписанный порядок взлета, следования по заданному маршруту, включая промежуточные пункты маршрута, прибытие в зону применения по назначению, а также возврат на аэродром базирования. Для организации указанного обеспечения каждый объект имеет пилотажно-навигационный комплекс (ПНК) бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО), включающий различные источники координатной информации, такие как [1]:

- автоматические радиокompасы (АРК);
- инерциально-навигационные системы (ИНС);
- системы воздушных сигналов (СВС);
- бортовое оборудование радиотехнических систем ближней (РСБН) и дальней навигации (РСДН);
- частотные и импульсные радиовысотомеры;
- навигационную аппаратуру потребителей (НАП) спутниковых радионавигационных систем (СРНС).

Кроме того, летательные аппараты могут быть оснащены аппаратурой ОВК, предназначенной для организации взаимодействия с объектом-топливозаправщиком или в составе группы (пары, звена) объектов тактической авиации.

В настоящий момент наблюдается ухудшение качества работы радиотехнических систем навигационного обеспечения и возможности определения координат по сигналам СРНС, обладающих низкой помехоустойчивостью [2], что делает их применение невозможным при воздействии преднамеренных помех.

В связи с тем, что существующие в настоящий момент системы ОВК основываются на обмене по радиоканалу информацией об абсолютном местоположении летательных аппаратов (ЛА), формируемой в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ) ПНК на основе комплексной обработки информации от различных источников, в том числе – НАП СРНС. При этом воздействие средств РЭБ усложняет

задачу, предусмотренных тактикой применения летательных аппаратов [3, 4] и усиливает потребность в автономном навигационном обеспечении.

1 Алгоритмы определения взаимных координат

В существующей аппаратуре ОВК реализованы два основных режима [5]:

- режим «Встреча» для организации взаимодействия с объектом-топливозаправщиком;
- режим «ОВК» для организации взаимодействия в группе до 12 ЛА.

Структурная схема взаимодействия объектов в режиме «Встреча» показана на рисунке 1.

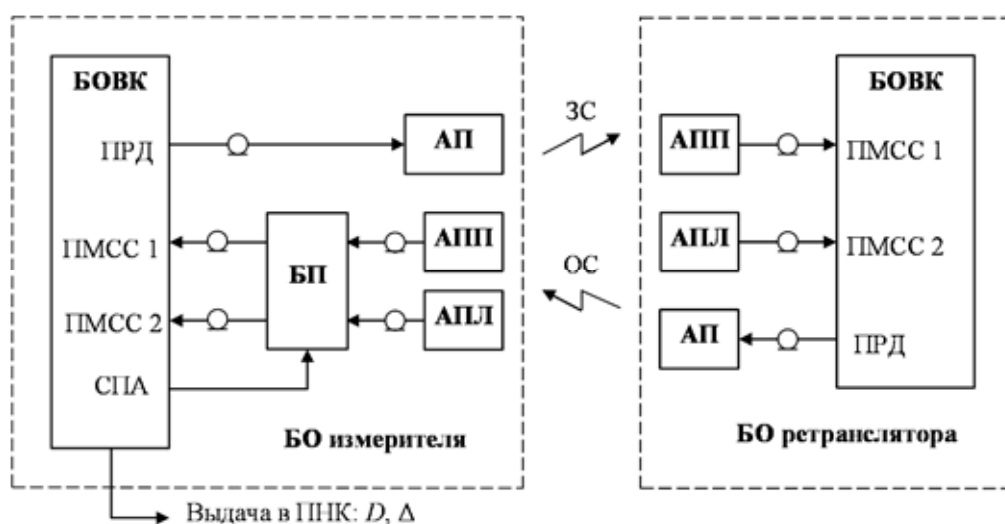


Рисунок 1 – Структурная схема взаимодействия объектов в режиме «Встреча»

Бортовое оборудование ЛА-измерителя, работающего в режиме «Встреча», включает:

- блок ОВК (БОВК), осуществляющий измерение дальности и пеленга на взаимодействующий объект-топливозаправщик (ЛА-ретранслятор);
- передающую антенну (АП) с круговой ДН, подключенную к передатчику (ПРД) через которую аппаратура ОВК осуществляет излучение запросных сигналов (ЗС);
- правую (АПП) и левую (АПЛ) приёмные антенны, через которые аппаратура ОВК поочередно осуществляет приём от ЛА-ретранслятора ответных сигналов (ОС);
- блок переключения (БП), управляемый аппаратурой ОВК с помощью сигнала переключения антенн (СПА), выдаваемого БОВК с темпом 6 Гц для поочередного подключения АПП и АПЛ к входам приёмников межсамолётной связи (ПМСС 1 и ПМСС 2).

Диаграммы направленности (ДН) приёмных антенн, определяющие равносигнальное направление, сформированы таким образом, что их пересечение на уровне минус 3 дБ происходит на продольной оси ЛА в направлении полёта, при этом:

- ширина линейной зоны определения пеленга, в которой измеряемая величина пеленга пропорциональна угловому отклонению ЛА-ретранслятора, составляет $\pm 3^\circ$;

- полная зона определения пеленга составляет $\pm 10-15^\circ$.
- за пределами зоны $\pm 15^\circ$ измеритель осуществляет только определение полу-сферы в которой располагается ретранслятор – правой или левой, а также измерение дальности D до него.

Бортовое оборудование ЛА-ретранслятора имеет схожий состав, однако приёмные антенны подключаются к приёмным входам ПМСС 1 и ПМСС 2 БОВК напрямую для обеспечения круговой ДН по приёму.

Взаимное расположение ЛА при измерении пеленга показано на рисунке 2.

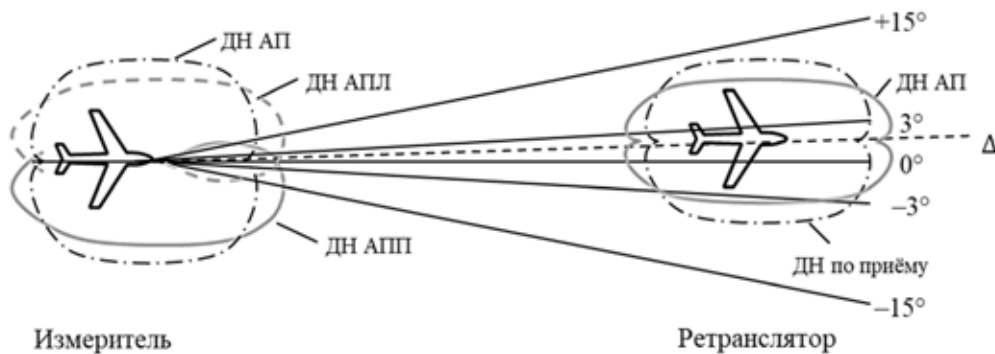


Рисунок 2 – Взаимное расположение ЛА при измерении пеленга

Алгоритм измерения взаимных координат в режиме «Встреча» включает два канала – дальномерный и угломерный. Измерение дальности между ЛА строится по традиционному методу «запрос-ответ». Запросные сигналы (ЗС) ЛА представляют собой пары амплитудно-модулированных радиоимпульсов, а ответные сигналы (ОС) – группы из трёх амплитудно-модулированных радиоимпульсов с заданными кодовыми расстояниями τ_t , τ_r и τ_k между ними. Излучение запросных сигналов осуществляется ЛА-измерителем в соответствии с внутренними алгоритмами работы БОВК, излучение ответных сигналов осуществляется ЛА-ретранслятором через фиксированный временной интервал с момента обнаружения запросных сигналов, как показано на рисунке 3.

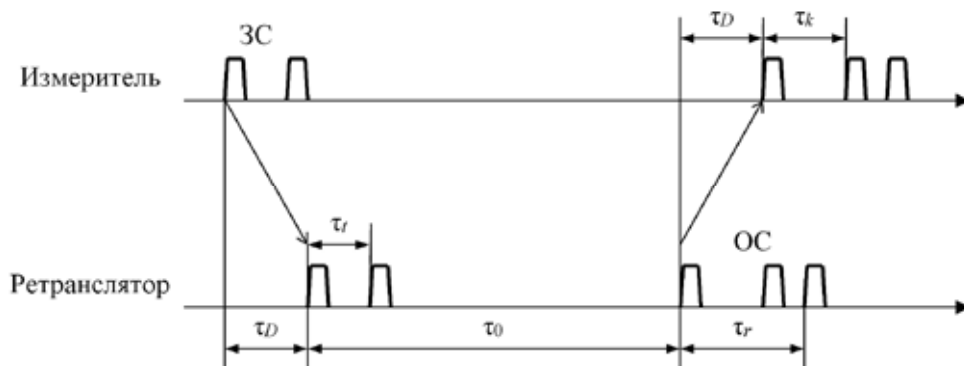


Рисунок 3 – Измерение дальности между ЛА

Ответные сигналы поступают на вход приёмного устройства ЛА-измерителя с задержкой, равной

$$\tau_D = 2D/c + \tau_0 + \tau_t + \tau_r, \quad (1)$$

где D – дальность между ЛА;

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с};$$

τ_0 – длительность фиксированной задержки в БОВК ЛА-ретранслятора;

τ_t и τ_r – длительность кодов запроса и ответа.

Поскольку величины τ_0 , τ_t и τ_r , заложенные при проектировании аппаратуры, известны, БОВК ЛА-измерителя может определить искомую дальность по формуле

$$D = 0,5 \cdot c \cdot (\tau_D - \tau_0 - \tau_t - \tau_r). \quad (2)$$

Алгоритм обработки угловой информации предназначен для определения угла пеленга Δ между продольной осью ЛА-измерителя и направлением на ЛА-ретранслятор. В качестве входной информации для угломерного алгоритма используются измеренные значения амплитуд ответных дальномерных импульсов A_1 и A_2 , полученные при приеме этих сигналов поочередно от антенн правого и левого борта. Обработка осуществляется с накоплением сигналов по каждому антенному тракту – не менее 7 обнаруженных ответов при 10 запросах.

По значениям A_1 и A_2 БОВК вычисляет средние значения амплитуд в каждой пачке $\bar{A}_1$ и $\bar{A}_2$, после чего вычисляет значение коэффициента разнотелешимости антенн

$$\text{КРС} = \frac{\bar{A}_1 - \bar{A}_2}{\bar{A}_1 + \bar{A}_2}, \quad (3)$$

связанного с величиной угла Δ соотношением

$$\Delta = s \cdot \text{КРС}, \quad (4)$$

где s – крутизна пеленгационной характеристики измерителя, определяемая ДН АПП и АПЛ.

Для организации взаимодействия ЛА в режиме «Встреча» необходимы только настройка аппаратуры для работы на общем частотно-кодовом канале, поэтому режим является полностью автономным и не зависит от работы иного бортового навигационного оборудования.

Недостатками режима «Встреча» являются:

- ограниченное число взаимодействующих ЛА – измеритель и ретранслятор;
- отсутствие у ретранслятора информации о координатах измерителя.

В отличие от режима «Встреча», режим «ОВК» бортовой аппаратуры имеет более сложную структуру взаимодействия между ЛА, показанную на рисунке 4, и поддерживает работу до 12 ЛА в группе.

При работе в режиме «ОВК» каждый объект использует навигационную информацию I , передаваемую от БЦВМ в БОВК, включая данные об абсолютных координатах – широте φ , долготе λ , высоте h , а также параметрах движения данного ЛА – путевой скорости $\vec{V}_n$, угла пути Ψ , крена ϑ и тангажа γ , определённых с помощью ИНС, СВС и НАП СРНС [6].

Взаимодействие между ЛА группы осуществляется на общем частотном канале с разделением работы во времени: каждому ЛА в группе размера N предоставляется рабочий интервал (РИ) фиксированной длительности $T_{\text{ри}} = 40$ мс, выделяемых в пределах цикла обмена $T_0 = N \cdot T_{\text{ри}}$ в соответствие с заданным из БЦВМ собственным

номером ЛА.

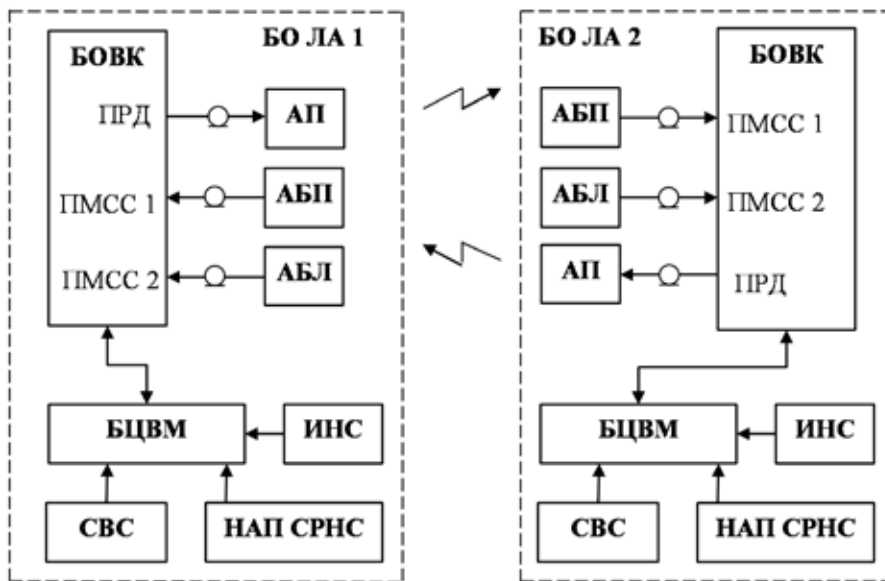


Рисунок 4 – Структурная схема взаимодействия двух объектов в режиме «ОВК»

Пример циклограммы режима «ОВК» для группы из 4 ЛА в показан на рисунке 5.

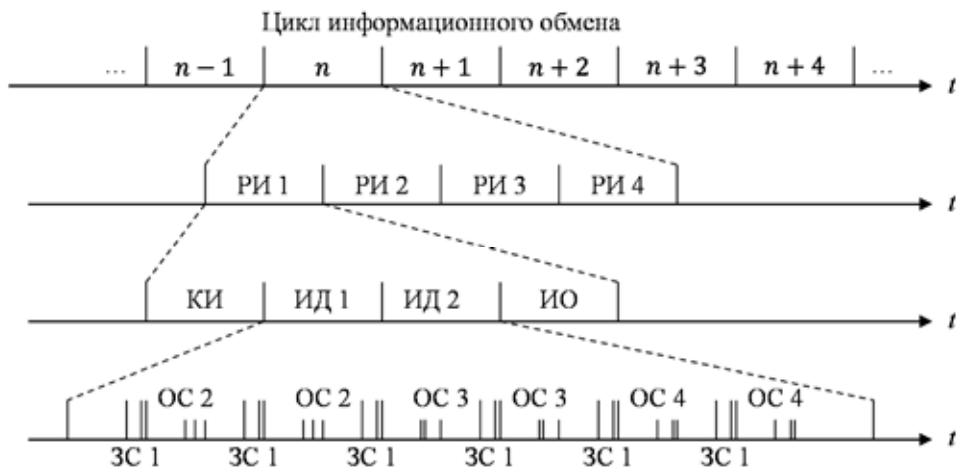


Рисунок 5 – Циклограмма режима «ОВК»:

РИ – рабочий интервал ЛА; КИ – контрольный интервал передачи АСС;
ИД 1, ИД 2 – интервалы измерения дальности; ИО – интервал передачи ИП;
ЗС 1 – запросный сигнал ЛА 1; ОС – ответные сигналы ЛА

В пределах своего РИ каждый БОВК осуществляет:

- излучение к контрольному интервалу сигналов автономной синхронизации (АСС), содержащих информацию о собственном номере ЛА, задаваемом от БЦВМ;
- измерение дальности $D_{i,j}$ до других ЛА, аналогично режиму «Встреча»;

- передачу информационных посылок (ИП), содержащих навигационную информацию, полученную от БЦВМ.

Сигналы АСС представляют собой группы из шести импульсов, имеющие уникальные значения интервалов времени между импульсами для каждого ЛА и определяющие его идентификационный номер.

Используемые для измерения дальности запросные и ответные сигналы представляют собой трёхимпульсные кодовые группы, аналогичные сигналу СЗ режима «Встреча», но имеющие уникальные значения интервалов времени между импульсами для каждого ЛА группы, что обеспечивает кодовое разделение между ЛА.

За пределами своего РИ каждый БОВК осуществляет:

- приём сигналов АСС от других ЛА;
- излучение ОС в ответ на ЗС других ЛА, осуществляющих измерение дальности $D_{i,j}$;

- приём ИП от других ЛА.

В конце цикла информационного обмена каждый БОВК:

- на основе принятых АСС осуществляет синхронизацию своей шкалы времени с БОВК других ЛА для упорядочивания доступа к частотному каналу [6];

- на основании полученной по радиоканалу навигационной информации вычисляет относительные координаты взаимодействующих ЛА в связанной системе координат $OXYZ$ – расчётную дальность $\rho_{i,j}$, пеленг $\phi_{i,j}$ и угол места $\beta_{i,j}$.

Полученная от БОВК координатная информация в ПНК подвергается пересчёту в систему координат, используемую для решения задач ГСВ [6, с. 11]:

- пеленг пересчитывается в курсовой угол,
- наклонная дальность – в горизонтированную дальность;
- угол места пересчитывается в превышение или понижение.

Погрешность определения относительных координат в БОВК, определяемая погрешностью измерения абсолютных координат взаимодействующих ЛА, при отсутствии коррекции координат ИНС по информации от НАП СРНС, имеет тенденцию к росту до 2-5 километров за час полёта [1, с. 194], что делает невозможным применение системы ОВК для работы ЛА на взаимном удалении порядка 150-300 м [4].

2 Автономное навигационное обеспечение

Исходя из вышеизложенных ограничений решение задачи автономного навигационного обеспечения в группах ЛА может быть выполнено по схеме, представленной на рисунке 6.

Локальное навигационное поле при этом будет формироваться на следующих принципах:

1) В качестве опорных объектов будет использоваться пара ЛА, оснащенных минимальным набором автономных средств определения координат: СВС и высотомером, а также БОВК, реализующими модифицированный алгоритм определения взаимных координат.

2) Определение каждым ЛА в группе своих координат – радиальной дальности r_i , азимута α_i и превышения Δh_i будет осуществляться в цилиндрической системе координат, связанной с ЛА 1, координаты которого будут всегда считаться нулевыми.

3) Взаимодействие между ЛА, включая измерение взаимной дальности и коор-

динатный обмен, будет организовано с разделением работы во времени аналогично режиму «ОВК».

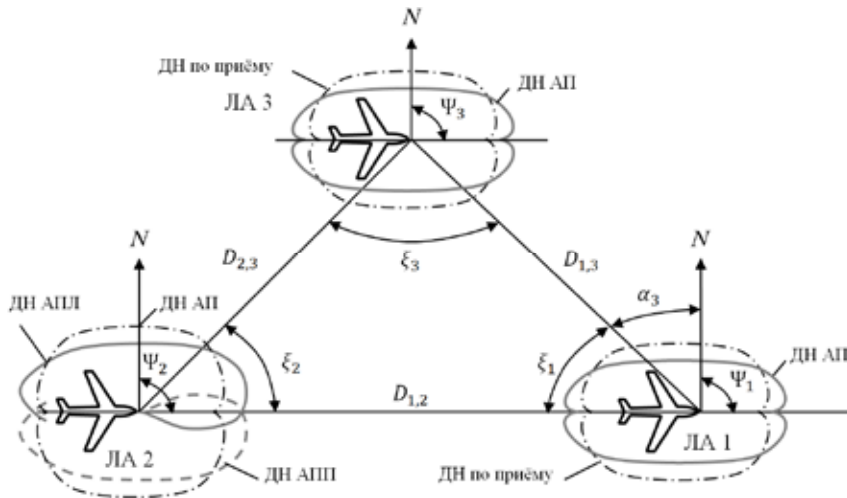


Рисунок 6 – Определение координат в локальном навигационном поле

4) Опорные ЛА для исключения влияния на формирование локального навигационного поля иных ЛА группы и обеспечения устойчивой синхронизации должны иметь наивысшие из возможных «рангов», соответствующие собственным номерам «1» и «2», а прочие ЛА группы – любые номера из множества {3, 4, ... }.

5) В интервале ИД 1 ЛА 2 одновременно с измерением дальности r_i до ЛА 1 будет осуществлять определения величины пеленга Δ_1 на ЛА 1 за счёт поочередного подключения АПП и АПЛ ко входам приёмника, аналогично режиму «Встреча».

6) Расположение ЛА 2 относительно ЛА 1 в процессе работы должно поддерживаться постоянным, так, что бы величина пеленга Δ для обеспечения устойчивости измерений была близка к 0, а величина дальности r_2 обеспечивала высокое отношение «сигнал/шум» q , влияющее на точность измерения дальности между ЛА [8].

7) БОВК ЛА 3 за счет непосредственного измерения величин $D_{3,1}$ и $D_{3,2}$, а также дальности $D_{1,2}$, определяемой при приеме ЗС и ОС ЛА 1 и ЛА 2 [6, с.92], может вычислить внутренний угол по формуле

$$\xi_1 = \arccos \frac{D_{1,3}^2 + D_{2,3}^2 - D_{1,2}^2}{2 \cdot D_{1,3} \cdot D_{2,3}}, \quad (5)$$

а также свой азимут α_2 в системе координат ЛА 1

$$\alpha_3 = \pi - \xi_1 - \Psi_1, \quad (6)$$

где Ψ_1 – путевой угол ЛА 1, полученный по каналу информационного обмена.

8) Устранение неоднозначности определения расположения ЛА 3 своего местоположения – справа или слева относительно направления полёта ЛА 2, будет достигаться за счёт кодового разделения ОС, излучаемых ЛА 2 в ответ на запросы других ЛА через правую или левую антенны соответственно, и имеющих различные значения параметра τ_k .

9) Определение ЛА i превышения Δh_i будет осуществляться расчётным методом по формуле

$$\Delta h_i = H_i - H_1, \quad (7)$$

где H_i – высота ЛА i , измеренная с помощью радиовысотомера;

H_1 – высота ЛА 1, полученная ЛА i по каналу информационного обмена.

Исходя из изложенных принципов, можно осуществить оценку погрешности определения координат ЛА в локальном навигационном поле, сформированном парой опорных ЛА при следующих параметрах:

- $D_{1,2} = 100$ м (минимальная дальность в режиме «ОВК»);

- $D_{1,3} = 100$ или 300 м (минимальная дальность в режимах «ОВК» и «Встреча»);

- $\xi_1 = 15^\circ$ (граница зоны определения параметра Δ , показанной на рисунке 2).

При такой конфигурации взаимного расположения погрешность определения величин $D_{1,3}$ и $D_{2,3}$ будет определяться в основном дискретом отсчёта и вычисляться из выражения [9, с. 533]

$$\sigma_D = \frac{h}{\sqrt{12}}, \quad (8)$$

где $h = c/f_d$ – интервал квантования шкалы времени,

f_d – частота дискретизации входного сигнала.

При осуществлении обработки с усреднением отсчётов величина σ_D , определяемая выражением (8), соответственно уменьшится в $\sqrt{n} = \sqrt{7}$ раз:

$$\bar{\sigma}_D = \frac{\sigma_D}{\sqrt{n}} = \frac{c}{f_d} \cdot \frac{1}{\sqrt{n} \cdot \sqrt{12}}. \quad (9)$$

Погрешность определения углового положения σ_ξ для ЛА 3 будет определяться выражением [6, с.94]:

$$\sigma_\xi = \frac{\bar{\sigma}_D}{D_{1,3} \cdot D_{2,3}} \sqrt{\frac{(k+2) \cdot D_{1,2}^2}{\sin^2(\xi_1)} - D_{1,3}^2 - D_{2,3}^2}, \quad (10)$$

где $k = 3$ для алгоритма вычисления, приведённого в [6, с.92-94].

Положив $f_d = 100$ МГц для $D_{1,3} = 100$ м получаем $\bar{\sigma}_D \approx 0,32$ м и $\sigma_\xi \approx 1,44^\circ$.

Положив $f_d = 50$ МГц для $D_{1,3} = 300$ м, получаем $\bar{\sigma}_D \approx 0,64$ м и $\sigma_\xi \approx 1,05^\circ$.

Полученные значения σ_ξ будут являться предельными значениями погрешности углового определения, поскольку при $\xi_1 \rightarrow 90^\circ$ первое слагаемое под корнем в выражении (10) будет стремиться к минимальному значению, а результирующие погрешности σ_ξ стремиться к величинам $0,35^\circ$ и $0,22$ соответственно.

Определение ЛА 3 величины $\xi_1 \rightarrow 0^\circ$ пределах зоны $\pm 15^\circ$ и $\xi_1 \rightarrow 180^\circ$ в пределах зоны $(180 \pm 15)^\circ$ расчётным методом по формуле (5) даёт неограниченную ошибку $\sigma_\xi \rightarrow \infty$, что делает этот метод непригодным для формирования навигационного поля в указанном секторе. Вместо этого за счёт изменения схемы соединения БОВК и АФС возможно организовать поочередное подключение правой и левой антенны к передающему тракту БОВК и введя кодовое разделение запросов дальности, передаваемой через указанные антенны, осуществлять на ЛА 3 обработку амплитуд этих запросов аналогично выражению (3) с той же погрешностью определения $\sigma_\xi \leq 1,5^\circ$.

Погрешность определения превышения ЛА 3 над ЛА 1 $\sigma_{\Delta H}$ будет определяться погрешностями определения высоты на объектах σ_{H1} , σ_{H2} по известной формуле

$$\sigma_{\Delta H} = \sqrt{\sigma_{H1}^2 + \sigma_{H2}^2},$$

что при использовании высотомеров с погрешностью $3\sigma_{H1} = 3\sigma_{H2} = 15-30$ м [1, с.135] даст величину $3\sigma_{\Delta H} = 21-45$ м.

Заключение

Рассмотренные в настоящей работе методы автономного навигационного обеспечения летательных аппаратов могут быть использованы для решения задач относительной навигации и группового самолётовождения в условиях отсутствия навигационного поля СРНС зоне действия группы пилотируемых или беспилотных ЛА.

Литература

- 1 Леньшин А.В., Тихомиров Н.М., Попов С.А. Бортовые радиоэлектронные системы: учеб. пособие / Под ред. А.В.Леньшина. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2015. 309 с.
- 2 Тяпкин В.Н., Гарин Е.Н. Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2012. 260 с.
- 3 Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра / Под. ред. Е.А.Федосова. М.: Дрофа, 2004. 816 с.
- 4 Антонов Д.А. и др. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс. Боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра. Москва: Дрофа, 2005. 732 с.
- 5 Бабуров В.И., Пономаренко Б.В.. Принципы интегрированной бортовой авионики. СПб.:Агенство «РДК-Принт», 2005. 448 с.
- 6 Орлов В.К., Липаков Н.Е., Рамаданов В.С., Шанин Е.Г. Синхронизация и многостанционный доступ в локальных радиотехнических системах относительной навигации. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 129 с.
- 7 Гусев Д.И. Решение задачи автоматизации полета группы самолетов // Труды МАИ. 2012. № 51.
- 8 Радиотехнические системы: учебник для вузов по специальности «Радиотехника» / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов и др.; Под ред. Ю.М. Казаринова. М.: Высшая школа, 1990. 496 с.
- 9 Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Горячая линия – Телеком, 2014. 608 с.

Липаков Николай Евгеньевич – аспирант, АО «Обуховский завод», г.Санкт-Петербург.

Область научных интересов: самолётовождение, радионавигация.

E-mail: n.lipakov@goz.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

PRACTICAL APPLICATION OF AUTONOMOUS SYNCHRONIZATION ALGORITHMS IN GROUPS OF AIRCRAFT

The article considers a method of autonomous navigation support for a group of aircraft based on existing equipment for determining mutual coordinates in conditions of reduced

availability of satellite radio navigation system signals.

Keywords: inter-aircraft navigation; radio direction finding; autonomous synchronization; determination of mutual coordinates.

Lipakov Nikolay Evgenievich – graduate student, JSC “Obukhov Plant”, St. Petersburg.

Area of scientific interests: aircraft navigation, radio navigation.

УДК 53.082.79

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С АВТОКАЛИБРОВКОЙ ДЛЯ РЕГУЛИРОВКИ МОЩНОСТИ СИГНАЛА ВОЗБУЖДЕНИЯ В КВАНТОВОМ СТАНДАРТЕ ЧАСТОТЫ

Столяров И.И.

Представлен краткий обзор известных подходов к управлению мощностью с анализом их особенностей и недостатков. В докладе приведено описание основных внешних и внутренних факторов, влияющих на мощность сигнала возбуждения и ее оптимальное значение. Предложен метод регулировки мощности с автокалибровкой, способный компенсировать негативное воздействие внешних факторов и показавший в процессе моделирования положительные результаты по поддержанию высокой стабильности выходного сигнала стандарта.

Ключевые слова: квантовый стандарт частоты; автоматическая регулировка; мощность сигнала возбуждения; внешние воздействующие факторы; автокалибровка.

Введение

Квантовые стандарты частоты (КСЧ), генерирующие сигналы высокостабильной частоты, используются в качестве базовых приборов в навигационных спутниковых системах, радиолокационных системах и системах единого времени [1]. Для поддержания высокого уровня выходных характеристик КСЧ в течение длительного срока функционирования необходимо поддерживать стабильность параметров работы стандарта, компенсируя негативное воздействие внешних факторов. Одним из возможных путей совершенствования стандартов частоты различного типа является управление мощностью сигнала возбуждения (СВ).

До начала использования специализированных устройств регулировки основным способом стабилизации мощности СВ являлась ручная установка ослабления с использованием диодного генератора гармоник [2] либо аттенюатора с ручным управлением. Недостатками этого способа являются невысокая точность настройки, а также отсутствие регулировки мощности в процессе функционирования стандарта. Известны решения с применением амплитудной модуляции [3-4], однако наличие постоянно функционирующего дополнительного кольца подстройки КСЧ усложняет стандарт и снижает его надежность. Для решения рассматриваемой задачи возможно использование схем с обратной связью [5-6], применяемых для регулировки мощности в синтезаторах частоты и другой аппаратуре. Недостатком такого решения является отсутствие компенсации долговременных изменений параметров блоков КСЧ, вызванных влиянием внешних факторов. Кроме того, известен метод управления мощностью СВ по половине полной ширины резонансной линии атомного перехода [7], недостатком этого метода является косвенное определение оптимального значения мощности. Проведенный анализ существующих решений показывает необходи-

мость разработки метода автоматической регулировки мощности (АРМ) СВ с отсутствием недостатков вышеописанных методов.

1 Основные соотношения и зависимости базовой модели исследования

В качестве базовой модели исследования использована динамическая имитационная модель атомно-лучевого КСЧ [8], учитывающая стохастические составляющие процессов возбуждения рабочего атомного перехода и детектирования. Параметр возбуждения b , характеризующий мощность СВ в атомно-лучевых КСЧ, соответствующий магнитной составляющей B поля, формируемого в резонаторе, определяется по формуле [9]

$$b = \frac{g_j \mu_B B}{2\hbar},$$

где g_j – g -фактор Ландэ;

μ_B – магнетон Бора;

$\hbar$ – приведенная постоянная Планка.

Функция вероятности скорости атомов пучка в КСЧ описывается модифицированным распределением Максвелла [10]

$$p_v = C_n \frac{v^n}{v_{\text{нв}}^{n+1}} e^{-\left(\frac{v}{v_{\text{нв}}}\right)^2},$$

где $v_{\text{нв}} = \sqrt{\frac{2kT_{\text{иап}}}{m}}$ – наиболее вероятная скорость атомов внутри источника;

k – постоянная Больцмана;

m – масса атома;

$T_{\text{иап}}$ – рабочая температура источника пучка.

Коэффициенты нормализации n и C_n задаются в зависимости от параметров используемых устройств селекции и детектирования.

Вероятность рабочего атомного перехода для данных длин области взаимодействия l и пролетной области L для атома, движущегося со скоростью V , определяется по формуле

$$P = 4 \sin^2 \theta \sin^2 \frac{\alpha l}{2V} \left(\cos \frac{(\omega_0 - \omega)l}{2V} \cos \frac{\alpha l}{2V} - \cos \theta \sin \frac{(\omega_0 - \omega)L}{2V} \sin \frac{\alpha l}{2V} \right)^2,$$

где $\sin \theta = b/\alpha$,

$\alpha = \sqrt{(\omega_0 - \omega)^2 + b^2}$;

$\cos \theta = (\omega_0 - \omega)/\alpha$;

ω_0 – частота рабочего атомного перехода;

ω – частота СВ.

Поток фотонов, испускаемых детектированными атомами, интегрируется в соответствии с постоянной времени $\tau_{\text{фд}}$ фотодетектора, формируя выходной сигнал дискриминатора

$$U_{\text{кд}} = \int_0^{\tau_{\text{фд}}} (\eta_{\text{фд}} q N_{\text{ф}} + I_{\text{т}} + I_{\text{ф}}) dt \cdot R_{\text{н}},$$

где $\eta_{\text{фд}}$ – квантовая эффективность фотодетектора;

q – заряд электрона;

$I_{\text{т}}$ – темновой ток фотодетектора;

$I_{\text{ф}}$ – фоновый ток;

R_n – сопротивление нагрузки детектора.

Графики зависимостей выходного сигнала КД от мощности СВ, полученные усреднением по 100 прогонам имитационной модели, представлены на рисунке 1: 1 – для центральной частоты атомного перехода, 2 – для частоты, сдвинутой от центральной на 250 Гц (возможное значение девиации частоты при применении частотной модуляции).

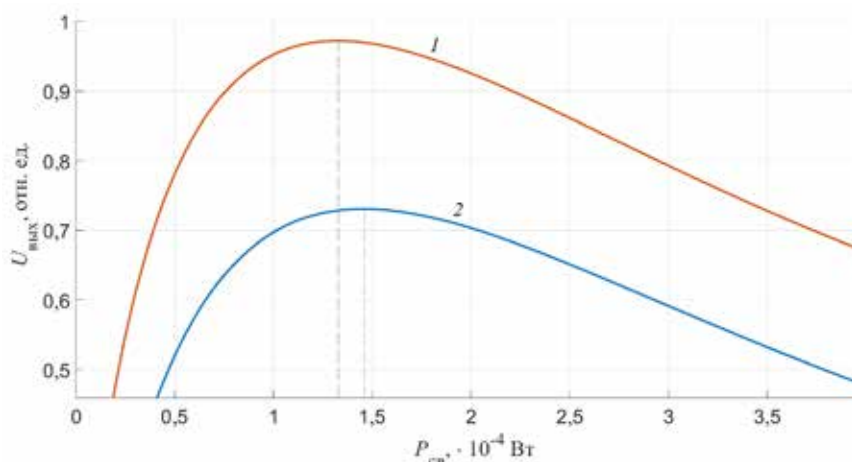


Рисунок 1 – Зависимость амплитуды выходного сигнала квантового дискриминатора от мощности СВ

Штриховыми линиями на графиках отмечены экстремальные значения, соответствующие оптимальным значениям $P_{\text{опт}}$ мощности СВ. Наклон графиков: 0,001 отн. ед./мкВт вблизи $P_{\text{опт}}$ и 0,004 отн. ед./мкВт при изменениях мощности более 40 % от оптимального значения.

2 Влияние внешних и внутренних факторов на параметры функционирования КСЧ

Такие внешние факторы, как температура и влажность среды, ионизирующее излучение, вызывают кратковременные флуктуации параметров КСЧ, а также долговременную деградацию блоков стандарта. В качестве примера на рисунке 2 приведены графики смоделированных изменений мощности СВ, вызванных деградацией элементов КСЧ, для разной интенсивности воздействия внешних факторов. Здесь и далее используется коэффициент масштабирования времени, таким образом, 1 секунда времени моделирования принимается за $0,5 \cdot 10^6$ реальных секунд.

Также на процесс функционирования КСЧ оказывают влияние различные внутренние факторы, например, расход рабочего вещества ведет к уменьшению давления внутри источника атомного пучка и соответствующему снижению интенсивности пучка. Кроме того, с течением времени возможны изменения рабочей температуры источника, среднего значения и неустойчивости напряженности магнитного С-поля, что негативно влияет на параметры функционирования КСЧ, в том числе на оптимальное значение мощности СВ.

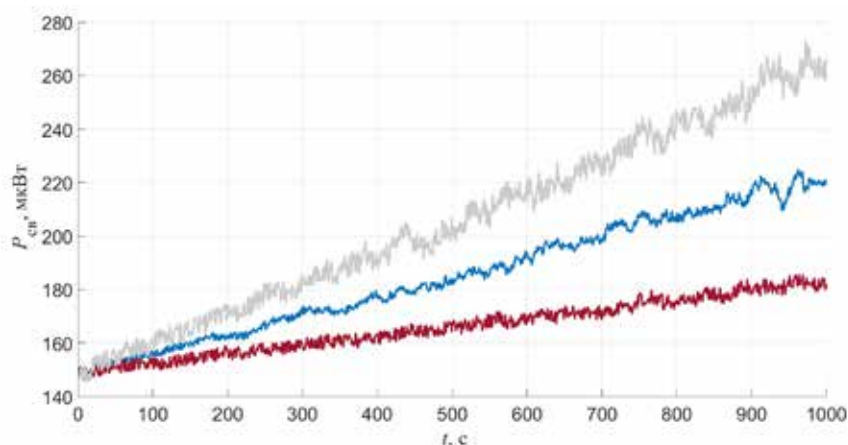


Рисунок 2 – Деградационные изменения мощности СВ во времени

3 Режим стабилизации мощности по обратной связи

Структурная схема КСЧ с применением разработанного метода АРМ СВ, сочетающего достоинства метода амплитудной модуляции [3-4] и схем с отрицательной обратной связью [5-6], приведена на рисунке 3. В основном режиме работы (режим стабилизации мощности с применением обратной связи) устройство АРМ ослабляет СВ посредством аттенюатора, управляемого напряжением. Устройство вычислительное, в соответствии с измерениями датчика мощности, выбранным законом управления и задающим воздействием формирует цифровой код управления, преобразуемый цифро-аналоговым преобразователем в управляющий сигнал, поступающий на аттенюатор для ослабления мощности СВ до оптимального уровня.



Рисунок 3 – Структурная схема КСЧ с устройством АРМ

В устройстве вычислительном используется пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор

$$W_{\text{пид}}(s) = k_{\text{п}} + k_{\text{и}}/s + k_{\text{д}}s,$$

где k_p , k_i , k_d – коэффициенты передачи пропорционального, интегрального и дифференцирующего звеньев соответственно.

В режиме стабилизации по обратной связи устройство АРМ СВ обеспечивает компенсацию случайных флуктуаций мощности СВ.

4 Режим автоматической калибровки

С периодом $T_{\text{калибр}}$ устройство АРМ переключается в режим автокалибровки, в котором определяет оптимальное значение мощности СВ. В этом режиме осуществляется программное ступенчатое изменение ослабления СВ, обработка измерений постоянной составляющей выходного сигнала квантового дискриминатора $U_{\text{кд}}$ и мощности $P_{\text{св}}$ и вычисляются соответствующие оценки $\hat{U}_{\text{кд}}(j)$ и $\hat{P}_{\text{св}}(j)$ для каждого j -ого шага переключения. Поиск оптимальной мощности происходит по программе, заложенной в устройство вычислительное, процесс иллюстрируется временной диаграммой, представленной на рисунке 4.

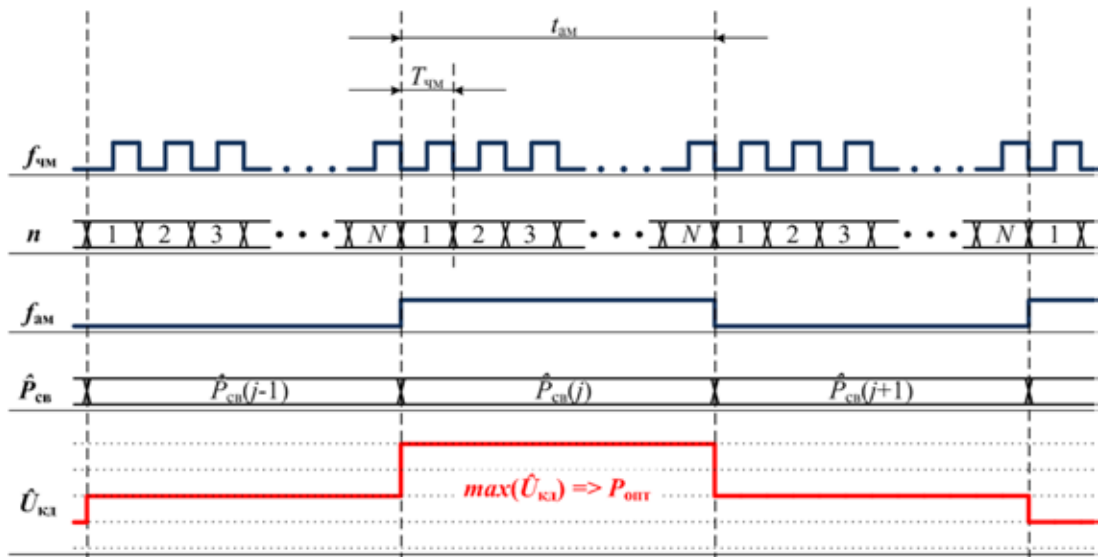


Рисунок 4 – Временная диаграмма режима автоматической калибровки

Устройство вычислительное изменяет мощность СВ, пока не определит пиковое значение постоянной составляющей выходного сигнала квантового дискриминатора

$$\begin{cases} \hat{U}_{\text{кд}}(j) > \hat{U}_{\text{кд}}(j+1) \\ \hat{U}_{\text{кд}}(j) \geq \hat{U}_{\text{кд}}(j-1) \end{cases}$$

По завершении поиска фиксируется оценочное значение мощности СВ, соответствующее найденному оптимальному уровню $\hat{U}_{\text{кд}}(j)$

$$P_{\text{опт}} = \hat{P}_{\text{св}}(j),$$

в режиме стабилизации по обратной связи значение $P_{\text{опт}}$ используется в качестве задающего воздействия для сравнения с текущей оценкой мощности СВ.

Поиск оптимального уровня мощности происходит при непрерывной работе колец автоматической подстройки частоты, при этом используется шаг переключения ослабления длительностью много больше периода $T_{\text{чм}}$ частотной модуляции

$$t_{\text{ам}} \gg T_{\text{чм}},$$

где $t_{\text{ам}}$ – длительность шага переключения ослабления.

Таким образом, режим определения оптимального значения обеспечивает компенсацию долговременных изменений мощности СВ и ее оптимального значения без существенного влияния на точность работы автоматической подстройки частоты.

5 Результаты моделирования применения предложенного метода

Результаты применения предложенного метода регулировки мощности СВ представлены на рисунке 5. Значения амплитуды постоянной составляющей выходного сигнала квантового дискриминатора нормализованы: максимальное значение принимается за единицу. Параметры моделирования: $T_{\text{чм}} = 0,02$ с, $t_{\text{ам}} = 2$ с.

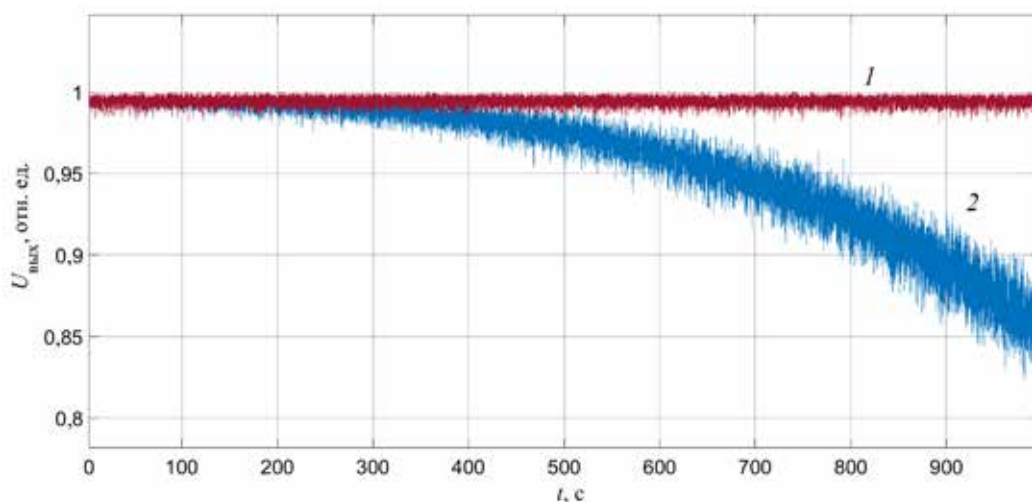


Рисунок 5 – Изменения амплитуды выходного сигнала квантового дискриминатора во времени: 1 – КСЧ с применением АРМ СВ, 2 – КСЧ без регулировки мощности СВ

Разница амплитуд постоянной составляющей сигнала квантового дискриминатора для КСЧ с применением АРМ СВ и без составляет более 15 % при рассмотрении длительного срока функционирования устройства, что означает большую стабильность и точность КСЧ в процессе функционирования.

Заключение

По результатам проведенного моделирования сделан вывод о том, что применение предложенного метода АРМ СВ с автокалибровкой обеспечивает поддержание высокой стабильности выходного сигнала КСЧ в течение длительного срока функционирования устройства при сохранении уровня надежности, без усложнений схемы применением дополнительного кольца автоматической подстройки с амплитудной модуляцией. Дальнейшие исследования планируется проводить в направлении изучения возможностей применения устойчивых к импульсным помехам адаптивных законов регулирования, оптимизации процедуры оценивания измеряемых параметров, а также разработки методики структурно-параметрического синтеза устройств АРМ СВ для различных типов КСЧ.

Литература

- 1 Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. М.: Физматлит, 2009. 511 с.
- 2 Харчев О.П. О стабилизации мощности СВЧ-сигнала радиочастотного возбуждения пассивных квантовых стандартов частоты // Труды института прикладной астрономии РАН. 2007. № 17. С. 312-316.
- 3 Audoin C., Hamouda F., Chassagne L. [et al.] Controlling the microwave amplitude in optically pumped cesium beam frequency standards // IEEE Transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control. 1999. Vol. 46, № 2. P. 407-413.
- 4 Gozzelino M., Micalizio S., Godone A. [et al.] Microwave field amplitude stabilization using Ramsey spectroscopy signal // 2018 European Frequency and Time Forum (EFTF). 2018. P. 80-82.
- 5 Нэш И. Улучшение возможностей беспроводных передатчиков путем калибровки мощности // Беспроводные технологии. 2010. № 4(21). С. 60-64.
- 6 Chenakin A. Frequency synthesizers: Concept to product. Norwood: Artech House, 2011. 214 p.
- 7 Xie W., Wang Q., He X. [et al.] A linewidth locking method to control the microwave power in optically pumped cesium-beam clocks // Review of Scientific Instruments. 2020. № 91. – P. 094708-1 – 094708-7.
- 8 Столяров И.И. Динамическая имитационная модель перспективного квантового стандарта частоты для исследования взаимосвязи мощности сигнала возбуждения и выходных характеристик устройства // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2023. – № 2 (558). – С. 33 – 42.
- 9 Jefferts S.R., Shirley J.H., Ashby N. [et al.] On the power dependence of extraneous microwave fields in atomic frequency standards // Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition. 2005. P. 105-110.
- 10 Vanier J., Audoin C. The quantum physics of atomic frequency standards. Philadelphia: IOP Publishing, 1989. 1351 p.

Столяров Игорь Игоревич – ведущий инженер, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: радиофизика, схемотехника.

Email: i.stolyarov@goz.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

AUTOMATIC CONTROL METHOD WITH AUTOCALIBRATION FOR MICROWAVE SIGNAL POWER CONTROL IN QUANTUM FREQUENCY STANDARD

The report is devoted to the issue of automatic power control of the microwave signal in the quantum frequency standard. A brief overview of known power control methods with an analysis of their features and disadvantages is presented. The report describes the main external and internal factors affecting the microwave signal power and its optimal value. A power control method with autocalibration is proposed, which is able to compensate for the negative impact of environmental conditions and showed positive results in the modeling process to maintain high stability of the standard output signal.

Keywords: quantum frequency standard, automatic power control; microwave signal power; environmental conditions; autocalibration.

Stolyarov Igor Igorevich - Lead Engineer, JSC “Obukhov Plant”, St. Petersburg.

Research interests: radiophysics, circuitry.

УДК 621.396.969

ОБЪЕДИНЕНИЕ РАЗНОРОДНЫХ СРЕДСТВ ОПОЗНАВАНИЯ В ЗЕНИТНОЙ РАКЕТНОЙ СИСТЕМЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЯГКИХ ЧАСТНЫХ РЕШЕНИЙ И ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Грошев Э.И., Жиронкин С.Б.

Повышение достоверности государственного опознавания воздушных объектов возможно за счет объединения и комплексной обработки информации от разнородных радиоэлектронных средств, которая в той или иной степени может содержать сведения о государственной принадлежности опознаваемого объекта. В данной статье показана возможность повышения достоверности опознавания воздушных объектов в зенитной ракетной системе за счёт объединения и комплексной обработки информации от запросчиков единой системы государственного опознавания и наземного терминала объединенной системы связи, навигации, обмена данными и опознавания с использованием искусственной нейронной сети.

Ключевые слова: комплексная обработка информации опознавания; искусственная нейронная сеть; апостериорные вероятности.

Введение

Успешное решение задач противовоздушной обороны (ПВО) зависит от согласованных действий войск (сил) и, в первую очередь, между зенитными ракетными войсками (ЗРВ) и истребительной авиацией (ИА). Обеспечение эффективной ПВО предполагает необходимость действий своих истребителей в пределах зон огня зенитных ракетных комплексов. В связи с этим одним из основных вопросов организации взаимодействия является обеспечение безопасности своей авиации и недопущение поражения своих самолетов зенитными управляемыми ракетами. С учетом проведенного анализа совместно решаемых задач, технических возможностей зенитного ракетного вооружения одним из основных направлений совершенствования взаимодействия ЗРВ и ИА в общей зоне является реализация концепции комплексного опознавания воздушных объектов [1].

В [2] сформулированы общие положения по реализации концепции комплексного опознавания, предполагающего объединение результатов радиолокационного, координатно-связного и косвенного опознавания. Для зенитной ракетной системы (ЗРС) при комплексном опознавании актуально объединение трёх средств: двух запросчиков единой системы государственного опознавания (ЕСГО) (на радиолокационном комплексе из состава командного пункта ЗРС и на многофункциональной радиолокационной станции в зенитном ракетном дивизионе) и наземного терминала объединенной системы связи, навигации, обмена данными и опознавания (ОСНОД).

1 Комплексное опознавание воздушных объектов с использованием мягких частных решений и искусственной нейронной сети

В [3] рассмотрено близкое к задаче комплексирования средств опознавания объединение обнаружителей по критерию Неймана-Пирсона с использованием искусственной нейронной сети (ИНС) и обычных вероятностей правильного обнаружения и ложной тревоги. Эти вероятности не учитывают текущее качество объединяемых обнаружителей (для текущих реализаций процессов на их входах). Показателями текущего качества являются апостериорные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги [4]. Для задачи опознавания соответствующими вероятностями являются апостериорные вероятности правильного опознавания своего объекта и неправильного опознавания чужого объекта.

Совокупность обычного решения «свой – чужой» и апостериорных вероятностей правильного опознавания своего объекта и неправильного опознавания чужого объекта можно назвать мягким решением.

Апостериорные вероятности правильного опознавания своего объекта и неправильного опознавания чужого можно определить следующим образом:

$P_{csi}(\xi_{iT}) = P(\hat{\theta} = 1 | \theta = 1, \xi_{iT})$ – вероятность вынесения i -ым средством решения «объект свой» в конце процедуры опознавания ($t = T$) при условии, что «объект свой» ($\theta = 1$), и на входе средства опознавания действует конкретная реализация наблюдения ξ_{iT} ;

$P_{chi}(\xi_{iT}) = P(\hat{\theta} = 1 | \theta = 0, \xi_{iT})$ – вероятность вынесения i -ым средством решения «объект свой» в конце процедуры опознавания при условии, что «объект чужой» ($\theta = 0$) и на входе средства опознавания действует конкретная реализация наблюдения ξ_{iT} .

Для оценки указанных апостериорных вероятностей были проанализированы разработанные в [5] для задачи обнаружения дифференциальные уравнения, описывающие изменение апостериорных вероятностей ошибок 1-го и 2-го рода при обратном течении времени t от T до 0. Решения этих уравнений в начале процесса обнаружения определяют обычные вероятности 1-го и 2-го рода. Однако, для объединения средств опознавания необходимы апостериорные вероятности правильного опознавания своего объекта и неправильного опознавания чужого объекта в конце процесса опознавания. Для получения оценок этих вероятностей, необходимо рассматривать прямое течение времени $\tau = T - t$ (от 0 до T).

Непосредственной проверкой можно убедиться, что для гауссово-марковской решающей статистики, формируемой на выходе средства опознавания, при $\tau = T$ справедливо:

$$P_{csi}(\xi_{iT}) = 1 - \Phi\left(\frac{h_i - q_i(T) - M_1 T}{\sqrt{K_1 T}}\right), P_{chi}(\xi_{iT}) = 1 - \Phi\left(\frac{h_i - q_i(T) - M_0 T}{\sqrt{K_0 T}}\right) \quad (1)$$

где $\Phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^y e^{-x^2/2} dx$ – интеграл вероятности;

h_i – порог, выставяемый на выходе i -ого средства опознавания;

$q_i(T)$ – решающая статистика, формируемая на выходе i -ого средства;

M_0, M_1 – коэффициенты сноса при $(\theta = 0)$, $(\theta = 1)$ случайного процесса $q_i(\tau)$, который предполагается гауссово-марковским;

K_0, K_1 – коэффициенты диффузии.

В ходе исследования обоснована структура ИНС. Для ее обучения были сформированы выборки (входные векторы) в виде двух матриц, элементами которых являлись мягкие решения $\{\hat{P}_{cci}(\xi_{iT}), \hat{P}_{csi}(\xi_{iT}), \hat{\theta}_i\}$, сгенерированные эквивалентным когерентным обнаружителем – таким оптимальным обнаружителем детерминированного сигнала, отношение сигнал/помеха Q_i , на выходе которого соответствует вероятностям правильного опознавания своего объекта P_{cci} и неправильного опознавания чужого P_{csi} заданного средства.

Выражения (1) позволили определить последовательность действий процедуры объединения мягких частных решений разнородных средств опознавания с использованием ИНС:

- получить с выходов объединяемых средств значения решающих статистик и частные решения ($\hat{\theta}_i = 1$ – объект «свой» или ($\hat{\theta}_i = 0$ – объект «чужой»);

- с использованием решающих статистик на основе (1) рассчитать апостериорные вероятности правильного опознавания своего объекта $\hat{P}_{cci}(\xi_{iT})$ и неправильного опознавания чужого объекта $\hat{P}_{csi}(\xi_{iT})$ для каждого средства;

- сформировать входные векторы ИНС, представляющие совокупность частных решений и соответствующих апостериорных вероятностей $\{\hat{P}_{cci}(\xi_{iT}), \hat{P}_{csi}(\xi_{iT}), \hat{\theta}_i = 1\}$ (для случая, когда объект свой) и $\{\hat{P}_{cci}(\xi_{iT}), \hat{P}_{csi}(\xi_{iT}), \hat{\theta}_i = 0\}$ (для случая, когда объект чужой);

- подать сформированные векторы на вход обученной ИНС;

- получить формируемую ИНС взвешенную оценку $\hat{Z}$ объединяемых частных решений и их апостериорных вероятностей;

- сравнить взвешенную оценку $\hat{Z}$ объединяемых частных решений и их апостериорных вероятностей с порогом H , определяемым при обучении ИНС по заданной вероятности неправильного опознавания чужого объекта

$$\begin{cases} \hat{Z} \geq H \rightarrow \theta^* = 1 \text{ (объект свой)} \\ \hat{Z} < H \rightarrow \theta^* = 0 \text{ (объект чужой)} \end{cases};$$

- в результате сравнения получить общее решение о государственной принадлежности воздушного объекта θ^* .

Оценка эффективности разработанной процедуры выполнена путем имитаци-

онного статистического компьютерного моделирования.

Моделировалось объединение трёх средств, предварительные решения которых характеризуются следующими вероятностями $P_{\text{чс1}} = 10^{-2}$, $P_{\text{сс1}} = 0,9$; $P_{\text{чс2}} = 5 \cdot 10^{-3}$, $P_{\text{сс2}} = 0,85$; $P_{\text{чс3}} = 3 \cdot 10^{-3}$, $P_{\text{сс3}} = 0,95$.

В качестве математических моделей средств были приняты энергетически эквивалентные им корреляционные обнаружители детерминированного сигнала, формирующие корреляционные интегралы, являющиеся независимыми гауссовскими случайными величинами q_i с математическим ожиданием $M\{q_i | \theta\} = \theta \cdot Q_i$ и дисперсией $D\{q_i\} = Q_i$, где Q_i – максимально возможное отношение сигнал/шум на выходе коррелятора по мощности, равное отношению удвоенной энергии сигнала к спектральной плотности мощности шума на входе [6].

Значения Q_i определялись по методу эквивалентного когерентного обнаружителя

$$Q_i = [\Phi^{-1}(1 - P_{\text{чсi}}) - \Phi^{-1}(1 - P_{\text{ссi}})]^2, \quad (2)$$

где $\Phi^{-1}(y)$ – функция, обратная интегралу вероятности $\Phi(x)$.

Для объединяемых средств Q_i имеют следующие значения: $Q_1 = 13,02$; $Q_2 = 13,05$; $Q_3 = 19,3$. Видно, что наиболее энергетически эффективным (лучшим) является третье средство.

При моделировании средств было реализовано оптимальное, по критерию Неймана – Пирсона, правило принятия частных решений

$$\begin{aligned} \hat{\theta}_i &= 1 \\ q_i &\leq h_i, \\ \hat{\theta}_i &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

где h_i – порог на выходе i -ого средства, величина которого определяется по заданной вероятности неправильного опознавания чужого объекта по формуле

$$h_i = \sqrt{Q_i} \cdot \Phi^{-1}(1 - P_{\text{чсi}}). \quad (4)$$

2 Результаты имитационного моделирования

В результате моделирования построены характеристики опознавания, представленные на рисунке 1.

Кривые на рисунке 1 построены на основе использования эквивалентного когерентного обнаружителя по формуле

$$\hat{P}_{\text{сс}} = 1 - \Phi(h' - \sqrt{\gamma Q}), \quad (5)$$

где γ – энергетический выигрыш относительно лучшего средства, определяемый по результатам моделирования на основе (2),

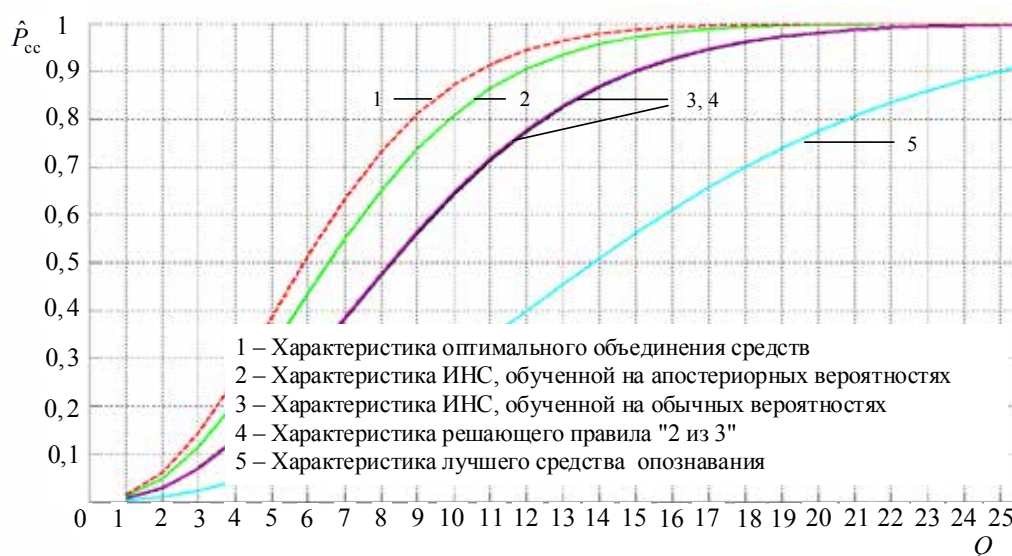


Рисунок 1 – Характеристики опознавания при объединении частных решений средств с использованием различных процедур

так, например, для характеристики оптимального объединения на уровне первичной обработки (кривая 1)

$$\gamma = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{Q_3}.$$

Из рисунка 1 следует, что объединение частных решений средств с использованием апостериорных вероятностей и ИНС обеспечивает близкую к потенциальной характеристику опознавания. Это свидетельствует об эффективности объединения трех разнородных (с различными ТТХ) средств опознавания в зенитной ракетной системе с использованием мягких частных решений и искусственной нейронной сети.

Выводы

Таким образом, в статье показана возможность повышения достоверности опознавания воздушных объектов в зенитной ракетной системе за счёт объединения и комплексной обработки информации от запросчиков единой системы государственного опознавания и наземного терминала объединенной системы связи, навигации, обмена данными и опознавания с использованием искусственной нейронной сети.

Литература

1 Грошев Э.И., Мацюк В.В. Основные направления совершенствования взаимодействия истребительной авиации и зенитных ракетных войск в общей зоне // Военная мысль. 2024. №4. С. 46-52.

2 Реализация комплексного опознавания летательных аппаратов Вооруженных Сил Российской Федерации в наземных системах противовоздушной обороны / С.Б.Жиронкин, А.А. Пшеницын, А.А. Близнюк, А.В. Петухов // Военная мысль. 2023. № 2. С. 65-71.

3 Татузов А.Л. Нейронные сети в задачах радиолокации. М.: Радиотехника,

2009. 432 с.

4 Жиронкин С.Б., Черваков В.О., Зубарев А.С. Показатели текущего качества статистических решений при их объединении в комплексных системах обнаружения и распознавания // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 11. С. 93-97.

5 Сосулин Ю.Г. Теория обнаружения и оценивания стохастических сигналов. М.: Советское радио, 1978. 320 с.

6 Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь, 1966. 680 с.

Жиронкин Сергей Борисович – доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник, Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, г. Тверь.

Область научных интересов: помехоустойчивость передачи данных.

E-mail: iadrin@mail.ru.

Грошев Эдуард Иванович – адъюнкт, Военная академия воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г.К. Жукова, г. Тверь.

Область научных интересов: помехоустойчивость передачи данных.

E-mail: ediktver@mail.ru.

Почтовый адрес: 170100, г. Тверь, улица Жигарева, дом 50.

COMBINING HETEROGENEOUS IDENTIFICATION TOOLS IN AN ANTI-AIRCRAFT MISSILE SYSTEM USING SOFT PRIVATE SOLUTIONS AND AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

Increasing the reliability of state identification of air objects is possible by combining and comprehensively processing information from heterogeneous electronic means, which to one degree or another may contain information about the nationality of the identified object. This article shows the possibility of increasing the reliability of identification of air objects in an anti-aircraft missile system by combining and comprehensively processing information from requesters of the unified state identification system and the ground terminal of the integrated communication, navigation, data exchange and identification system using an artificial neural network.

Keywords: complex identification information processing; artificial neural network; a posteriori probabilities.

Sergey Borisovich Zhironkin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher, Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov, Tver.

Research interests: noise immunity of data transmission.

Eduard Ivanovich Groshev – Adjunct, Military Academy of Aerospace Defense named after Marshal of the Soviet Union G.K. Zhukov, Tver.

Research interests: noise immunity of data transmission.

УДК 621.396.962

АЛГОРИТМ МНОГОПРИЗНАКОВОГО РАСПОЗНАВАНИЯ НА ОСНОВЕ КАЛМАНОВСКОЙ ФИЛЬТРАЦИИ И НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Максимович С.В.

В данной статье на основе метода многопризнакового распознавания разработан алгоритм распознавания классов летательного аппарата по принципу: «самолет с турбореактивным двигателем – самолет с турбовинтовым двигателем – вертолет – ракета – беспилотный летательный аппарат» на основе совместного применения калмановской фильтрации и нейронной сети. Данный алгоритм может быть реализован в радиолокационных станциях воздушного и наземного базирования.

Ключевые слова: алгоритм; калмановская фильтрация; класс летательного аппарата; нейронная сеть; распознавание; радиолокационный сигнал.

Введение

В [1] обоснован метод многопризнакового распознавания классов летательных аппаратов (ЛА) из состава их группы на основе калмановской фильтрации и нейронной сети (НС).

Цель статьи – разработать алгоритм, реализующий метод многопризнакового распознавания классов ЛА на основе калмановской фильтрации и нейронной сети, применительно к алфавиту классов: самолет с турбовинтовым двигателем (ТРД), самолет с турбовинтовым двигателем (ТВД), вертолет, ракета, беспилотный летательный аппарат (БпЛА).

На рисунке 1 (а, б, в) приведена схема предлагаемого алгоритма многопризнакового распознавания классов ЛА на основе калмановской фильтрации и НС, где введены следующие обозначения:

$H_{\text{ЛА}}$ – значение высоты полета ЛА;

$V_{\text{ЛА}}$ – значение скорости полета ЛА;

$D_{\text{ЛА}}$ – значение дальности до ЛА;

$\varphi_{\text{в}}$ – значение угла места на ЛА;

$S(t)$ – отраженный от ЛА радиолокационный (РЛ) сигнал;

$D_{\text{дм}}(t)$ – значение дальности до ЛА, полученные при моделировании, когда алгоритм функционирует в режиме «обучение» НС;

$V_{\text{дм}}(t)$ – значение скорости ЛА, полученные при моделировании, когда алгоритм функционирует в режиме «обучение» НС;

$\hat{V}_{\text{дм}}(t)$ – значение оценки флуктуации скорости ЛА, полученное на основе калмановской фильтрации, когда алгоритм функционирует в режиме «обучение» НС;

$\hat{V}(t)$ – значение оценки флуктуации скорости ЛА, полученное на основе калмановской фильтрации, когда алгоритм функционирует в режиме «принятие реше-

ния» НС;

F_{Π} – значения доплеровской частоты, обусловленные отражением РЛ сигнала от планера (корпуса) ЛА;

F_K – значения доплеровской частоты, обусловленные отражением РЛ сигнала от вращающихся лопаток рабочего колеса компрессора низкого давления (КНД) для ЛА из класса «самолет с ТРД» и «самолет с ТВД»;

ΔF_D – диапазон доплеровских частот, обусловленный отражениями РЛ сигнала от двигателя (силовой установки) ЛА класса «вертолет»;

ΔF_L – диапазон доплеровских частот, обусловленный отражениями РЛ сигнала от лопастей ЛА класса «вертолет»;

ΔF_B – диапазон доплеровских частот, обусловленный отражениями РЛ сигнала от винтов ЛА класса «самолет с ТВД»;

$\hat{K}_m, \hat{K}$ – оценка обобщенной траекторной статистической характеристики (ТСХ) [2], полученная на основе моделирования и при работе алгоритма, соответственно.

$P_{\text{ЛА}}$ – вероятность правильного распознавания ЛА;

$P_{\text{зад}}$ – заданная вероятность правильного распознавания ЛА;

q – класс ЛА из алфавита классов (самолет с ТРД, самолет с ТВД, вертолет, ракета, БпЛА).

Алгоритм функционирует в двух режимах: работа НС в режиме «обучение»; работа НС в режиме «принятие решения». Выбор режима работы НС производится в блоке 1 условного ветвления. Далее рассмотрим каждый режим работы НС по отдельности.

1 Работа алгоритма при функционировании нейронной сети в режиме «обучение»

С выхода блока 3 формирования траекторного доплеровского портрета (ТДП) летательного аппарата на вход блока 4 формирования оценок скоростей на основе калмановской фильтрации, поступают значения функционально связанных координат: дальности $D_{\text{дм}}(t)$ и скорости $V_{\text{дм}}(t)$, полученные на основе моделирования.

С выхода блока 4, значения оценки флюктуации скорости ЛА $\hat{V}(t)$ поступают на блок 5 вычисления автокорреляционной функции (АКФ) и ТСХ, по итогам работы которого, значения оценки обобщенной ТСХ (коэффициент $\hat{K}_m$), вместе с шестью значениями признаков распознавания в виде высоты полета ЛА $H_{\text{ЛА}}$, его скорости $V_{\text{ЛА}}$, а также значений доплеровских частот, обусловленных отражением РЛ сигнала от вращающихся элементов конструкции ЛА F_K , ΔF_B , ΔF_D , ΔF_L , сформированные в блоке 2, поступают на блок 6 нормирования значений.

Далее нормированные значения признаков распознавания $H_{\text{ЛА}}^{\text{норм.}}$, $V_{\text{ЛА}}^{\text{норм.}}$, $F_K^{\text{норм.}}$, $\Delta F_B^{\text{норм.}}$, $\Delta F_D^{\text{норм.}}$, $\Delta F_L^{\text{норм.}}$, $\hat{K}_m^{\text{норм.}}$ подаются на вход НС для ее обучения (такой словарь признаков обоснован в [3]). При успешном тестировании обученной НС, производится сохранение ее весовых коэффициентов и выход из алгоритма.

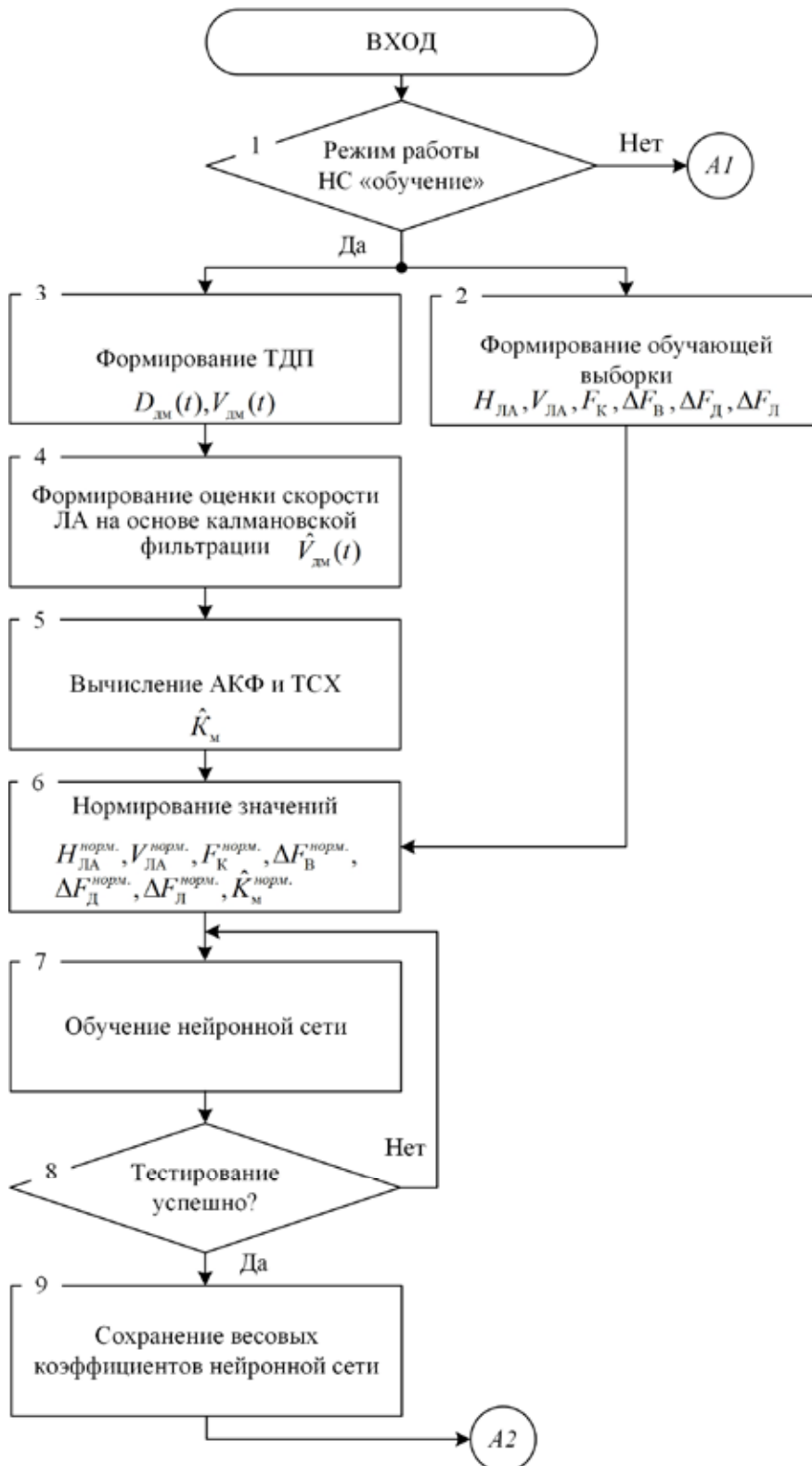


Рисунок 1, а – Схема алгоритма многопризнакового распознавания классов ЛА на основе калмановской фильтрации и нейронной сети

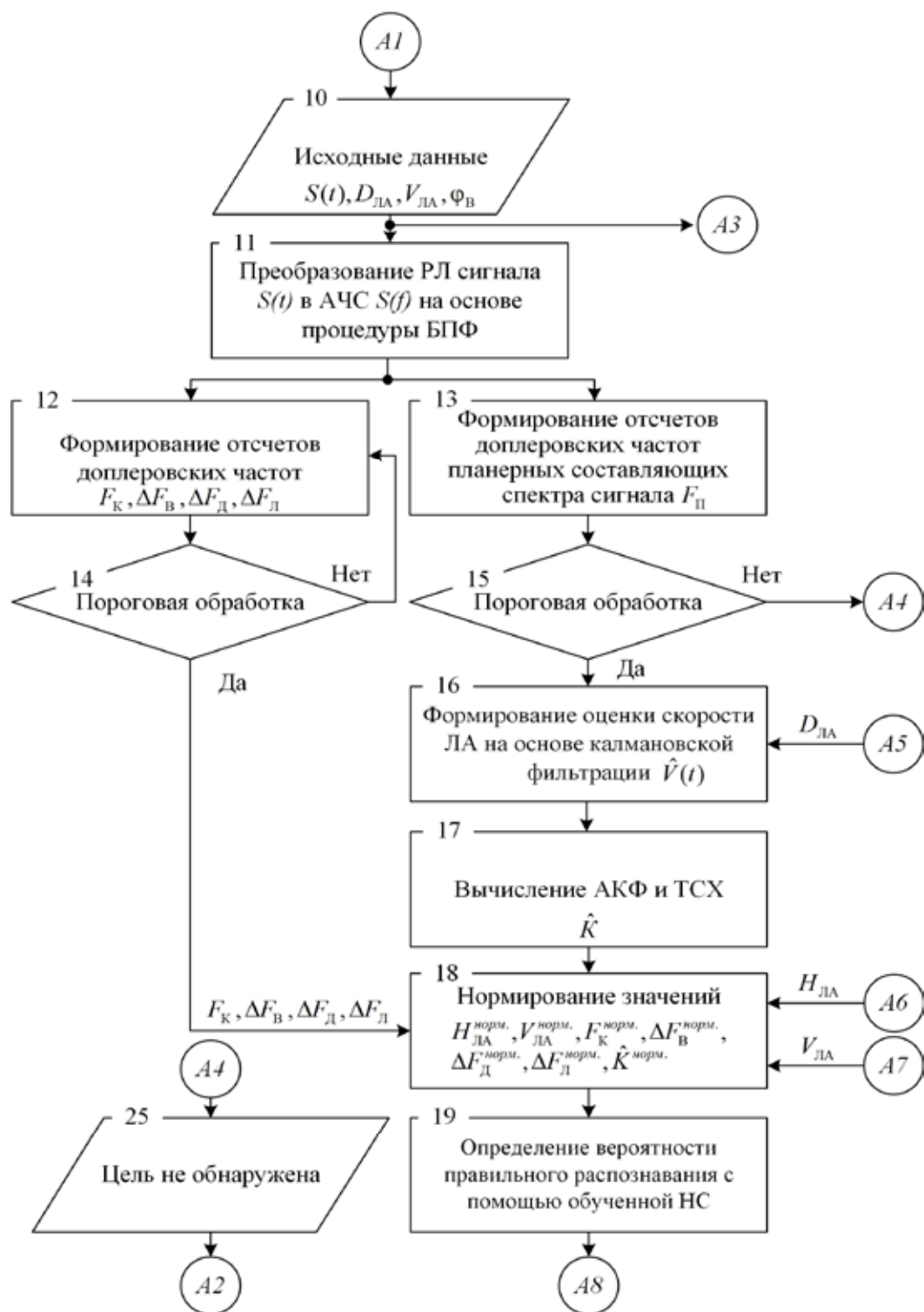


Рисунок 1, б – Схема алгоритма многопризнакового распознавания классов ЛА на основе калмановской фильтрации и нейронной сети

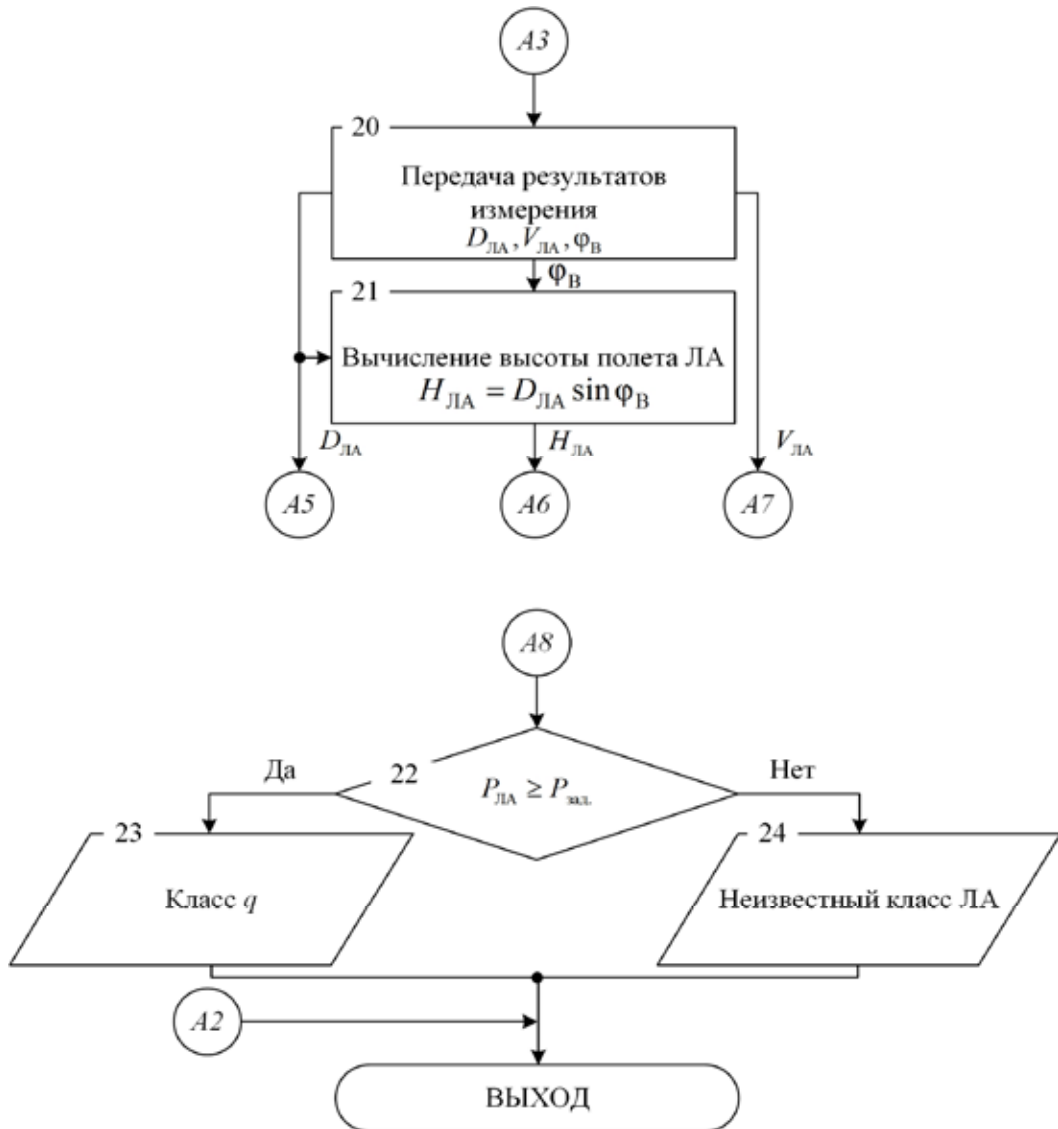


Рисунок 1, в – Схема алгоритма многопризнакового распознавания классов ЛА на основе калмановской фильтрации и нейронной сети

2 Работа алгоритма при функционировании нейронной сети в режиме «принятие решения»

Входами алгоритма при функционировании НС в режиме «принятие решения» являются: отражённый от летательного аппарата РЛ сигнал на промежуточной частоте во временной области $S(t)$; измеренное значение дальности $D_{\text{ЛА}}$, скорости $V_{\text{ЛА}}$ и угла места $\varphi_{\text{в}}$ на ЛА.

С выхода блока 10 ввода данных, РЛ сигнал $S(t)$ поступает на вход блока 11, а значения дальности $D_{\text{ЛА}}$, скорости $V_{\text{ЛА}}$ и угла места на ЛА $\varphi_{\text{в}}$ поступают на блок 20 передачи результатов измерения.

В блоке 11 РЛ сигнал $S(t)$ преобразуется в амплитудно-частотный спектр (АЧС) $S(f)$ на основе процедуры быстрого преобразования Фурье (БПФ), составляющие ко-

того поступают на вход блока 12, где формируются отсчеты доплеровских частот, обусловленные отражением РЛ сигнала от КНД для самолета с ТРД и ТВД F_K , винтов для самолета с ТВД ΔF_B , лопастей ΔF_L и силовой установки (двигателя) вертолета ΔF_D .

Далее значения F_K , ΔF_B , ΔF_D , ΔF_L подаются на вход блока 14 условного ветвления, для сравнения с порогами, при превышении которых сформированные значения подаются на вход блока 18 нормирования значений.

Параллельно с этим в блоке 13 формируются отсчеты доплеровской частоты, обусловленные отражением РЛ сигнала от планера ЛА F_P , которые поступают на блок 15 условного ветвления, где производится пороговая обработка. Отсчеты планерных составляющих спектра сигнала превысившие порог поступают на вход блока 16, в противном случае принимается решение, что цель не обнаружена и производится выход из алгоритма.

На вход блока 16 помимо значений доплеровской частоты планерных составляющих (с блока 15), поступают значения дальности до ЛА $D_{ЛА}$ с блока 20 результатов измерения. В блоке 16 формируются оценки флуктуации скорости ЛА $\hat{V}(t)$, на основе калмановской фильтрации. Значения $\hat{V}(t)$ поступают на вход блока 17, для вычисления АКФ и оценки обобщенной ТСХ $\hat{K}$. Далее значения оценки обобщенной ТСХ $\hat{K}$ поступают на блок 18 нормирования значений.

Вычисление высоты полета ЛА, осуществляется в блоке 21 по входным значениям угла места φ_B и измеренным значениям дальности $D_{ЛА}$, поступающие с блока 20 передачи измерений. После чего вычисленные значения $H_{ЛА}$ поступают на вход блока 18 нормирования значений. Так же с блока 20 на вход блока 18, подается скорость полета ЛА $V_{ЛА}$.

В блоке 18, производится нормирование всех признаков распознавания $H_{ЛА}^{норм.}$, $V_{ЛА}^{норм.}$, $F_K^{норм.}$, $\Delta F_B^{норм.}$, $\Delta F_D^{норм.}$, $\Delta F_L^{норм.}$, $\hat{K}^{норм.}$, которые поступают на блок определения вероятности правильного распознавания с помощью, обученной НС (блок 19).

С выхода блока 19, значения вероятности правильного распознавания поступают на вход блока 22 условного ветвления, где проверяется выполнения условия того, что вероятность распознавания ЛА $P_{ЛА}$ выше или равна заданной вероятности распознавания $P_{зад}$. При выполнении условия принимается решение, что ЛА принадлежит q -му классу, в противном случае принимается решение о том, что ЛА не относится к алфавиту распознаваемых классов.

1Выходом алгоритма является информация с выходов блока 23 (класс q) и блока 24 (неизвестный класс ЛА).

Области доплеровских частот (F_P , F_K , ΔF_B , ΔF_D , ΔF_L) и пороговые значения для них выбирались на основе анализа спектральных доплеровских портретов РЛ сигналов, отраженных от реальных ЛА (полученные в ходе эксперимента) в соответствие с алфавитом классов.

Области доплеровских частот определены следующие:

- частотная область отражения РЛ сигнала от планера ЛА с ТВД или ТРД находится в диапазоне доплеровских частот от 10 до 15 кГц;

- частотная область отражения РЛ сигнала от КНД турбореактивного двигателя ЛА находится в диапазоне доплеровских частот от 3 до 5 кГц;
- частотная область отражения РЛ сигнала от винтов ЛА с ТВД находится в диапазоне доплеровских частот от 0,3 до 0,5 кГц;
- частотная область отражения РЛ сигнала от планера (фюзеляжа) вертолета находится в диапазоне доплеровских частот от 0 Гц (в режиме «висение») до 4 кГц;
- частотная область отражения РЛ сигнала от вращающихся частей силовой установки (двигателя) вертолета находится в диапазоне доплеровских частот от 7 до 8 кГц;
- частотная область отражения РЛ сигнала от лопастей вертолета находится в диапазоне от 6 до 11 кГц;
- частотная область отражения РЛ сигнала от планера (корпуса) БпЛА находится в диапазоне доплеровских частот от 700 до 7 кГц;
- частотная область отражения РЛ сигнала от корпуса ракеты находится в диапазоне доплеровских частот от 30 до 50 кГц.

Результаты моделирования показали, что вероятности правильного распознавания класса ЛА (предлагаемого алфавита классов ЛА), при отношении сигнал/шум от 14 до 24 дБ, составляет 0,961 – 0,982, при этом средняя вероятность ложного распознавания составила 0,004 – 0,0081.

Заключение

Таким образом, разработан алгоритм распознавания, который позволяет реализовать метод многопризнакового распознавания классов ЛА на основе калмановской фильтрации и нейронной сети. Данный алгоритм может быть реализован в радиолокационных станциях воздушного (наземного) базирования, имеющие импульсно-доплеровский режим работы (предусматривающий применение квазинепрерывного сигнала с высокой частотой повторения импульсов в пачке) и позволит распознавать класс ЛА из состава их группы с вероятностью правильного распознавания не ниже 0,95, при отношениях сигнал/шум от 14 до 24 дБ.

Литература

- 1 Максимович С.В. Метод многопризнакового распознавания класса летательного аппарата на основе совместного применения калмановской фильтрации и нейронной сети // Научно-технический сборник ФГБУ «27 ЦНИИ» МО РФ. 2024. №5. С.349-355.
- 2 Максимович С.В. Признак распознавания класса воздушной цели на основе траекторных статистических характеристик реальных траекторных доплеровских портретов летательных аппаратов различного класса // V Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные вопросы состояния и перспектив развития вооружения, военной и специальной техники ВКС». МГТУ имени Н.Э. Баумана, г.Москва. 2023. С.237-240.
- 3 Максимович С.В. Обоснование словаря признаков распознавания для функционирования алгоритма распознавания класса летательного аппарата на основе совместного применения калмановской фильтрации и нейронной сети // Вестник ЯВВУ ПВО. 2024. №1. С.132-139.

Максимович Сергей Викторович – адъютант, Военная академия воздушно-космической обороны имени маршала Советского Союза Г.К.Жукова, г.Тверь.

Область научных интересов: радиолокация, радиолокационное распознавание воздушных объектов.

E-mail: Serega-max@yandex.ru

Почтовый адрес: 170000, Тверь, улица Жигарева, дом 50.

MULTI-SIGN RECOGNITION ALGORITHM BASED ON KALMAN FILTERING AND NAURAL NETWORK

In this article, based on the multisigned recognition method, an aircraft class recognition algorithm has been developed based on the principle: «turbojet-powered aircraft – turbo-prop-powered aircraft – helicopter – rocket – unmanned aerial vehicle» based on the combined use of Kalman filtering and naural network. This algorithm can be implemented in air- and ground-based radar stations.

Keywords: algorithm; Kalman filtering; aircraft class; naural network; recognition; radar signal.

Maksimovich Sergey Viktorovich – Adjunct, Military Academy of Aerospace Defense Marshala of the Soviet Union G.K. Zhukova, Tver.

Research interests: radar, radar recognition of aerial objects.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА РАЗНОСЛЫШИМОСТИ ПОСАДОЧНОЙ РАДИОМАЯЧНОЙ ГРУППЫ НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

Нестерович А.В., Мурсалов Д.Л.

Представлено решение задачи определения коэффициента разнотональности посадочной радиомаячной группы с использованием беспилотного летательного аппарата на основе анализа ряда Фурье огибающей сигналов. Приведены результаты математического моделирования радиосигнала посадочной радиомаячной группы и расчета коэффициента разнотональности. Предложена конфигурация оборудования для беспилотного летательного аппарата. Приводятся результаты верифицирования реализованного алгоритма определения коэффициента разнотональности с помощью контрольно-проверочной аппаратуры.

Ключевые слова: коэффициент разнотональности; посадочная радиомаячная группа; беспилотный летательный аппарат; летательный аппарат.

Введение

Системы посадки летательных аппаратов (ЛА) используются для привода ЛА в зону посадки, организации воздушного движения в районе аэродрома посадки и обеспечения посадки ЛА на взлетно-посадочную полосу (ВПП).

В Российской Федерации одной из систем посадки является посадочная радиомаячная группа (ПРМГ), которая состоит из курсового радиомаяка (КРМ), глиссадного радиомаяка (ГРМ) и ретранслятора дальномера (РД).

При разработке и отладке ПРМГ, а также при первичном вводе в эксплуатацию и в течение эксплуатации необходимо проводить облеты с помощью воздушной лаборатории с автоматической системой летного контроля (АСЛК). При первичном вводе в эксплуатацию и в текущей эксплуатации на облет уходит соответственно 12 и 8 часов летного времени. При разработке и отладке ПРМГ на облеты может уходить достаточно много времени. Использование АСЛК в этих целях является достаточно дорогостоящим мероприятием из-за стоимости летного часа, к тому же очень затруднительно в организационном плане по причине ограниченного количества и загруженности воздушных лабораторий. По этой причине целесообразно использовать модуль комплексного стенда испытаний (модуль КСИ) на базе КАМАЗ-43501 с мачтовым устройством с высотой до 15 м. Однако, использование модуля КСИ имеет ряд ограничений, в числе которых – высота измерения не более 15 м, ограничения, связанные с местными предметами (строения, лес, ограждения и т.п.) и рельефом местности (холмы, овраги и т.п.).

Выходом из этой ситуации может послужить использование беспилотного летательного аппарата (БПЛА) с оборудованием, имеющим небольшие массогабаритные характеристики.

1 Постановка задачи

Одним из основных параметров курсового и глиссадного радиомаяков ПРМГ является коэффициент разнотональности (КРС), равный модулю отношения разности амплитуд меандров частот 1300 и 2100 Гц закона модуляции к их сумме [1]. КРС является функцией амплитуд меандров и вычисляется по формуле

$$\text{КРС} = \frac{U_1 - U_2}{U_1 + U_2}, \quad (1)$$

при этом превышению амплитуды меандров 2100 Гц амплитудой меандра 1300 Гц ($U_1 > U_2$) соответствуют положительные значения КРС, а обратному соотношению амплитуд – отрицательные.

В связи с тем, что на данный момент отсутствует оборудование для БПЛА, предназначенное для определения КРС при выполнении облетов при разработке и отладке ПРМГ, необходимо:

- в интегрированной системе разработки *MatLab* разработать математическую модель радиосигнала ПРМГ и алгоритм расчета КРС;
- разработать оборудование для БПЛА с реализацией алгоритма определения КРС;
- верифицировать реализованный в оборудовании для БПЛА предлагаемый алгоритм расчета КРС с помощью контрольно-проверочной аппаратуры для имитации радиосигналов ближней навигации и посадки КПА-РСБН [2].

2 Математическая модель радиосигнала ПРМГ и алгоритм определения КРС

Каждый из радиомаяков системы ПРМГ формирует в пространстве попеременно две диаграммы излучения. Одна диаграмма создается несущей частотой, промодулированной по амплитуде сигналом меандр с частотой 2100 Гц, другая создается той же несущей частотой, промодулированной по амплитуде сигналом меандр с частотой 1300 Гц. Перекрывание диаграмм обеспечивает получение линии курса или глиссады, при этом по одну сторону от линии преобладает напряженность поля одной диаграммы, а по другую сторону – другой диаграммы. Сравнение амплитуд полей обеспечивает указание на борту самолета линии курса или глиссады, стороны и величины отклонения от нее в зоне действия радиомаяков [3].

С учетом вышесказанного для математического моделирования радиосигнала ПРМГ принимаются следующие исходные данные:

- частота первого сигнала (меандр), $f_1 = 1300$ Гц;
- частота второго сигнала (меандр), $f_2 = 2100$ Гц;
- амплитуда первого сигнала, $U_1 = 1$ В;
- амплитуда второго сигнала, $U_2 = 0,5$ В;
- длительность первого и второго сигнала, $T_n = 35 \cdot 10^{-3}$ с;
- длительность промежутка между первым и вторым сигналом, $T_{space} = 5 \cdot 10^{-3}$ с;
- общее количество выборок, $N_{all} = 27300$;
- частота дискретизации, кратная заданным частотам f_1 и f_2 , чтобы составляющие спектра точно попадали на выбранные частоты, $f_s = 273000$ Гц;
- период наблюдения, $T = 0,1$ с;
- среднее квадратическое отклонение для генерации шума, $\sigma = 0,1$;

- уход частоты гетеродина, $F_g = 100$ Гц;
- начальная фаза первого сигнала $\varphi_1 = \frac{\pi}{3}$;
- начальная фаза первого сигнала $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$.

На основе анализа ряда Фурье [4] огибающей системы посадки ПРМГ предложен следующий алгоритм определения КРС:

- преобразование радиосигнала ПРМГ в цифровой вид с помощью *SDR* приемника;

- получение спектра сигнала;
- выборка из спектра составляющих с частотами f_1 и f_2 ;
- вычисление КРС из составляющих спектра;
- вычисление ошибки между заданным и расчетным.

Результаты моделирования и определения КРС представлены на рисунках 1-3.

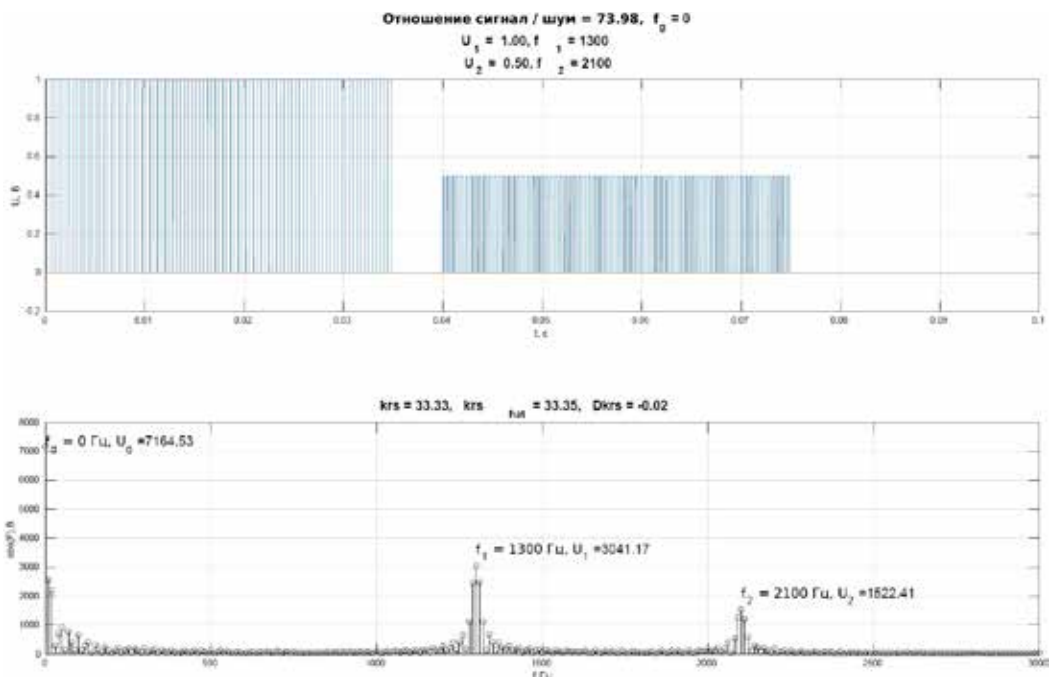


Рисунок 1 – Первый и второй сигналы с частотой 1300 и 2100 Гц, амплитудой 1,0 и 0,5 В соответственно. Спектр сигналов с отсутствием шумов и нулевым смещением гетеродина

Из рисунка 1 видно, что при заданном КРС, равном 33,33%, с учетом отсутствия шумов и нулевым смещением гетеродина алгоритм определения КРС позволяет получить инструментальную точность 0,02%.

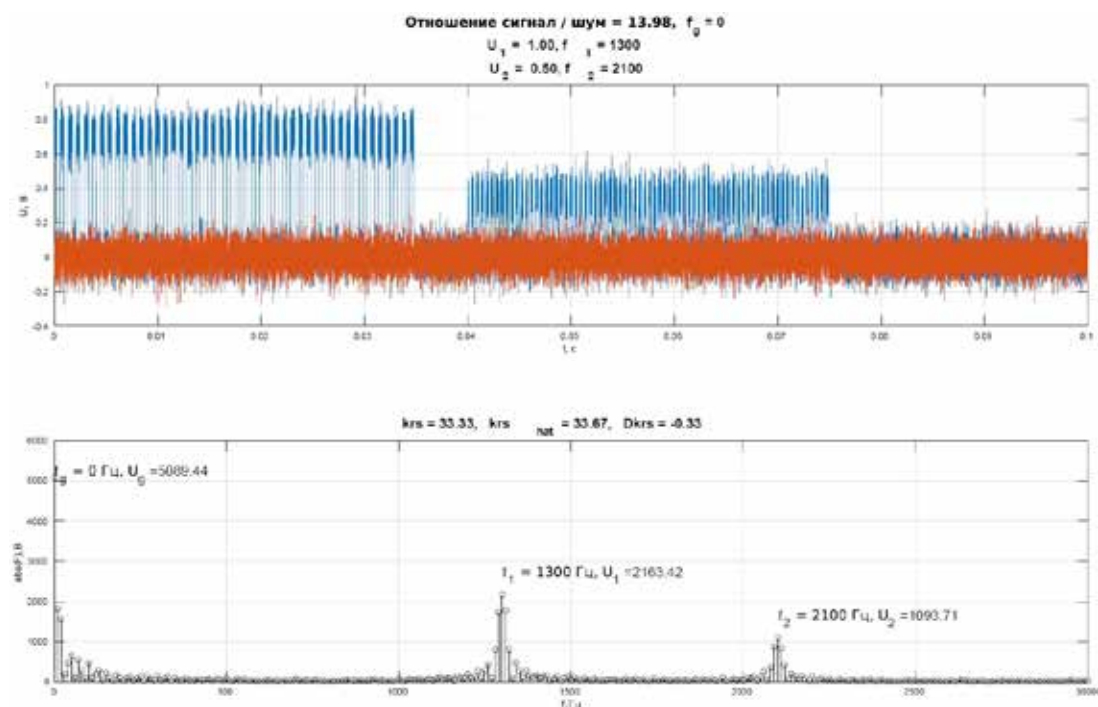


Рисунок 2 – Первый и второй сигналы с частотой 1300 и 2100 Гц, амплитудой 1,0 и 0,5 В соответственно, с шумами. Спектр сигналов с наличием шумов и нулевым смещении гетеродина

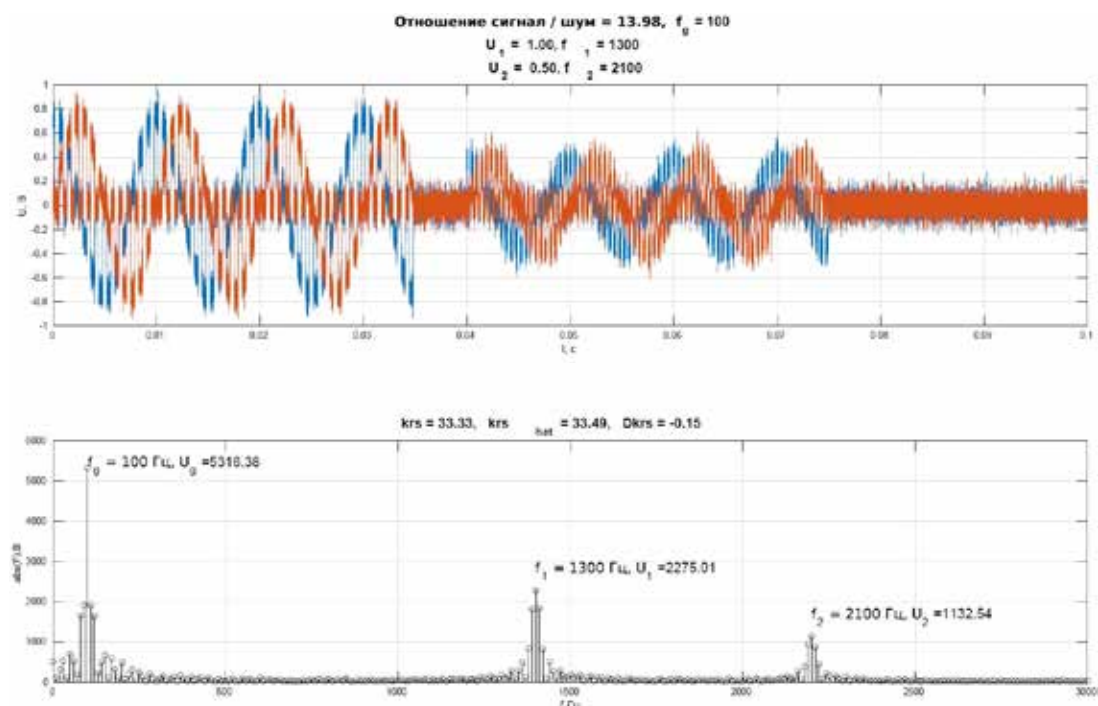


Рисунок 3 – Первый и второй сигналы с частотой 1300 и 2100 Гц, амплитудой 1,0 и 0,5 В соответственно, с шумами и смещением частоты гетеродина на 100 Гц. Спектр сигналов с наличием шумов и смещении частоты гетеродина на 100 Гц

Из рисунка 2 видно, что при заданном КРС, равном 33,33%, с учетом наличия шумов и нулевом смещении гетеродина алгоритм определения КРС позволяет получить инструментальную точность 0,33%.

Из рисунка 3 видно, что при заданном КРС, равном 33,33%, с учетом наличия шумов и нулевом смещении гетеродина на 100 Гц алгоритм определения КРС позволяет получить инструментальную точность 0,15%.

3 Оборудование для БПЛА для определения КРС

Структурная схема оборудования для БПЛА с реализованным алгоритмом определения КРС приведена на рисунке 4.

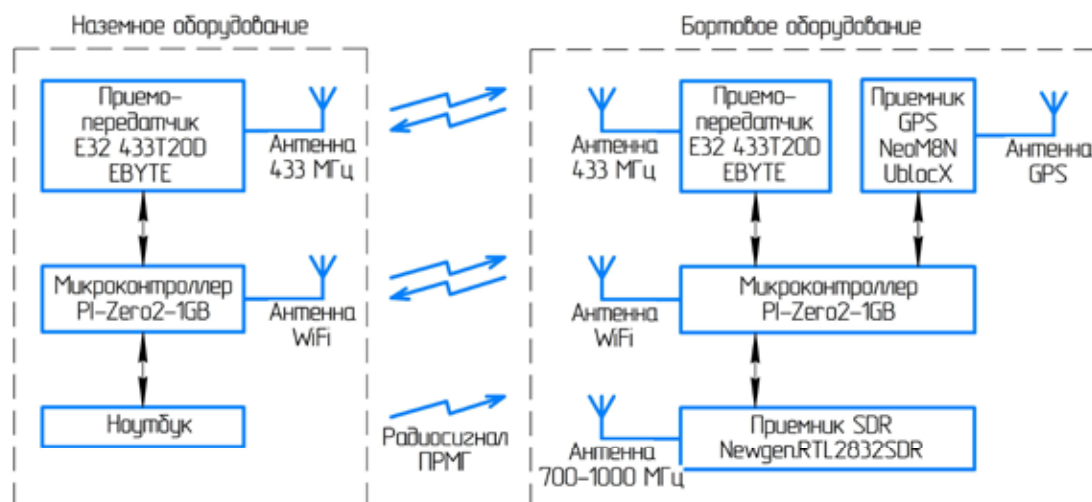


Рисунок 4 – Структурная схема оборудования для БПЛА с реализацией алгоритма определения КРС

Оборудование для определения КРС состоит из бортовой и наземной части. Бортовое оборудование устанавливается на нижнюю часть БПЛА, а наземное - непосредственно возле КРМ или ГРМ. Все составные части бортового оборудования широко распространены, находятся в открытой продаже и имеют сравнительно невысокую стоимость. Внешний вид бортового оборудования приведен на рисунке 5.

Приемник *SDR* принимает радиосигнал ПРМГ на заданной частоте и передает оцифрованные отсчеты сигнала квадратурного приемника в микроконтроллер для передачи на оконечное устройство для контроля и расчета КРС.

Предусматривается две линии связи между бортовым и наземным оборудованием, беспроводная радиосвязь на разрешенной частоте 433 МГц и *WiFi* на основе стандарта *IEEE.802.11*.

Приемник *GPS* используется для позиционирования БПЛА при проведении измерений.



Рисунок 5 – Внешний вид бортового оборудования со снятой крышкой и аккумулятором

4 Верификация алгоритм расчета КРС

Верификация алгоритма расчета КРС, реализованного в оборудовании для БПЛА, выполняется с помощью контрольно-проверочной аппаратуры для имитации радиосигналов ближней навигации и посадки КПА-РСБН [2]. Структурная схема приведена на рисунке 6.

С помощью аппаратуры КПА-РСБН генерируется сигнал ПРМГ на частотно-кодовом канале №35, задаются тестовые значения КРС. По радиоэфиру сигнал передается на приемник SDR, который затем передает оцифрованные отсчеты сигнала квадратурного приемника в ноутбук для контроля и расчета КРС.

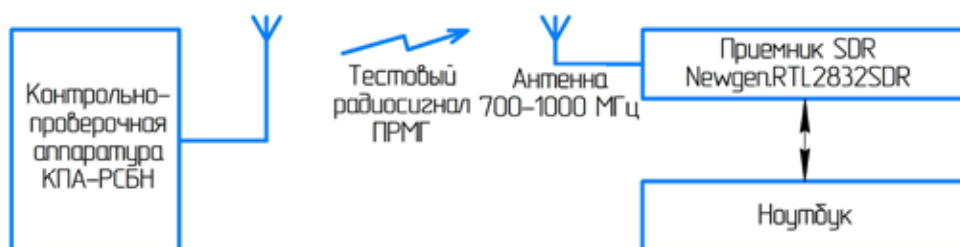


Рисунок 6 – Структурная схема верификации
Результаты обработки и расчета КРС представлены на рисунках 7-9.

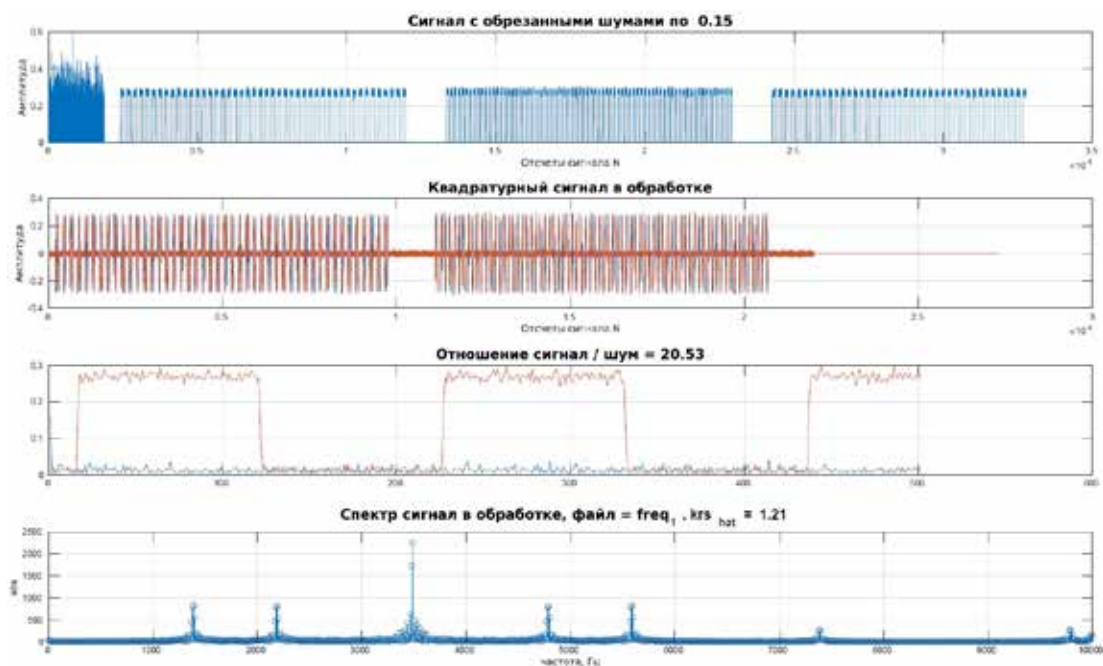


Рисунок 7 – Сигналы, спектр сигналов при тестовом значении КРС = 1%

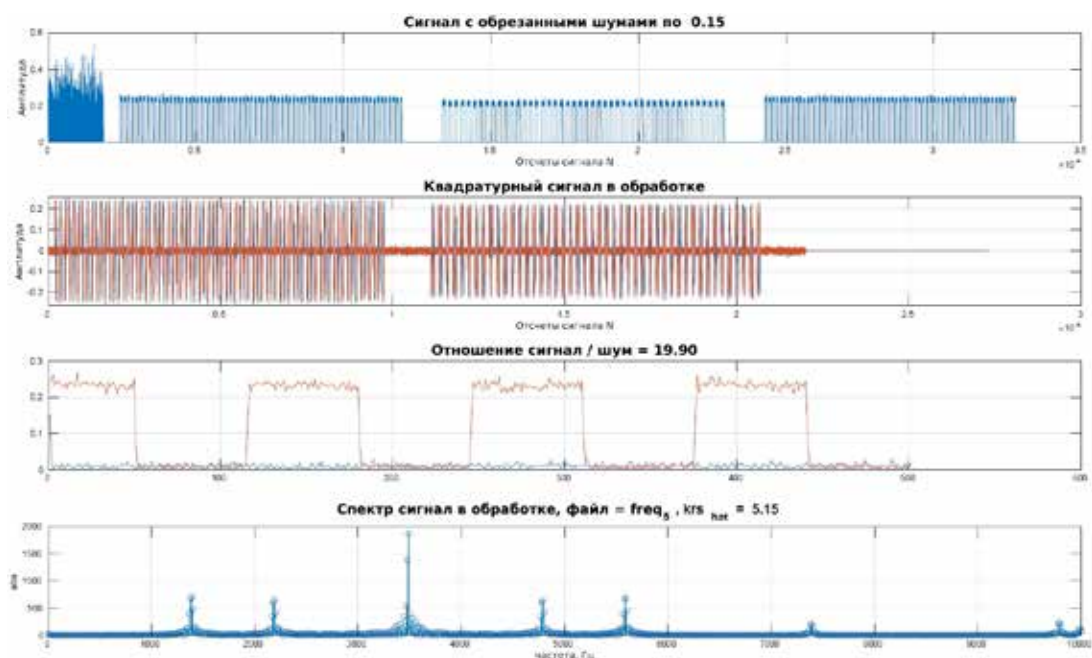


Рисунок 8 – Сигналы, спектр сигналов при тестовом значении КРС = 5%

Результаты расчета КРС при заданных тестовых значениях КРС приведены в таблице 2. Анализ результатов показывает, что при разных значениях тестового КРС предлагаемый алгоритм определения КРС имеет ошибку расчета не более 0,31%.

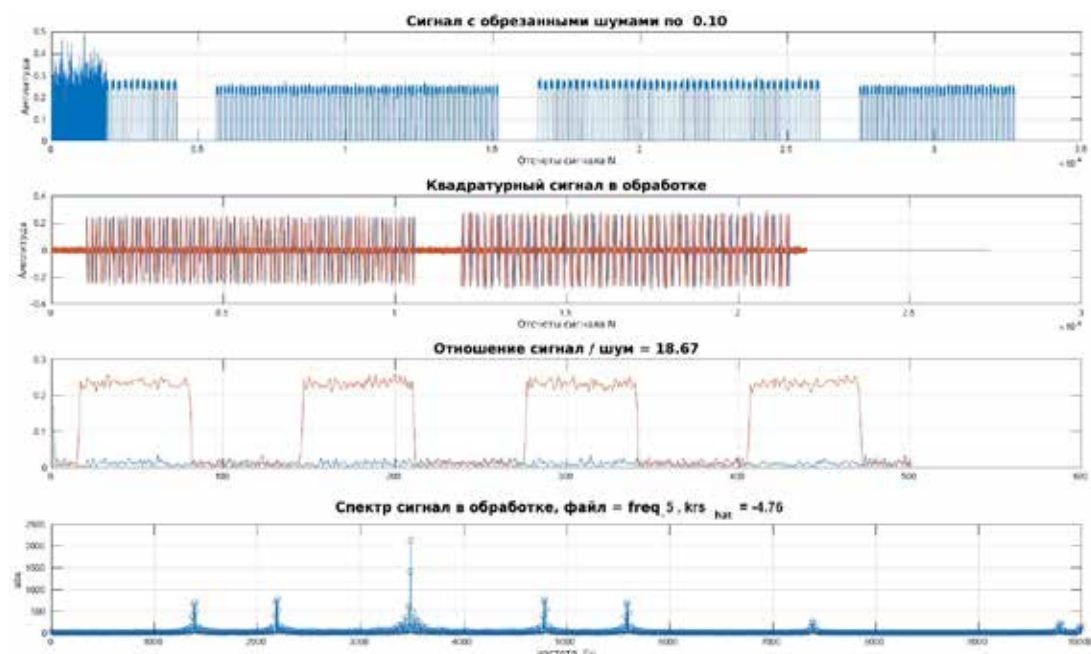


Рисунок 9 – Сигналы, спектр сигналов при тестовом значении КРС = -5%

Т а б л и ц а 2 – Результаты расчета КРС при заданных тестовых значениях КРС

№ теста	Отношение сигнал-шум, дБ	Тестовое значение КРС, %	Рассчитанное значение КРС, %	Ошибка расчета, %
1	20,53	1	1,21	0,21
2	19,9	5	5,15	0,15
3	18,67	-5	-4,76	0,24
4	18,47	15	15,11	0,11
5	21,04	-15	-14,76	0,24
6	20,26	25	25,13	0,13
7	14,37	33	33,14	0,14
8	20,42	41	40,69	0,31

Заключение

Представлено решение задачи определения КРС системы посадки ПРМГ с использованием БПЛА на основе анализа ряда Фурье огибающей сигналов. При этом предложенная конфигурация бортового оборудования для БПЛА имеет технический запас для дальнейшей модернизации.

Предложенный алгоритм определения КРС верифицирован с помощью контрольно-проверочной аппаратуры. При этом ошибка расчета составляет не более 0,31%. Дополнительно можно провести моделирование по обработке с наложением оконных функций, для уменьшения уровня боковых лепестков в спектре сигнала, что может привести к улучшению выборки сигнала на фоне помех.

Для оценки работоспособности предлагаемой конфигурации бортового оборудования и алгоритма определения КРС в реальных условиях проведены также испытания на аэродроме с ПРМГ (без БПЛА) с успешным результатом. В дальнейшем

предполагается провести испытания бортового оборудования уже с БПЛА.

Необходимо отметить, что в канале передачи данных на частоте 433 МГц было реализовано шифрование с алгоритмом *RSA*.

Можно рекомендовать предложенные конфигурацию бортового оборудования БПЛА и алгоритм определения КРС к испытаниям на аэродроме с дополнительным использованием пульта дистанционного управления, приемного модуля GPS. При дальнейшем развитии можно увеличить диапазон сканирования по частоте с возможностью определения пеленга на объект излучения, добавить канал измерения высоты с помощью лазерного дальномера по интерфейсу USB с диапазоном измерения высоты от 0 до 300 метров с сантиметровой точностью.

Литература

1 ГОСТ 26121 Системы инструментального захода самолетов на посадку радиомаячные. Термины и определения.

2 Руководство по эксплуатации БКИВ.411734.006-03 РЭ. Контрольно-проверочная аппаратура для имитации радиосигналов ближней навигации и посадки КПА-РСБН.

3 ГОСТ 15827 Системы радиомаячные дециметрового диапазона второй категории инструментального захода самолетов на посадку.

4 Вольфсон А.Е. К унификации измерений модуляционных параметров имитаторов сигналов радиомаячных систем навигации и посадки метрового и дециметрового диапазонов // Общие вопросы электроники. 1984. Выпуск 6. С.53-60.

Нестерович Андрей Владимирович – аспирант, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: радионавигация, радиолокация.

Email: a.nesterovich@goz.ru

Мурсалов Дмитрий Леонидович – аспирант, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: радионавигация, радиолокация.

Email: d.mursalov@goz.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

DETERMINATION OF THE HEARING DIFFERENCE COEFFICIENT OF THE LANDING RADIO BEACON GROUP ON THE BASIS OF UNMANNED AERIAL VEHICLE

The solution to the problem of determining the inaudibility coefficient of a landing beacon group using an unmanned aerial vehicle based on Fourier series analysis of the signal envelope is presented. The results of mathematical modeling of the radio signal of the landing radio beacon group and the calculation of the inaudibility coefficient are presented. The equipment configuration for the unmanned aerial vehicle is proposed. The results of verification of the realized algorithm for determining the hearsay coefficient with the help of control and verification equipment are given.

Keywords: hearing difference coefficient, landing beacon group, unmanned aerial vehicle, aircraft.

Nesterovich Andrey Iadimirivich – postgraduate student, JSC "Obukhovskiy plant", St. Petersburg.

Research interests: radio navigation, radiolocation.

Mursalov Dmitriy Leonidovich – postgraduate student, JSC " Obukhovskiy plant ", St. Petersburg.

Research interests: radio navigation, radiolocation.

УДК 001.891.34

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОМПОНЕНТНОЙ БАЗЫ В КОСМИЧЕСКИХ ПРОГРАММАХ ИНОСТРАННЫХ ГОСУДАРСТВ

Польщиков К.А.

В статье рассматриваются особенности применения электронной компонентной базы в космических программах иностранных государств. Рассмотрена нормативно-правовая база космических агентств иностранных государств, сделан вывод о целесообразности применения зарубежного опыта при доработке отечественных стандартов. Материал подготовлен на основании анализа публикаций в зарубежных источниках – сайтов космических агентств NASA, ESA, CNSA, статей в журналах и других источников.

Ключевые слова: космическая программа; космическое агентство; электронная компонентная база; стандарт; инструкции.

Введение

С момента запуска первого в мире искусственного спутника Земли – советского космического аппарата «Спутник-1» космической программой нашей страны реализуются самые сложные и значимые проекты по освоению космического пространства.

На сегодняшний день перед российской космической отраслью ставятся все более новые и масштабные задачи, такие как, предоставление гражданам, бизнесу и органам власти качественной космической связи на всей территории нашей страны, а также геоинформационных сервисов по предоставлению услуг. Для решения этих вопросов требуется существенно увеличить количество искусственных спутников на орбите и производство космической техники, в связи с чем, правительству РФ до 01.07.2024 поручено разработать и утвердить национальный проект по развитию суверенной отечественной индустрии космических сервисов, технологий и продуктов. Реализация такого масштабного национального проекта возможна только при создании условий, обеспечивающих высокое качество выпускаемой космической техники. Это требует модернизацию системы контроля качества выпускаемой продукции на предприятиях космической отрасли. Учитывая, что по состоянию на 2024 год в мире существуют 22 космические программы (таблица 1), проводящих запуски космических аппаратов, при доработке отечественных стандартов для предприятий космической отрасли следует учесть зарубежный подход к обеспечению качества [4].

Т а б л и ц а 1 – Космические программы иностранных государств

Наименование космического агентства	Аббревиатура названия космического агентства	Страна
Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства	NASA	США
Космическое агентство Великобритании	UKSA	Великобритания
Государственное космическое агентство Украины	SSAU (ДКАУ)	Украина
Шведское национальное космическое агентство	SNSA	Швеция
Польское космическое агентство	ПОЛЬСА	Польша
Комиссия по исследованию космического пространства и верхних слоев атмосферы	SUPARCO	Пакистан
Новозеландское космическое агентство	NZSA	Новая Зеландия
Мексиканское космическое агентство	MSA	Мексика
Корейский институт аэрокосмических исследований	КАРИ (рус. яз.)	Южная Корея
Национальное управление аэрокосмического развития	KCST	Северная Корея
Японское агентство аэрокосмических исследований	JAXA	Япония
Итальянское космическое агентство	ASI	Италия
Израильское космическое агентство	ISA	Израиль
Иранское космическое агентство	ISA	Иран
Индийская организация космических исследований	ISRO	Индия
Национальный центр космических исследований	CNES	Франция
Европейское космическое агентство	ESA (ASE, EWO)	Франция
Китайское национальное космическое агентство	CNSA	Китай
Канадское космическое агентство	CSA	Канада
Бразильское космическое агентство	AEB	Бразилия
Австралийское космическое агентство	ASA	Австралия
Национальная комиссия по космической деятельности	CONAE	Аргентина

1 Особенности применения электронной компонентной базы

Наиболее часто аварийные ситуации при эксплуатации космических аппаратов возникают по причине сбоев в работе электронных компонентов. В отечественных разработках применяется электронная компонентная база (далее – ЭКБ) как российского, так и зарубежного производства. В отличие от применения отечественной ЭКБ, пригодность к применению в космической технике которой подтверждена предприятием-изготовителем, применение ЭКБ зарубежного производства осложнено отсутствием полного объема технических данных от поставщиков и требует проведение дополнительных дорогостоящих испытаний. Таким образом, проблема применения ЭКБ в разработках космической техники актуальна и затрагивает не только вопросы качества космических аппаратов, но и затраты на их производство.

В данной статье рассмотрены особенности применения ЭКБ в космических программах иностранных государств и сделан вывод о целесообразности заимствования зарубежного опыта применения ЭКБ.

NASA (National Aeronautics and Space Administration – Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства, с англ.) разработало широкий спектр стандартов для обеспечения безопасности и надежности космических запусков [2]. Данные стандарты охватывают различные аспекты исследования космоса, проектирования космических аппаратов, полетов человека в космос, безопасности, оборудования и т.д. Среди них можно выделить два базовых стандарта по применению ЭКБ: *NASA-EEE-INST-001* и *NASA-EEE-INST-002*.

NASA-EEE-INST-001 включает инструкции по выбору конденсаторов, кварцевых генераторов, диодов и транзисторов, волоконной оптики, фильтров, предохранителей, микросхем, магнитов, реле, резисторов, термисторов, проводов и кабелей. В стандарте определены три уровня надежности оборудования, которое может применяться в космических аппаратах с различным сроком службы (времени нахождения в космосе).

Первый уровень надежности присваивается ЭКБ, гарантированный срок эксплуатации которой составляет 5 и более лет с момента запуска космического аппарата.

Второй уровень надежности присваивается ЭКБ, предназначенной для функционирования в течение 1 – 5 лет с момента запуска космического аппарата.

Третий уровень надежности присваивается ЭКБ, гарантированный срок эксплуатации которой менее 2 лет, надежность данных деталей может значительно различаться в зависимости от производителя, типа ЭКБ или применяемых материалов при производстве ЭКБ. Вероятность выхода из строя деталей 3-го уровня самая высокая.

Согласно требованиям *NASA-EEE-INST-001* вся применяемая ЭКБ группируется по разделам, типам и коду *FSC* – код, присваиваемый определенному типу ЭКБ, таблица 2.

Применяемая ЭКБ должна быть отобрана и испытана в соответствии с предъявляемыми требованиями к космическому проекту. ЭКБ может быть выбрана по уровням надежности, функциональным характеристикам и назначению.

Т а б л и ц а 2 – Распределение ЭКБ по разделам, типам и коду

Раздел	Тип ЭКБ	FSC
A	Конденсаторы	5910
B	Разъемы	5935
C	Кварцевые генераторы	5955
D	Диоды и транзисторы	5961
E	Волоконная оптика	60GP
F	Фильтры	5915
G	Предохранители	5920
H	Микросхемы гибридные	5962
I	Микросхемы с одним кристаллом (monolithic)	5962
J	Магниты	5950
K	Ретрансляторы	5945
L	Резисторы	5905
M	Термисторы	5905
N	Провода и кабели	6145

В случае применения ЭКБ, аттестованной по военным стандартам (*MIL*), исполнитель проекта обязан проверить, чтобы показатели надежности соответствовали как минимум 2-му уровню.

При применении ЭКБ, аттестованной по частным стандартам предприятий – изготовителей (*SCDS*), исполнитель имеет право запросить и производителя ЭКБ проведение испытаний для уточнения показателей надежности.

ЭКБ, соответствующая первому уровню надежности, может быть испытана только производителем в соответствии с предъявляемыми требованиями. По завершении испытаний производитель обязан присвоить номер и сертификат соответствия каждой партии ЭКБ.

Стандарт рекомендует исполнителю не применять ЭКБ, аттестованной по коммерческим стандартам (*Industrial*), например *AQS* – стандарт автомобильной системы качества, даже в случае их соответствия техническим требованиям. Ответственность за применение несет исполнитель.

Стандарт предусматривает проведение «скрининговых» испытаний для каждой партии ЭКБ (выборочный входной контроль), а также контрольных испытаний для ЭКБ, применяемой непосредственно в космических аппаратах. Программу проведения контрольных испытаний определяет производитель. Необходимость проведения контрольных испытаний определяет исполнитель проекта.

Для определения пригодности ЭКБ к применению предусмотрены квалификационные испытания, включающих в себя механические, электрические испытания, а также проверку на соответствие требованиям по охране окружающей среды. Квалификационные испытания проводят с целью проверки соответствия материалов, конструкции, эксплуатационных характеристик и надежности ЭКБ требованиям назначения. Также ЭКБ может считаться квалифицированной, если она ранее применялась в аналогичных или более жестких условиях, и это задокументировано, на ЭКБ может быть распространено действие квалификационных испытаний аналогичной продукции, если аналоги произведены на том же предприятии. Ответственность за подтверждение квалификации ЭКБ, несет исполнитель проекта.

В стандарте *NASA-EEE-INST-001* рекомендовано проводить проверку поставщиков ЭКБ по перечням источников данных сети интернет. Проверка поставщика рекомендована при применении ЭКБ уровней надежности 1 и 2. Для этого в сети интернет размещен список основных поставщиков *NASA (CSL)*, в котором содержится информация о технологиях производства, производственных процессах, данные аудитов. По желанию исполнителя можно проводить проверку «со стороны заказчика» (*CSI*). Такая проверка рекомендуется для ранее не закупаемых ЭКБ уровня 1 и 2, а также для ЭКБ, при применении которых выявлен отказы. Особенность *CSI* в том, что данные проверяются на предприятии-изготовителе ЭКБ путем визуального контроля партии ЭКБ и электрических испытаний. По результатам *CSI* составляется отчет.

Стандарт *NASA EEE-INST-002* содержит требования по выбору соединителей, применяемых в разработках космических аппаратов. Для применения соединители должны быть испытаны на соответствие требованиям *NASA EEE-INST-002*. Соединители должны соответствовать требованиям по электро-магнитной совместимости, воздействию газов. Соединители также подразделяются на уровни надежности – 1, 2 и 3. Соединители 1 и 2 уровней считаются высоконадежными и могут включать зажимные механизмы, штыри или зацепные приспособления. В соединителях 3 уровня также используются аналогичные механизмы. Для применения в космических аппаратах не рекомендуются соединители:

- соединители типа *PCI* и жесткие механические соединители диаметром 2 мм, а также соединители с плоским раздвоенным гнездовым контактом типа *Eurocard*, *VME*.
- соединители, имеющие два контакта без механизма зажима.
- соединители с контактными зажимами *press fit* для крепления к бортам управления.
- *PWB*-соединители типа *Eurocard MIL-DTL-55302* с 131 по 134.
- *PWB*-соединители типа *MIL-DTL-55302/157* и *158 VME*.
- все модульные соединители и сборки *MIL-C-28754* и *MIL-A-28859*.
- все соединители *MIL-DTL-32234*.

Европейское космическое агентство (*European Space Agency, ESA* - сокр.) создало [1] Европейский координационный совет по космическим компонентам (*European Space Components Coordination, ESCC* – сокр.) с целью объединения усилий европейских национальных и международных общественных космических организаций, производителей компонентов и отраслей – пользователей, касающихся различных аспектов космических компонентам, структурная схема *ESCC* представлена на рисунке 1. Под космическими компонентами понимаются электрические, электронные и электромеханические компоненты.

Целью *ESCC* является повышение доступности стратегических космических компонентов с требуемыми характеристиками для институциональных и коммерческих космических программ, согласование усилий и объединение ресурсов по разработке космических компонентов в государствах членах *ESA* путем обеспечения единой унифицированной системы стандартизации, спецификации продукции, оценки, квалификации и закупок европейских космических компонентов, а также сертификации компонентов и производителей компонентов.

Система документации *ESCC*, рисунок 2, включает документы и спецификации,

распределенные по уровням с 0 по 4. Документы уровней 0 и 1 описывают структуру и работу *ESCC*. Спецификации 2, 3 и 4 содержат техническую информацию, необходимую для испытаний и закупки компонентов. Также там приведена административная информация для взаимодействия с *ESCC* производителей компонентов и технических специалистов. Для справочной информации об использовании стандартов *ESCC* нужно обращаться к документам 0 и 1 уровней. Основным стандартом в системе *ESCC* является *ESCC 0000*.

ESCC 0000 определяет цели, политику, организационную и управленческую структуры *ESCC*. Своего рода это устав *ESCC*. В нем также представлены обязательства участников *ESCC*, дополнительно определены:

- стратегические программы и планы работы по исследованиям и разработкам космических компонентов, даны рекомендации членам *ESCC* о проведении исследований за счет своих средств.
- политика, методы и стандарты оценки, квалификации и закупки космических компонентов.
- единая европейская система спецификаций продукции для космических компонентов и проведение квалификационных испытаний.

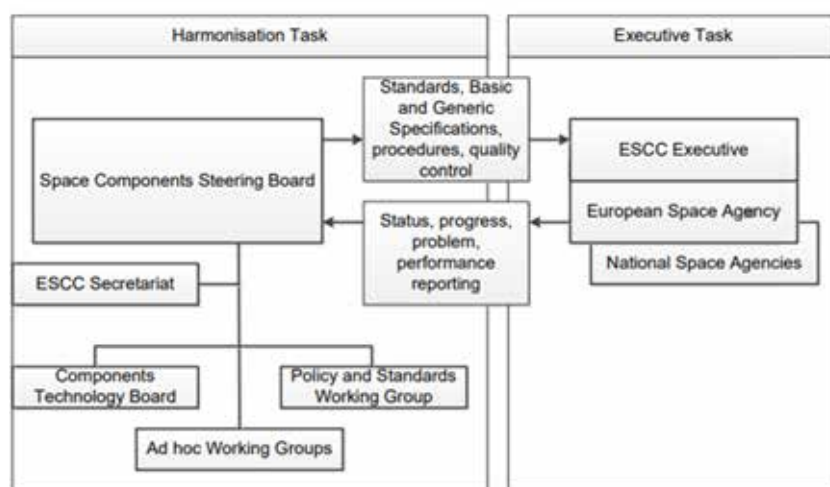


Рисунок 1 – Структурная схема *ESCC*

Список организаций - участников *ESCC* представлен на рисунке 4.

Китайское национальное космическое агентство (*CNSA*) разработало свою систему космических стандартов в целях ускорения развития космической отрасли, содействия развитию космических технологий и поддержки международного сотрудничества [3]. Китайские космические стандарты распространяются на управление космическими проектами, качество космической техники, инженерии и научные работы. Структурная схема разделения по направлениям китайских космических стандартов представлена на рисунке 3. Стандарты по применению и качеству ЭКБ входят в раздел качества продукции. В стандартах по применению ЭКБ даны рекомендации по выбору, испытаниям по подтверждению технических характеристик, технологиям производства ЭКБ, всего *CNSA* разработало порядка 243 стандарта по применению

различных типов ЭКБ. Кодовое обозначение стандартов по ЭКБ – *CNSA-QCA...I* – *CNSA-QCD...87*. В открытых источниках тексты стандартов не публикуются.

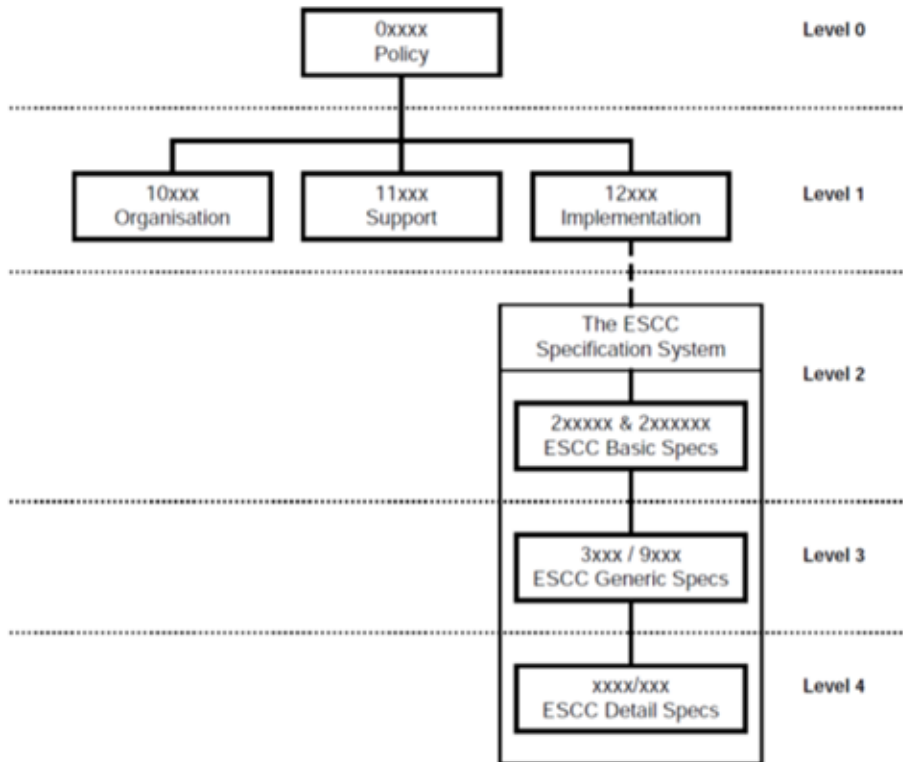


Рисунок 2 – Схема системы документации *ESCC*

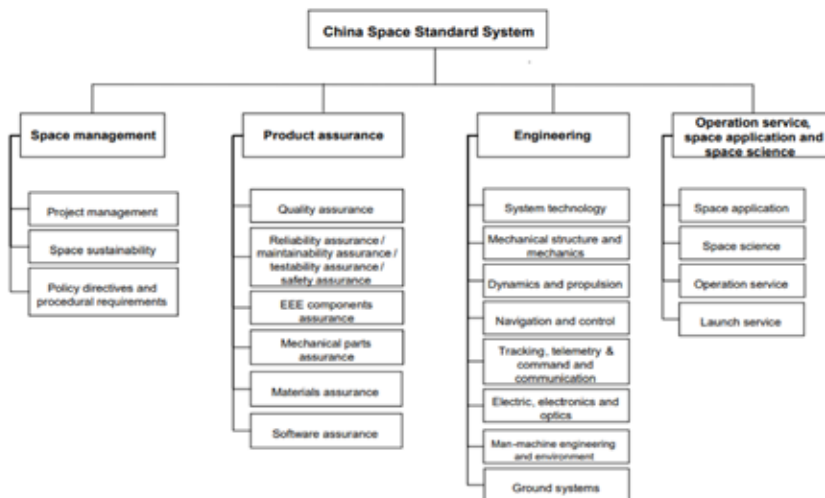


Рисунок 3 – Структурная схема распределения китайских космических стандартов

APPENDIX B**LIST OF ESCC MEMBERS AND OBSERVERS**

A signatory to the Founding Act, Accession Agreement or Observer Agreement is indicated together with the date of entry into force.

ESCC MEMBERS		
Member Organisation	Signatory	Date
Agenzia Spaziale Italiana	Mr S. Vetrella	08 October 2002
British National Space Centre	Mr C. Hicks	08 October 2002
Centre National d'Etudes Spatiales	Mr A. Bensoussan	08 October 2002
Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt	Mr S. Wittig	08 October 2002
European Space Agency	Mr A. Rodotà	08 October 2002
Gallium Arsenide Manufacturers	p.p. Mr P. Huguet	08 October 2002
Silicon Manufacturers	p.p. Mr A. Guennoun	08 October 2002
Hybrid Manufacturers	p.p. Mr O. Remondière	08 October 2002
Eurospace (Component User Industry)	Mrs P. Sourisse	08 October 2002

ESCC OBSERVERS		
Observer Organisation	Signatory	Date
Instituto Nacional de Tecnica Aeroespacial	Mr J. Torres Riera	26 February 2003
Enterprise Ireland	Mr J. Howley	26 February 2003

Рисунок 4 – Организации – участники ESCC

Заключение

Данные о применении ЭКБ остальных стран – участников космических программ не публикуются в открытом доступе. Однако сделанный обзор открытых источников показывает, что космические агентства других государств уделяют особое внимание вопросам развития контроля применения ЭКБ. NASA и китайское космическое агентство разрабатывают собственные стандарты, европейское космическое агентство создало координационный совет по вопросам применения космических компонентов. Создание координационного совета обусловлено большим количеством стран-участников космических программ, сотрудничающих с европейским космическим агентством. Отличительной особенностью контроля применения ЭКБ в зарубежных космических программах является разработка отдельных стандартов для каждого типа ЭКБ, также при проведении испытаний принимаются во внимание частные стандарты – стандарты, разработанные коммерческими предприятиями для сертификации своей продукции. Преимущество разработки стандартов для каждого типа ЭКБ – возможность учесть особенности каждого типа, недостатком данного подхода является излишнее число контролирующих организаций и бюрократия. Данный подход к применению ЭКБ может быть рассмотрен при доработке отечественных стандартов.

Литература

1 ESA//European Space Components information Exchange System: сайт. URL: <https://escies.org/specification/> (дата обращения 10.01.2025).

2 NASA//NASA - Science: сайт. URL: <https://science.nasa.gov/science> (дата обращения 11.11.2024).

3 CNSA//CNSA-Government Affairs: сайт. URL: <https://www.cnsa.gov.cn> (дата обращения 09.08.2024).

4 World population review: сайт. URL: <https://worldpopulationreview.com> (дата обращения 08.08.2024).

Польщиков Кирилл Андреевич – ведущий инженер, АО «Обуховский завод», Санкт-Петербург.

Область научных интересов: организация производства, оптимизация производственных процессов.

Email: k.polshchikov@goz.ru

Почтовый адрес: 192012, Санкт-Петербург, проспект Обуховской обороны, дом 120.

FEATURES OF THE USE OF ELECTRONIC COMPONENT BASE IN SPACE PROGRAMS OF FOREIGN COUNTRIES

The article discusses the features of the use of electronic component base in space programs of foreign countries. The regulatory framework of space agencies of foreign countries is considered, and a conclusion is made about the expediency of using foreign experience in finalizing domestic standards. The material was prepared based on an analysis of publications in foreign sources – the websites of the space agencies NASA, ESA, CNSA, articles in journals and other sources.

Key words: space program, space agency, electronic component base, standard, instructions.

Polshchikov Kirill Andreevich - Senior Engineer, JSC «Obukhovsky plant», St.Petersburg.

Research interests: manufacturing organization, manufacturing processes optimization.

ИНТЕРНЕТ – ПРАВНУК ОПТИЧЕСКОГО ТЕЛЕГРАФА

Сайбель А.Г., Геворкян А.Г.

В статье рассматриваются исторические предпосылки и прикладные основания для выполнения научных исследований, направленных на решение задачи коммуникаций пространственно разнесенных абонентов. На примере оптического телеграфа рассмотрен процесс восстановления деталей технического решения, противоречиво описанного в сети интернет. Представлены методические подходы к формированию и проверке исследовательских гипотез.

Ключевые слова: оптический телеграф; линия связи; история техники.

Введение

Решение прикладной задачи сообщения с соплеменниками на большом удалении было актуальным с древних времен. Для такого дистанционного общения использовались специальные посыльные – гонцы, обученные животные и птицы, а также звуковые и световые сигналы.

Крики и свист, звуки барабанов, труб и колоколов, яркий огонь или контрастный дым позволяли передавать сигнал бедствия на расстояние до многих километров. Такие каналы связи имеют низкую информативность и пригодны не для общения, а только для оповещения.

Разработанные на флоте азбуки в виде разноцветных флагов и световых посылок позволяют передавать сообщения, но скорость доведения информации невысока.

Зрительный канал приема сигналов является самым информативным. Лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать, говорили наши предки. Кроме высочайшей информативности этот канал обладает и самой большой дальностью действия – даже невооруженным взглядом можно наблюдать объекты на астрономических расстояниях. Люди издавна использовали органы зрения для общения друг с другом, в том числе на больших удалениях. Сообщения могли передаваться различными оптическими сигналами, отличающимися значениями воспринимаемых глазом параметров излучения, к которым относятся как параметры самого излучения: частота, интенсивность, ширина и форма спектра, так и пространственные характеристики, селективируемые органами зрения, позволяющие определять размер и форму предметов, а также динамику их изменений.

Целью статьи является описание процесса и результатов исследования траектории развития технологии связи на основе доступных источников в сети Интернет.

1 Предыстория телеграфии

Высокую потребность в повышении оперативности передачи сообщений подтверждают технические решения, относящиеся к дохристианской эре. Ранний водяной телеграф (греч.: *οδραυλικός τηλεγράφος*) был разработан в Греции 4 века до н.э.

Система включала в себя идентичные сосуды, размещаемые на соседних воз-

вышенностях. Сосуды наполнялись водой, и в них находились поплавки с вертикально закрепленными стержнями, на которых в разных точках по высоте были нанесены заранее заданные коды (слова, фразы). По световым сигналам передающего пункта открывались и закрывались краны, истекая через которые вода приводила в движение поплавки, что давало возможность оперативно обмениваться информацией.



Рисунок 1 – Водяной телеграф [1]

Общие принципы действия такого телеграфа и клепсидры демонстрирует способность человечества замечать физические свойства объектов и процессов окружающего мира и изобретательно применять в практической деятельности.

В современной терминологии положенный в основу водяного телеграфа принцип может быть описан как передача сообщений оптическими сигналами с широтно-импульсной модуляцией.

В Британии XIX века также применялись водяные устройства для передачи сигналов на расстояние, но использовался гидравлический принцип изменения уровня жидкости в сообщающихся сосудах.

Важной особенностью систем связи является их коллективное использование, что предполагает необходимость согласованности действий людей, расположенных на значительном удалении друг от друга. Порядок совместных действий должен быть определен заранее и известен участникам процесса передачи информации в объеме, требуемом исполняемой ролью. При разработке такого порядка действий необходимо учитывать возможные варианты развития событий, риски ошибочных действий исполнителей, минимизировать временные затраты на формирование сигналов при передаче и обработку при приеме.

Указанная особенность систем обмена сигналами позволяет рассматривать исторические процессы их создания и развития в двух различных аспектах: изобретательском и прикладном.

Придумать такую систему, которая позволяла бы быстро и безошибочно пересылать сообщения на большие расстояния – интересная научно-инженерная задача, достойная приложения творческих усилий и затрат времени.

Воплощение такой системы на практике – масштабное дорогостоящее предприятие. Для реализации проекта потребуются значительные средства, привлечение большого числа людей, формирование организационной структуры для эксплуатации

и применения. Только масштабные цели могут стать стимулом для практических шагов в данном направлении.

В давние времена скорость передачи сообщений была важна только при ведении военных действий, когда требуется быстрое доведение информации от передовых наблюдателей и разведчиков до лиц, принимающих решение, а также необходимо оперативно доводить команды до исполнителей для согласованности действий распределенных сил и средств. Для решения таких важных задач даже можно освободить от непосредственного участия в ведении боевых действий группу воинов и выделить необходимые ресурсы для решения ими задач по организации взаимодействия территориально распределенных подразделений.

Наверное, и купец хотел бы заранее знать, как меняются спрос и цены на рынке в соседнем регионе, прежде чем направляться туда с товаром, но расходы на организацию такой системы сообщений вряд ли покроются потенциальной прибылью. Поэтому все новости в мирной жизни перемещались вместе с их живыми носителями. На протяжении многих веков почта оставалась единственным неличным видом общения обитателей разных территорий.

В XVII-XVIII вв. в Европе стремительно развиваются товарно-денежные отношения, ширится захват колоний, начинается развитие промышленности и происходят бурные политические события (революции в Англии и Франции). Ценность сообщений в это время заметно возросла, от них зависели успехи в борьбе с конкурентами и военными противниками. Информация стала товаром, который покупался, фальсифицировался, а главное, служил основой для принятия важнейших политических и финансовых решений. Оперативности требовали банковские и биржевые операции. Почтовые сообщения уже не соответствовали требованиям общества. В этих условиях предпринимаются практические шаги для ускорения движения информации при помощи технических средств.

Исследование битвы при Вене 1683 года побудило британского энциклопедиста Роберта Гука разработать проект технических средств передачи зрительных сигналов для управления войсками. В отличие от описанного выше водяного телеграфа, техническая реализация которого представляет собой своеобразные часы, позволяющие связать длительность временного интервала между световыми сигналами с кодовым знаком, предложенное Гуком устройство предназначалось для считывания на большом расстоянии хорошо различимых знаков, последовательность которых позволяет передавать сообщение. Наиболее близким аналогом такого варианта передачи сообщения может быть система, в которой человек последовательно поднимает таблички с буквами или кодовыми символами.

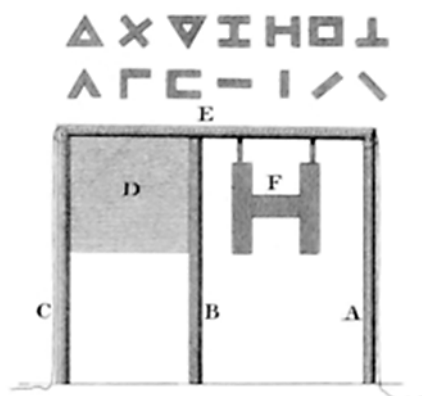


Рисунок 2 – Телеграф Гука

Проект с яркой и всеобъемлющей схемой визуальной телеграфии, содержащей множество практических деталей, был представлен Королевскому обществу в 1684 году. Но система так и не была внедрена в практику.

Француз Амонтон (*Amonton*), автор закона Амантона, в 1702 г. устроил оптический телеграф с подвижными планками, который он показывал в действии при дворе.

Один из экспериментов оптической сигнализации был проведен англо-ирландским землевладельцем и изобретателем сэром Ричардом Ловеллом Эджвортом в 1767 году. Он заключил пари со своим другом, игроком на скачках, лордом Марчем, что тот сможет передать информацию об исходе забега всего за один час. Используя цепь сигнальных устройств, возведенных на возвышенностях, сигнал передавался от одной станции к другой и принимался с помощью телескопа. Сам сигнал формировался большим указателем, который можно было разместить в восьми возможных положениях с шагом 45 градусов.

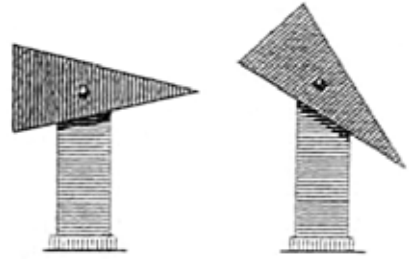


Рисунок 3 – Телеграф Эджворта

Можно отметить, что указанная причина для практических действий в виде пари играет в развитии науки не последнюю роль. В истории математики можно найти свидетельства, как европейские аристократы внесли свой вклад в развитие алгебраических методов, поскольку решение кубических уравнений «на спор» являлось вполне распространенным занятием среди представителей высшего общества.

В 1778 году для установления сообщений между Парижской и Гринвичской обсерваториями был устроен оптический телеграф, который использовал огни.

В военном деле световой сигнализацией при помощи так называемых гелиографов пользовались весьма часто. Основной частью гелиографа является зеркало, при помощи которого световые лучи могут быть направлены в заданное место, где находится другое такое же зеркало. Условные знаки образуются короткими поворотами зеркал в ту или другую стороны. При благоприятных условиях погоды такие знаки могут передаваться на дальность до 65 км. Ночью, при лунном свете, такое расстояние сокращается до 15 км, а при освещении лампами – до 5 км.

2 Оптическая телеграфия Шаппа

В оптических телеграфах другого рода условные знаки передавались не с помощью световых источников и их лучей, посылаемых с одного места в другое, а посредством особых механизмов с некоторыми подвижными частями в виде линеек или кругов, видимых с дальнего расстояния.

Создание и развитие данного вида сообщений связывают с именем француза Клода Шаппа и его братьями.

Сетевые источники гласят, что в 1792 г. национальному конвенту Франции был представлен прибор под названием семафора (носителя знаков). Первая линия системы была устроена в 1794 г. из Парижа в Лилль и первое извещение на ней было передано утром 1 сентября о взятии французами города Конде у австрийцев. На протяжении 225 км были устроены 22 станции – башни с шестами и подвижными планками. Для передачи одного знака требовалось при этом две минуты. Три подвижные планки такой системы могли принимать 196 различных относительных положений и изображать таким образом столько же отдельных знаков, букв и слов, наблюдаемых при помощи зрительных труб.

На сетевых ресурсах информация об оптической телеграфии представлена широко, но весьма поверхностно. Всегда интересен путь изобретателя, приведший его к решению инженерной задачи: откуда появилось желание заняться именно этой темой,

чьи мысли натолкнули на реализованные решения, почему такое устройство появилось именно в этот период времени.

В своей книге Шапп упоминает интересное предложение некоего Кесслера производить сигнализацию с помощью светового источника, помещенного в светонепроницаемую камеру с дверцей, открывая и закрывая которую можно было подавать световые сигналы различной длительности. Заметим, что такая идея по используемому принципу очень схожа с древним водяным телеграфом. Напрашивается явный вопрос: как различать длительности временных интервалов? В первом варианте своего дальновещающего устройства Шапп использовал для определения временных интервалов механизм, схожий с часами, но с более высокой скоростью вращения стрелки. Синхронизацию механизмов для задания и измерения временных интервалов предполагалось производить знаками. Первые опыты показали, что знаки сами по себе могут быть использованы как носители частей сообщения.

Мало где исследователи истории современных сетевых коммуникаций указывают на незначительные для этого процесса события, которые в жизни изобретателей и создателей часто были судьбоносными.

Так, первый вариант устройства, созданного К.Шаппом, в силу громоздкости располагавшийся на улице, не был представлен общественности по причине разрушения неизвестными хулиганами.

Второй вариант тоже пострадал от вандалов: размещенное на площади для демонстрации широкой общественности чудо инженерной мысли было воспринято присутствующими как средство, которым заговорщики передают знаки заточенному в том момент времени королю. Хорошо, что самим изобретателям удалось избежать участи телеграфирующего устройства.

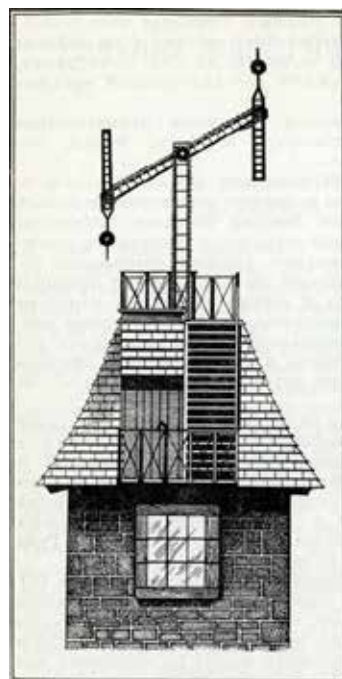


Рисунок 4 – Телеграф Шаппа

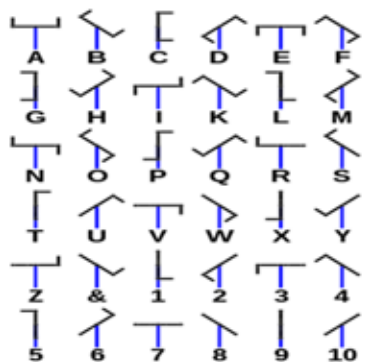


Рисунок 5 – Семафорные коды для передачи букв и цифр

Немаловажным является факт, что брат К.Шаппа, занимавший высокий государственный пост, поддержал инициативу и помог с практической реализацией.

Время, насыщенное масштабными событиями, общий революционный настрой французов, удачные совпадения и яркий успех в быстрой первой передаче важного сообщения позволили оптическому телеграфу перейти из разряда технически интересных проектов в стадию практического применения.

Успешные сеансы передачи сообщений дали толчок развитию нового вида коммуникаций. Сеть станций во Франции активно развивалась, суммарная протяженность линий связи в итоге составляла тысячи километров.

Станции оптической связи появились в Швеции, Британии, Канаде, Испании,

Португалии, Германии, на Мальте. Технические особенности различались, но основные совершенствования были направлены на повышение скорости передачи и обеспечение скрытности смысла переданного сообщения.

Для сокращения времени подготовки передаваемого знака вводились средства механизации и автоматизации, изобретались способы демонстрации текущего знака с параллельной подготовкой следующего, придумывались приспособления, позволяющие нажатием одной клавиши приводить в движение несколько сочлененных деталей телеграфного механизма. Были разработаны и созданы мобильные телеграфы, пригодные для использования армией в походе.

Несмотря на недостатки оптической телеграфии, заключающиеся главным образом в зависимости от погоды, её активно использовали почти до середины XIX века, в России – до начала 1860-х, а в Швеции – до 1880-х годов. Своими блестящими победами Наполеон I немало обязан оптическому телеграфу, с помощью которого он имел возможность быстро передавать свои распоряжения на большие расстояния.



Рисунок 6 – Сеть оптического телеграфа Франции

3 Оптическая телеграфия в России

Первая в России линия оптического телеграфа была открыта в 1808 году на боровицких порогах на реке Мсте вблизи города Боровичи. По этим местам в древности проходил знаменитый торговый «путь из варяг в арабы».



Рисунок 7 – Управление передачей сообщений

А в петровские и более поздние времена была построена Вышневолоцкая водная система длиной около полутора тысяч километров (реки Тверца, Цна, Мста, Волхов, озеро Ильмень, многочисленные каналы, шлюзы, водохранилища и озера). Она стала важнейшей транспортной артерией между Балтикой и Каспием. Соединила Урал и Поволжье с Ладогой и Невой. О железных дорогах тогда никто даже не помышлял. Северной столице меж тем предстояло расти, строиться, торговать, защищаться и держать открытым «окно в Ев-

ропу» – и работала на эти благие цели вся Россия [2].

В 1824 году была сооружена линия между Петербургом и Шлиссельбургом, по которой передавались сведения о судоходстве на Неве и Ладожском озере. За основу была взята система А.Бетанкура, получившая к тому времени широкое распространение.

В 1839 году было начато сооружение последней в России линии Петербург – Варшава (через Псков, Динабург (Даугавпилс), Вильно (Вильнюс)). Линия была самой протяжённой в мире, длина её составляла 1200 км; было построено 149 промежуточных станций с высотой башни от 15 до 17 метров каждая. В системе использовались отражающие зеркала и светильники. Линию обслуживало 1908 человек. Передача 45 условных сигналов из Петербурга в Варшаву при ясной погоде занимала 22 минуты. Начальная станция располагалась в «телеграфическом наблюдательном домике» – угловой шестигранной башенке над фронтоном Зимнего дворца (со стороны Адмиралтейства; сохранился). «Домик» с 1833 года обслуживал линии с Кронштадтом и загородными царскими резиденциями.



Рисунок 8 – Башня оптического телеграфа на Зимнем дворце

На просторах сети интернет много раз повторяется информация о том, что в Петербурге промежуточные станции оптического телеграфа располагались также на башне здания Городской думы (Невский проспект, 33/1), из-за чего одно время горожане называли башню Телеграфной; на башне Технологического института на Царскосельском проспекте; на здании Чесменской военной богадельни на Московском шоссе, близ деревень Каменка, Перелисино, Новая (на Мызиной горе), близ слободы Пулково, в Гатчине на одной из башен Гатчинского дворца, в Царском Селе.

Если найти карту первой из указанных линий Санкт-Петербург – Кронштадт не составляет большого труда, то увидеть на плане местности размещение промежуточных станций линии Санкт-Петербург – Царское Село не представляется возможным, по крайней мере, автору такая задача оказалась не по силам.

Необходимо отметить, что решение о создании оптического телеграфа принималось на самом высоком уровне. В [3], опираясь на воспоминания И.Ф.Бларамберга, отдельные фрагменты которых еще не переведены на русский язык, рассмотрен эпизод, связанный с опытной демонстрацией оптического телеграфа Ж.Шато в присутствии императора Николая I; показано, как это событие повлияло на дальнейшее развитие оптического телеграфирования в Российской империи.

Поскольку император Николай I решил реализовать идею введения оптического телеграфа в России и пожелал наблюдать первый опыт работы этого средства связи в Зимнем Дворце, то Бларамбергу было поручено отправиться к министру Императорского двора, князю Волконскому за средствами, позволявшими установить обе модели телеграфа, привезенные Шато из Франции.

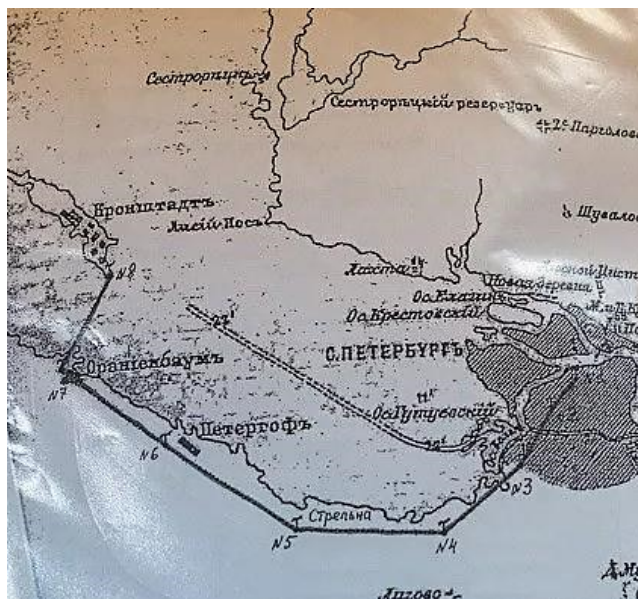


Рисунок 9 – Схема линии оптического телеграфа до Кронштадта

Для демонстрации изобретения Шато Бларамберг выбрал два зала, разделенные с другими залами анфиладой и друг от друга 400 футами (121,92 м). В обоих залах были поставлены ломберные столы, затем в последнем зале на стене натянули скатерть, чтобы телеграф мог проецироваться на белую поверхность. Следующим утром в 8.00 Бларамберг и оба француза с обеими моделями телеграфа пришли в Зимний Дворец.

Бларамберг поставил телеграфы на соответствующие ломберные столы. Через полчаса из своего кабинета вышел император в сопровождении военного министра, графа Чернышева, генерал-адъютанта Нейдхардта, князя Меншикова, тогда морского министра, и князя Волконского. После обмена любезностями приступили к опыту. Император и Шато стояли у первого телеграфа, рядом с кабинетом императора, а Бларамберг отправился с помощником Шато через четыре зала ко второму телеграфу, за которым на стене была прикреплена скатерть. Император написал несколько строк на листке бумаги и передал его для телеграфирования Шато. Бларамберг сел за ломберный стол второго телеграфа, а помощник Шато принимал сигналы и диктовал ему цифры.

Как только депеша была телеграфирована, что было понятно из последнего особого сигнала, помощник взял в руки словарь языка сигналов и стал диктовать Бларамбергу слова соответствующих цифр. Затем Бларамберг поспешил с расшифрованной депешей через все залы назад к Его Величеству и отдал ее ему. Император подтвердил ее дословность. Николай I был доволен. В 20.00 там же опыт передачи депеши с помощью оптического телеграфа был успешно повторен.

После повторной демонстрации работы оптического телеграфа император приказал Бларамбергу ехать вместе с Шато в Стрельну, Петергоф и Ораниенбаум, чтобы выбрать башни или здания, через которые должна была проходить первая телеграфная линия из Петербурга в Кронштадт. «Исходным пунктом должна была служить башенка над кабинетом императора, построенная на крыше дворца, чтобы император сам из своего кабинета мог диктовать нужные депеши. А пока что Его Величество велели доставить господину Шато и его помощнику драгоценные кольца ценой 2400 и 1200 рублей в знак своей благосклонности».

Поручение императора было выполнено. Бларамберг и Шато выбрали четыре пункта в качестве телеграфных станций и вечером вернулись в город. Весной 1833 г. Шато вместе с одним офицером-инженером приступил к строительству своих башен, которое позже продолжилось из Петербурга до Варшавы.

Свое повествование об оптическом телеграфе в России И.Ф.Бларамберг заканчивает так: «В том же году, в каком Россия таким образом возвела свою оптическую телеграфную линию, в Геттингене Гауссу и Веберу удалось практическим способом решить проблему электромагнетической телеграфии; правда, о широком применении еще некоторое время не было речи». Между тем И.Ф.Бларамберг не упомянул об изобретении электромагнитного телеграфа российским ученым немецкого происхождения П.Л.Шиллингом еще в 1832 г.

4 Восстановление утраченного

Телеграфная башня на Невском проспекте присутствует на фотографиях и даже широко. Богадельня – тоже. С учетом того, что станции размещались на расстоянии 8-12 км, на отрезке от Чесменского дворца до Царского Села должна быть как минимум еще одна промежуточная точка.

Геометрия решаемой прикладной задачи указывает, что она могла размещаться в районе современного аэропорта Пулково. В приведенном списке имеется указание на слободу Пулково, а также несколько других поселений, поиск которых на современной карте приводит пытливого исследователя в замешательство.

Топоним Каменка встречается и сегодня в Ленинградской области, но его расположение не укладывается в логику построения рассматриваемой линии оптической связи. При определенной настойчивости можно найти [4] информацию, что в описании СПб губернии по уездам и станам 1838 г. указывается слобода Пулково в ведении Царскосельского Дворцового Правления, при ней церковь каменная во имя Смоленской Богородицы. В Историко-статистических сведениях СПб епархии (1884 г. Выпуск 8 С. 452, 454) в статье о церкви Смоленской Божией Матери в Пулкове сообщается: Пулково находится в 16 верстах от Петербурга и в 5 от Царского села, на Царскосельском шоссе. Деревень в приходе пять: Пулково, Подгорное Пулково, Каменка, Редкое Кузмино, Толмачи и Катлино. Прихожане занимаются садоводством, хлебопашеством и торговлею. Храм посещают усердно, женщины отличаются доброю нравственностью и красотою; из них часто выбираются кормилицы для младенцев царственного семейства.

Следовательно, весьма правдоподобным выглядит расположение двух промежуточных станций оптического телеграфа в районе современного Пулково: Каменка и слобода Пулково.

Царское село является следующей, и конечной, точкой линии Санкт-Петербург – Царское Село. В музее «Дворцовая телеграфная станция» в Александрии есть кар-

тина с изображением оптического телеграфа на Белой башне (Александровский сад) в Царском Селе.

Таким образом удалось восстановить линию Санкт-Петербург – Царское Село.



Рисунок 10 – Белая башня в Царском Селе

История оптического телеграфа на просторах всемирной паутины описана неоднократно, но описания имеют разночтения. В частности, в одних источниках речь идет о единой линии Санкт-Петербург – Царское Село – Гатчина, в других – о двух линиях: Санкт-Петербург – Царское Село и Санкт-Петербург – Гатчина.

На современной карте (рисунок 11) просматриваются удобные маршруты для двух линий.

В указанном выше списке мест расположения станций оптического телеграфа осталось еще несколько названий: Перелисино, Новая (на Мызиной горе), в Гатчине на одной из башен Гатчинского дворца.

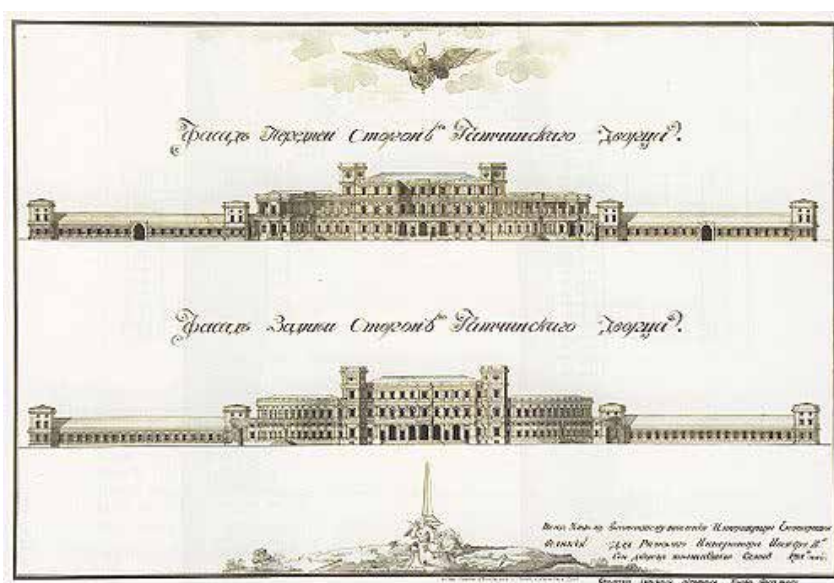


Рисунок 11 – Проект Гатчинского дворца



Рисунок 12 – Современный и послевоенный виды Гатчинского дворца

Если предположить, что станция в Пулково выступает промежуточной для обеих линий, то от нее до Гатчины 24 км, что требует наличия одной – двух промежуточных станций. Чуть меньше, буквально на один километр, расстояние и от Александровского парка до Гатчинского дворца.

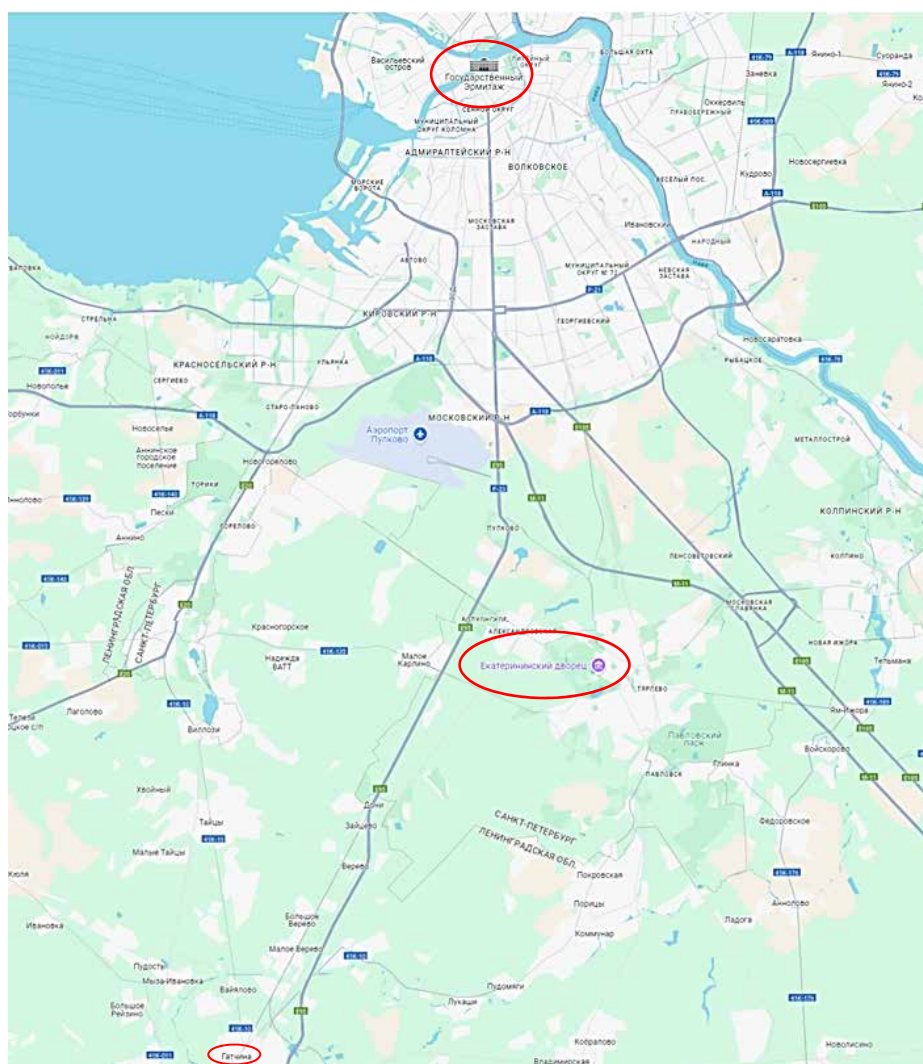


Рисунок 13 – Современная карта южных пригородов Санкт-Петербурга

Вполне логично предположить, что упомянутые выше пункты Новая и Перелисино и есть искомые географические точки.

На карте Ленинградской области легко обнаружить населенный пункт Новая, расположенный на берегу Мярвинского болота. Поблизости находятся и населенные пункты, созвучные названию Перелисино. Очень похоже, что поиски близки к цели. Но расположение найденных поселений совсем не совпадает с логикой построения линии связи до Гатчины. Имеют право на жизнь две гипотезы: 1) была линия связи не только до Гатчины, но и еще до какого-то важного пункта; 2) простое совпадение топонимов сбilo поиски с верного пути.



Рисунок 14 – Современная карта Тосненского района

В пользу первой гипотезы звучит аргумент, состоящий в существовании охотничьего павильона – бывший императорского особняка в поселке Лисино-Корпус, который когда-то регулярно использовался для царской охоты, в том числе на медведя.



Рисунок 15 – Карта Лисинского поселения

Однако радость от такого совпадения, вселяющего надежду на скорое завершения исследования, омрачается историческими цифрами, гласящими, что здание, заложенное по проекту архитектора Николая Леонтьевича Бенуа в осушенной крутой излучине реки Лустовки, строилось только в 1855-1860 годах, что не совпадает со вре-

менем использования оптического телеграфа.

Дальнейшие поиски позволяют обнаружить, что в ЦГИА СПб (Фонд 1205. Опись 17. Дело 748) содержится схематический план деревень Царскосельской Государевой вотчины: Баболова, Кискисары, новое Катлино, Перелисино, Соболева. Увидеть документы сетевыми средствами не получается, но факт существования Перелисино получает подтверждение.

Ресурс [5] позволяет визуализировать представление современников оптического телеграфа о географии местности, где он размещался.



Рисунок 16 – Карта оптической линии связи Петербург – Царское Село – Гатчина

Неожиданно для читателя оказывается, что в то время существовала прямая дорога между Царским селом и Гатчиной, следы от которой можно найти и на современной карте. А на месте Киевского шоссе был густой лес.

Глядя на получившуюся карту становится очевидным, что наши предки осуществляли планы масштабных проектов исходя из разумных расчетов, требующих обеспечения требуемого качества и скорости передачи информации путем минимизации учитывающих промежуточных станций, имеющих взаимную пространственную доступность.

Уделяя много внимания столь незначительному вопросу, как организация оптического телеграфного сообщения, которое просуществовало весьма недолго и достаточно давно, автор стремится продемонстрировать на частном примере, что поверхностное прочтение доступной информации может формировать иллюзию наличия знания по изучаемому вопросу. Попытка практического применения полученного агрегированного знания может наткнуться на его несоответствие решаемой задаче, или современной терминологии, или выбранному методу исследований. Погружение в тему, учет исторического контекста и ограничений на приемлемые варианты решений позволяют сформировать рабочие гипотезы и выделить из них наиболее правдоподобную.

Каждый исследователь, независимо от области профильных научных знаний, регулярно сталкивается с необходимостью досконального изучения материалов теоретического и прикладного характера, без которого невозможно разобраться в содержательной части книжных премудростей. Прочтение позволяет знать материал, но для плодотворной научной деятельности знаний недостаточно, требуется глубокое понимание изучаемых процессов, погружение в их сущность, чему часто мешает полисемия – применение терминов в различных смыслах, неучет исторического контекста достигнутых результатов исследований, неверные допущения и предположения, а также выбор методического инструментария.

Заключение

Завершая исследуемую в статье тему можно отметить, что линиями оптического телеграфа допускалось пользоваться не только венценосным особам. Простые граждане могли послать «оптическую» телеграмму в Гатчину или Вильно – их принимали в «телеграфическом домике», в башне Городской думы. Но стоило это довольно дорого, и популярности у горожан такой вид связи не получил. К тому же он сильно зависел от погоды.

Оптический телеграф утерял свою актуальность в начале 1850-х, с внедрением электрического телеграфа.

В России уже в 1852 году была построена линия электрического телеграфа между Петербургом и Москвой, хотя линия оптического телеграфа Петербург – Варшава ещё некоторое время продолжала действовать. В 1854 году российский оптический телеграф прекратил существование. Многие семафоры оптического телеграфа, слегка переделанные, использовались позже как пожарные каланчи для подачи сигналов пожарной тревоги. Один из таких семафоров сохранился на башне здания Городской думы. Роль пожарной каланчи башня исполняла с 1835 г. Для оптического семафора с 1839 по 1854 гг. использовалась пожарная мачта. С 1855 г. в течение более чем полувека на мачте вновь поднимались только разноцветные шары – условные пожарные сигналы.

Вытесненный с ведущей роли в мировой системе связи, оптический телеграф неожиданно оказался востребованным на флоте. В конце XIX – начале XX века, с появлением автономных электростанций, в оптическом семафоре стали использоваться электрические светильники, что дало возможность разработать световую азбуку. Оптический семафор на флоте был одним из самых простых аварийных видов связи между судами. Используется ручной светильник с рукояткой пистолетного типа, при нажатии на спусковой крючок цилиндрическая подпружиненная шторка открывает лампу накаливания. Используется на кораблях и по сей день сигнальный прожектор и клотиковые огни.

Оптический семафор в конце XIX века стали использовать и на железной дороге. Железнодорожная семафорная азбука поначалу не отличалась особой сложностью, однако с годами необходимость в ней увеличивалась и привела к разработке собственной системы условных световых сигналов.

Разновидностью оптического семафора является и современный светофор.

Листая старые страницы, часто приходится задумываться над схемами изображенных линий связи, задаваться вопросом: почему о больших проектах, важных для страны, размышлял человек, выбравший себе церковное служение; почему некоторое событие имело место именно тогда и в том месте. Детально разбирая детали и погружаясь в атмосферу эпохи, становится очевидным, что вполне естественно связать линиями связи резиденции верховного правителя и центры принятия военно-политических решений; что в те времена в монастырской среде оказывались преимущественно не голодающие бедняки, а люди с достаточным уровнем образования и сложившимися взглядами на жизнь; что каждое событие является следствием аддитивного воздействия ряда векторных причин объективного и субъективного характера с мультипликативным влиянием удачи.

Множество практических задач, решенных при построении и эксплуатации оптических линий связи послужили основой для формирования научного подхода к построению линий электрического телеграфа, а в последствии – радиосвязи, и уже в конце XX века – трансконтинентальных сетевых цифровых систем связи, включающих космический сегмент.

Эксплуатация сетей оптической телеграфии поставила перед специалистами задачи разрешения коллизий, скрытой передачи сообщений, сжатия информации и многие другие; заложила основы каналаобразования, получившие уже в XX веке стройное теоретическое обоснование: «этот телеграф был предусмотрительно сконструирован таким образом, чтобы иметь достаточное количество комбинаций, но не больше, чем необходимо» гласит энциклопедия [6], предвзято идеи кодера источника и канального кодера из следующего века.

В том же источнике 1819 года написано: «В заключение мы относим телеграфное искусство к числу тех, которые не доведены до такой степени совершенства, что не поддаются дальнейшему совершенствованию: хотелось бы, чтобы его можно было систематизировать, чтобы передача данных осуществлялась с такой же легкостью и достоверностью, как при помощи письма.»

Распространяя эту частную идею о возможности дальнейшего совершенствования конкретной технической системы на более широкий класс объектов, можно утверждать, что изучая любой предмет, следует искать пути улучшений окружающей действительности, и стоит предпринимать для этого творческие усилия.

Литература

- 1 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Hydraulic_telegraph
- 2 <https://rodina-history.ru/2023/12/15/locmany-mstinskih-porogov.html>
- 3 Морев В.А., Морева А.В. Опытная демонстрация работы оптического телеграфа Шато в Петербурге в 1833 г. (по воспоминаниям И.Ф. Бларамберга)
- 4 <https://www.citywalls.ru/house30625.html>
- 5 http://www.etomesto.ru/map-peterburg_schubert-guberniya/
- 6 <https://archive.org/details/cyclopaediaorun35rees/page/n5/mode/2up>

Геворкян Арвид Грайрович – доктор технических наук, профессор, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: квантовые стандарты частоты и времени.

Email: noc.rnv@goz.ru

Сайбель Алексей Геннадиевич – доктор технических наук, доцент, профессор, АО «Обуховский завод», г. Санкт-Петербург.

Область научных интересов: радиокоординатометрия, моделирование и оптимизация сложных системы.

Email: saybel_ag@mail.ru

INTERNET – GREAT-GRANDSON OF OPTICAL TELEGRAPH

The article examines the historical background and applied grounds for carrying out scientific research aimed at solving the problem of communications of spatially distributed subscribers. Using the example of optical telegraph, the process of restoring the details of a technical solution, contradictorily described on the Internet, is considered. Methodological approaches to the formation and verification of research hypotheses are presented.

Keywords: optical telegraph; communication line; history of technology.

Gevorkyan Arvid Grayrovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, JSC "Obukhov Plant", St. Petersburg.

Research interests: quantum standards of frequency and time.

Email: noc.rnv@goz.ru

Saybel Alexey Gennadievich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor, JSC "Obukhov Plant", St. Petersburg.

Research interests: radio coordinatometry, modeling and optimization of complex systems.

Email: saybel_ag@mail.ru

Правила приема и оформления рукописей, направляемых для публикации в журнале «Радионавигация и время: Труды СЗРЦ Концерн ВКО «Алмаз – Антей»»

1 Журнал принимает научно-технические рукописи, не предназначенные для публикации в других изданиях.

Тематика присылаемых рукописей должна соответствовать одной или нескольким специальностям следующей группы:

- 1.3.4. Радиофизика;
- 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства;
- 2.2.16. Радиолокация и радионавигация;
- 6.2.1. Вооружение и военная техника.

2 Рукопись должна быть направлена с сопроводительным письмом на бланке организации за подписью ее руководителя или заместителя руководителя.

К рукописи должен быть приложен акт экспертизы о возможности опубликования в открытой печати. Рукопись должна состоять из основного текста, подписанного всеми авторами, и рисунков, напечатанных на отдельных листах. При наличии в организации члена редакционной коллегии журнала может прилагаться его рецензия. К рукописи должны быть приложены сведения об авторах (на отдельном листе).

3 Представляется один экземпляр рукописи на бумаге формата А4 (по ГОСТ 9327-60), плотностью не менее 80 г/м² (по ГОСТ 27015-86), с белизной более 75% (по ГОСТ 30113-94), а также ее электронная версия.

Расстояния от краев листа до границ текста (поля) задаются по требованиям редакции. Размеры полей: верхнее – 38 мм, нижнее – 37 мм, левое – 33 мм, правое – 33 мм.

Электронная версия готовится в редакторе Word (версия не ниже Word 2000), шрифт Times New Roman без стилового оформления при использовании редактора формул Equation версии 3.0 или выше.

Выравнивание текста – по ширине страницы. Каждый абзац начинается с красной строки. Отступ 10 мм. Шрифт – Times 11. Абзац – множитель 1,1. Заголовок – Times Bold 13. Интервал между абзацами равен межстрочному.

4 Порядок расположения материалов в основном тексте (по ГОСТ Р 7.0.7-2009): индекс универсальной десятичной классификации (УДК), название рукописи с числом слов не более 10, инициалы и фамилии автора(ов), аннотация рукописи с числом строк не более 10, текст рукописи, список литературы. Объем рукописи от 3 до 10 страниц основного текста, без учета рисунков. Нумерация страниц – сквозная (располагается снизу, выравнивание по центру).

5 Аннотация оформляется одним абзацем с объемом не более 500 символов и должна отражать постановку задачи, новизну описываемой работы, не дублировать

название, введение и выводы к рукописи, а в определенной мере дополнять их. В аннотацию не следует вставлять аббревиатуры, формулы и ссылки на литературу.

6 Текст рукописи может делиться на составные части. При ссылке на части текста используются термины:

- части первого уровня (части текстового документа) – разделы,
- части второго уровня (части разделов) – подразделы,
- части третьего уровня (части подразделов) – пункты,
- части четвертого уровня (части пунктов) – подпункты.

Нумерация частей имеет вид:

1 Название раздела

1.1 Название подраздела

1.1.1 Название пункта

1.1.1.1 Название подпункта

Части ниже четвертого уровня не нумеруются.

7 В текстовом редакторе Word имеются возможности для применения несуществующих в русском языке графических знаков («•», «►», «●», «◆» и др.). Эти знаки рекомендуется использовать в неофициальной и личной переписке. При составлении текстового документа на русском языке необходимо использовать только стандартные знаки препинания.

Для перечислений используется знак «дефис» («-»). Например:

Цвета:

- синий,
- зеленый,
- красный.

Дефис также используется в сложных словах для разделения их частей.

Знак «тире» («—») используется в предложениях.

В редакторе Word также имеется знак «длинное тире» («—»). Его наличие в тексте чаще всего свидетельствует о том, что фрагмент скопирован из формата html.

В редакторе Word в одной гарнитуре имеется до трех видов кавычек (« », " ", “ ”). Необходимо использовать в тексте единый вид.

8 При подготовке рукописи необходимо обращать внимание на написание букв и слов – русские (а, б, в, ю) и греческие буквы (α , β , ξ , Ξ , Σ , $\epsilon\eta\kappa\alpha$) набираются прямо, а латинские (*a, w, j, W, Q, left, interrupt*) – курсивом (кроме химических формул CuSO_4 , $\text{Ra}(\text{OH})_2$ и т. д.). Те же требования необходимо соблюдать при написании букв, индексов и степеней в формулах.

Обозначения матриц и векторов с использованием букв любых алфавитов набираются жирным шрифтом прямо (**Ω , Ξ , **W, Q, q****).

Для чисел, функций и операторов (1, 252, $\cos(x)$, $\sin(y)$, $\text{rot } F$, $\exp(x)$ и т. д.) используется только прямой шрифт. Римские цифры не допускаются. Дробная часть десятичного числа отделяется запятой.

9 Вывод математических зависимостей должен быть кратким, без промежуточ-

ных преобразований. Все обозначения величин в формулах следует расшифровать (кроме общепринятых типа j , π). Формулы, на которые в тексте есть ссылки, нумеруются в круглых скобках. Нумерованная формула должна быть написана отдельной строкой, выравнивание ее номера осуществляется по правому краю. Для нумерованной формулы допускается расположение ее в тексте рукописи. Формулы, включенные в текст, следует набирать без увеличения интервала между строками, например, b/d , $\exp(x/2)$. Прописные и строчные буквы, надстрочные и подстрочные индексы в формулах должны обозначаться четко.

Индекс у индекса не допускается.

Пример оформления формул:

При моделировании исследуемого процесса использована формула

$$(x + a)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} x^k a^{n-k}, \quad (1)$$

где x – переменная, описывающая процесс;

a – еще одна переменная;

n – число итераций.

В формуле (1) используется знак суммирования.

При моделировании не использованы формулы:

$$x = 1, \quad (2)$$

$$a = 2, \quad (3)$$

где x – первая переменная,

a – вторая переменная.

10 Название таблицы должно быть точным и кратким. Содержание таблиц должно быть лаконичным и иметь только необходимые для иллюстрации текста данные, таблица не должна дублировать рисунки.

Оформление таблиц должно соответствовать ГОСТ 1.5-2001. Таблицы печатаются в общем тексте после первой ссылки и нумеруются, если их количество больше одной.

Пример названия таблицы: «Т а б л и ц а 1 – Результаты вычислений».

Положение начала слова Т а б л и ц а должно совпадать с положением левой границы таблицы.

Строки в таблице не нумеруются.

11 Наименования, обозначения и единицы физических величин приводятся только в системе СИ (ГОСТ 8.417-2002). Обозначение единицы физической величины указывается после последнего числового значения диапазона, например, от 1 до 5 мм, от +10 до минус 40°C.

12 Литературные ссылки нумеруются в прямых скобках, например [1]. Список литературы составляется в соответствии с порядком ссылок по тексту.

Оформление литературных ссылок в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5-2008. Для каждой литературной ссылки следует указывать автора(ов), если такие имеются, полное название работы, издательство, год издания, общее количество страниц в издании или номера страниц при ссылках на журналы или разделы в книгах.

13 Рисунки и фотографии должны быть четкими, контрастными, желательно в альбомной ориентации и располагаться на отдельных листах.

Рисунки предоставлять в формате *.jpg с разрешением не менее 300 dpi без интерполяции.

Числовые обозначения на рисунке ставятся по часовой стрелке. Подрисуночные подписи имеют вид «Рисунок 3 – Спектр сигнала». При наличии на рисунке обозначений после подрисуночной подписи ставится двоеточие и с новой строки приводится их расшифровка.

Подрисуночную подпись разрешается размещать в тексте статьи.

14 Количество рисунков и таблиц, как и число наименований в списке литературы, должно быть не более 6 (для обзорных рукописей список литературы может быть увеличен).

15 Сведения об авторах включают фамилию, имя, отчество, ученую степень, ученое звание, место работы и должность, область научных интересов, а также контактные телефоны и электронные адреса каждого автора. Также должен быть представлен корреспондентский почтовый адрес и телефон для контактов с авторами статьи (можно один на всех авторов). Сведения приводятся на русском и английском языках.

16 Название статьи и аннотация приводятся на русском и английском языках.

17 Ключевые слова или словосочетания отделяются друг от друга точкой с запятой. Ключевые слова приводятся на русском и английском языках.

18 Редакционная коллегия оставляет за собой право возвращения рукописи на доработку при невыполнении указанных выше требований по ее оформлению.

**РАДИОНАВИГАЦИЯ
И ВРЕМЯ**

№16 (24) – 2025

Подписано в печать 15.03.2025 Формат 84×108 1/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая.
Объем 12,6 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 277-2025

АО «Обуховский завод»
191124, Санкт-Петербург, пр. Обуховской Обороны, дом 120, литера Е.

Отпечатано в ООО «Издательство «Балтийская печать».
191119, Санкт-Петербург, ул. Звенигородская, д. 9-11, лит. К, пом. 17Н, ком. 130.