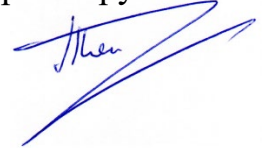


На правах рукописи



Тяпкин Павел Станиславович

**ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОСИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ
ИНФОРМАЦИИ К ИМПУЛЬСНЫМ ПОМЕХАМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕТОДОВ СЛЕПОГО РАЗДЕЛЕНИЯ СИГНАЛОВ**

Специальность 2.2.13.

Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена на кафедре 408 «Инфокоммуникации» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель: - **Важенин Николай Афанасьевич**,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры 408 «Инфокоммуникации»,
Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)

Официальные оппоненты: - **Горячкин Олег Валериевич**,
доктор технических наук, профессор, проректор
по научной работе,
ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
университет телекоммуникаций и информатики»

- **Ватутин Сергей Иванович**,
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, ведущий научный сотрудник,
АО «Российские космические системы»

Ведущая организация: - ФГБОУ ВО «Московский технический
университет связи и информатики»,
г. Москва, ул. Авиамоторная, д.8а.

Защита диссертации состоится «22» апреля 2025 года в «10:00» на заседании диссертационного совета 24.2.327.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке:

https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=183521

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу:

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, Учёный совет МАИ.

Учёный секретарь
диссертационного совета
24.2.327.01, к.т.н.



А.А. Горбунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

К настоящему времени практически все сферы современного общества тесно связаны с применением радиотехнических систем передачи информации (РСПИ). Многие РСПИ работают в сложной помеховой обстановке при низких отношениях сигнал-шум в канале. Кроме того, текущий уровень развития информационно-телекоммуникационных услуг требует значительного повышения пропускной способности каналов связи. Это, в свою очередь, также требует повышения их уровня устойчивости к помехам различного рода.

В частности, высокие требования по помехоустойчивости предъявляются к системам дальней космической связи, которые должны обеспечивать стабильную связь на удалении в миллионы и миллиарды километров от Земли на протяжении всего срока эксплуатации. В последнее время актуально применение маршевых электрических ракетных двигателей, работа которых основана на ускорении ионизированных частиц рабочего тела в электрических и магнитных полях и сопровождается возникновением помехового излучения в радиодиапазоне со сложной спектрально-временной структурой в полосе частот от сотен мегагерц до десятков гигагерц.

Особый интерес с практической и научной точки зрения представляет направление борьбы с импульсными помехами. Это связано как с их широким распространением, так и с ограниченными возможностями средств их подавления с использованием традиционных методов.

Основными путями повышения помехоустойчивости в случае импульсных помех являются пространственная, временная и амплитудная селекция, фильтрация и методы адаптации и компенсации. В тоже время, необходимо отметить, что многие из используемых методов показывают весьма ограниченную эффективность, поскольку полезный сигнал и помехи могут иметь существенное перекрытие по времени, частоте, пространственному положению источников и т.д.

В связи с этим актуальной научно-технической задачей является разработка и исследование эффективности новых методов повышения помехоустойчивости наземных и космических радиосистем передачи информации в условиях воздействия импульсных помех различной природы, с учётом статистических характеристик передаваемых сигналов и помех.

Одним из перспективных направлений борьбы с импульсными помехами с априорно неизвестными характеристиками является использование методов слепого разделения сигналов

(СРС). Задача методов и алгоритмов слепого разделения сигналов заключается в разделении всех исходных сигналов из входных наблюдаемых сигналов (смесей), причем сами исходные сигналы и модель их смешивания считаются неизвестными на приемной стороне. Под наблюдаемыми сигналами (смесями) в терминологии слепого разделения сигналов понимают несколько сигналов, сложенных между собой с разными весовыми коэффициентами.

Обзор существующих работ по теме диссертации

Вопросам приема радиосигналов в условиях помех посвящены фундаментальные работы таких зарубежных ученых как D. Middleton, A.D. Spaulding, R.T. Disney, S. Miyamoto, M. Katayama и др. Среди отечественных ученых вопросами повышения помехоустойчивости занимались Н.Д. Папалекси, В.И. Тихонов, Р.Л. Стратонович, Д.Д. Кловский, А.Г. Зюко, Л.М. Финк и др. В области борьбы с импульсными помехами большой вклад внесли такие учёные, как А.А. Харкевич, М.В. Максимов, D. Middleton, S. Miyamoto, M. Katayama, N. Morinaga и др.

Первые упоминания методов слепого разделения сигналов (источников) относятся к 1980 годам в работах исследователей J. Herault, C. Jutten и B. Ans. Большой вклад в развитие направления слепой обработки сигналов внесли A.J. Bell и T.J. Sejnowski, A. Belouchrani, P. Common, A. Chichocki и S. Amari, L. Duarte, A. Hyvärinen, E. Oja и P. Pajunen, K. Abed-Meraim, J.F. Cardoso и A. Souchon. Среди отечественных авторов значительный вклад в развитие и практическое применение методов слепого разделения сигналов внесли такие ученые как О.В. Горячкин, С.С. Аджемов, Д.С. Чиров, А.Е. Манохин, В.С. Припутин, А.А. Кучумов, Н.Е. Мирошникова, Н.Ю. Либеровский и др.

Несмотря на обилие теоретических исследований методов СРС в различных направлениях и областях применения, относительно немного работ посвящены непосредственно анализу эффективности и особенностям применения этих методов для борьбы с различного типа импульсными помехами в РСПИ с различными модуляционно-кодowymi схемами.

Цель и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является повышение помехоустойчивости цифровых РСПИ в условиях воздействия квазипериодических импульсных помех различной природы с априорно неизвестными характеристиками и тепловых шумов приёмных трактов.

Для достижения поставленной цели необходимо поэтапное решение следующих научно-технических задач:

1. Анализ существующих методов повышения устойчивости РСПИ к воздействию импульсных помех различного происхождения.

2. Сравнительный анализ применимости отдельных алгоритмов слепого разделения сигналов для борьбы с импульсными помехами в РСПИ.

3. Разработка и верификация функциональной имитационной модели РСПИ для исследования эффективности и ограничений на применение методов и алгоритмов слепого разделения сигналов для борьбы с импульсными помехами, а также анализ полученных результатов имитационного моделирования.

4. Разработка аппаратно-программного комплекса для апробации технической реализации предложенных методов использования алгоритмов слепого разделения сигналов для борьбы с импульсными помехами различной природы.

5. Анализ эффективности использования алгоритмов слепого разделения сигналов в РСПИ по результатам, полученным методами имитационного и натурального моделирования, а также разработка рекомендаций по применению алгоритмов слепого разделения в РСПИ для различных модуляционно-кодовых схем и типов импульсных помех.

Методы исследования основываются на использовании имитационного моделирования в совокупности с математическим аппаратом теории электрической связи, математического анализа, теории вероятностей и математической статистики.

Объектом исследования являются цифровые радиосистемы передачи информации (РСПИ), функционирующие в условиях воздействия импульсных квазипериодических помех различной природы с априорно неизвестными характеристиками и тепловых шумов приёмных трактов.

Предмет исследования – анализ эффективности использования методов слепого разделения сигналов для повышения помехоустойчивости цифровых РСПИ в условиях воздействия квазипериодических импульсных помех различной природы с априорно неизвестными характеристиками и тепловых шумов приёмных трактов.

Научная новизна полученных в работе результатов заключается в следующем:

1. Предложено использование методов слепого разделения сигналов для борьбы с импульсными помехами на фоне тепловых шумов приёмного тракта и определены области эффективного использования этих методов, заключающиеся в необходимости обеспечения

битового отношения сигнал-шум в каналах приёма не менее 6-8 дБ, в зависимости от метода модуляции, и разности отношений помеха-сигнал в каналах приёма от 5 дБ и выше.

2. Получены количественные оценки вероятности битовой ошибки и выигрыша в этой вероятности от использования слепых методов разделения сигналов для борьбы с квазипериодическими гармоническими и шумовыми импульсными помехами в зависимости от отношения сигнал-шум и отношения помеха-сигнал для типовых методов модуляции: ЧМн-2, ФМн-2, ФМн-4, ФМн-8, КАМ-16 и ГММС.

3. Показано, что при указанных в п. 1 условиях выигрыш в вероятности битовой ошибки от использования слепого разделения сигналов (алгоритм SOBI) для модуляции ФМн-2 с импульсной помехи с гармоническим заполнением может составлять 80 и более раз.

4. Показано, что при приёме сигнала ФМн-8 с квазипериодической импульсной шумовой помехой использование слепого разделения сигналов (алгоритм c-FastICA) позволяет при тех же условиях получить выигрыш по вероятности битовой ошибки от 35 раз и выше при битовом отношении сигнал шум 10 дБ и более.

5. Показано, что при модуляции КАМ-16 и квазипериодической импульсной шумовой помехе при битовом отношении сигнал-шум от 12 дБ и выше, различии в отношении помеха-сигнал в каналах приёма от 20 дБ использование алгоритмов слепого разделения сигналов AMUSE, c-FastICA и SOBI обеспечивает выигрыш по вероятности битовой ошибки на 2 порядка и выше в зависимости от отношения сигнал-шум.

6. Показано, что в системах дальней космической связи Земля-КА, реализованных на базе протокола физического уровня, рекомендованного CCSDS, с использованием модуляционно-кодовой схемы на основе ГММС-сигнала благодаря применению методов слепого разделения сигналов (алгоритм SOBI) возможно получение выигрыша по вероятности битовой ошибки по сравнению со случаем, когда слепое разделение сигналов не используется:

– в 20 раз при отсутствии помехоустойчивого кодирования, битовом отношении сигнал-шум 10 дБ и различии отношений помеха-сигнал в каналах приёма 15 дБ;

– около 10 раз при использовании помехоустойчивого кодирования кодом Рида-Соломона (255,223), битовом отношении сигнал-шум 6.6 дБ и различии отношений помеха-сигнал в каналах приёма 25 дБ.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что:

1. Разработанный комплекс математических и имитационных моделей позволяет осуществлять количественную оценку эффективности использования методов слепого разделения сигналов для борьбы с импульсными помехами различной природы на фоне тепловых шумов приёмного тракта, проводить сравнительный анализ различных алгоритмов слепого разделения сигналов и выбор наиболее эффективного алгоритма на начальных этапах проектирования РСПИ.

2. Разработанный аппаратно-программный комплекс позволяет проводить апробацию и отработку технической реализации алгоритмов слепого разделения сигналов на конкретной платформе ПЛИС или СнК, оптимизировать реализацию вычислительных алгоритмов и может быть использован в инженерной практике при проектировании и разработке перспективных радиосистем, использующих методы слепого разделения сигналов.

3. Полученные количественные оценки эффективности использования методов слепого разделения сигналов для борьбы с импульсными помехами различной природы, разработанные рекомендации по применению данных методов борьбы с помехами и выявленные их ограничения позволяют принимать обоснованные технические решения при проектировании, выборе параметров РСПИ и определении области применимости данных методов в конкретных условиях.

4. Предложенные и апробированные алгоритмы практической реализации цифровой обработки принимаемых сигналов, использующие методы слепого разделения сигналов и учитывающие инверсию фазы, необходимость идентификации и выбора базового канала приёма, позволяют повысить помехоустойчивость РСПИ, использующих сигналы с амплитудно-фазовой манипуляцией.

Реализация и внедрение результатов работы

Имитационные модели каналов связи, аппаратно-программный комплекс для исследования методов слепого разделения сигналов и рекомендации по программной реализации алгоритмов слепого разделения сигналов, полученные в результате выполнения диссертационной работы, были внедрены в Филиале АО «Объединённая ракетно-космическая корпорация» — «НИИ КП» при разработке контрольно-поверочной аппаратуры в рамках ОКР «Радиобуи-2025» для исследования применимости методов слепого разделения сигналов при обработке сигналов бедствия систем КОСПАС-САРСАТ в условиях воздействия помех.

Математические модели и программно-алгоритмические средства, разработанные в рамках диссертационной работы, были использованы при выполнении гранта РФФИ № 23-19-00515 «Проведение поисковых научных исследований с целью повышения эффективности систем дальней космической связи с межпланетными космическими аппаратами (КА) с маршевыми электроракетными двигательными установками с использованием сопровождающих КА – ретрансляторов» для анализа эффективности применения методов слепой обработки сигналов при борьбе с влиянием собственного излучения маршевых ЭРДУ на функционирование канала передачи командно-программной информации в радиосистемах дальней космической связи.

Кроме того, основные методические подходы к использованию методов слепого разделения для повышения помехоустойчивости систем связи в условиях воздействия импульсных помех с априорно неизвестными характеристиками, математические и имитационные модели, а также результаты оценки эффективности использования СРС для борьбы с помехами были апробированы и использовались в учебном процессе в рамках дисциплины «Общая теория связи» по направлению 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», профиль «Системы мобильной связи» при чтении пробных лекций и проведении практических занятий.

Внедрение результатов диссертационной работы подтверждается соответствующими актами.

Положения, выносимые на защиту

1. Использование методов слепого разделения сигналов при оценке характеристик помехоустойчивости РСПИ, функционирующих в условиях воздействия импульсных помех различной природы и тепловых шумов в каналах приёма, при выполнении разработанных в диссертации рекомендаций обеспечивает выигрыш в вероятности битовой ошибки от нескольких раз до 100 и более раз в зависимости от используемого метода модуляции, параметров помехи, алгоритма обработки, текущих значений битового отношения сигнал-шум и отношения помеха-сигнал.

2. Разработанные в диссертации условия эффективного использования методов слепого разделения сигналов для борьбы с импульсными помехами заключаются в необходимости: обеспечения битового отношения сигнал-шум в каналах приёма не менее 6-8 дБ, зависящего от метода модуляции; разности отношений помеха-сигнал в каналах приёма от 5 дБ и выше; принятия мер по нивелированию возможной инверсии фазы сигнала, характерной для слепых методов разделения, и выбору предпочтительного выходного канала.

3. Разработанный комплекс математических и имитационных моделей позволяет осуществлять количественную оценку выигрыша по вероятности битовой ошибки от использования методов слепого разделения сигналов, проводить сравнительный анализ различных алгоритмов реализации этих методов и обоснование выбора алгоритма, наиболее эффективного для рассматриваемого типа РСПИ.

4. Аппаратно-программный комплекс, разработанный в диссертации, позволяет проводить апробацию и отработку технической реализации алгоритмов слепого разделения сигналов на конкретной платформе ПЛИС или СнК, оптимизировать реализацию вычислительных алгоритмов и может быть использован в инженерной практике при проектировании и разработке перспективных радиосистем, использующих методы слепого разделения сигналов.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов работы обеспечивается корректным использованием методов теории вероятностей и математической статистики; строгим использованием математического аппарата для всех полученных научных результатов, соответствием в определенных случаях полученных результатов результатам других авторов, опубликованным в отечественной и зарубежной литературе; калибровкой и верификацией имитационных моделей, соответствием результатов, полученных в ходе имитационного моделирования, в частных случаях с известными теоретическими результатами.

Результаты исследований докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на 12 научно-технических конференциях, в том числе международных:

– международная научная конференция Systems of signals generating and processing in the field of on-board communications (г. Москва, МТУСИ, 2021 г.);

– 44-я, 46-я, 47-я, 49-я и 50-я международные молодежные технические конференции «Гагаринские чтения» (г. Москва, МАИ, 2018, 2020, 2021, 2023, 2024 гг.);

– 19-я, 21-я и 22-я международные конференции «Авиация и космонавтика» (г. Москва, МАИ, 2020, 2022, 2023 гг.);

– XIII Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах» (г. Волгоград, ВолГУ, 2023 г.);

– XXV международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» ПТиТТ-2023 (г. Казань, КАИ, 2023 г.);

– пятая международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных средств передачи информации «Шарыгинские чтения» (г. Томск, ТУСУР, 2023 г.).

Публикации по теме диссертации

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 21 работе, из них 6 статей, в том числе 5 статей в изданиях из списка ВАК Минобрнауки России, 3 работы опубликованы в журналах, индексируемых международной базой Scopus, сделано 14 докладов на 12 международных и всероссийских конференциях, 9 работ опубликовано без соавторов, получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад автора

Работа является результатом исследований, проводимых автором лично. Им лично разработаны методики, математические и имитационные модели каналов связи, аппаратно-программный комплекс для исследования эффективности использования слепых методов разделения сигналов с реальными характеристиками, получены и проанализированы количественные оценки эффективности использования методов слепого разделения сигналов для борьбы с импульсными помехами различной природы для различных методов модуляции, значений отношения сигнал-шум и помеха-сигнал, в том числе и при воздействии радиоизлучения СПД. В публикациях, выполненных в соавторстве, вклад автора заключался в разработке и верификации имитационных моделей и аппаратно-программного комплекса для исследования методов СРС, а также в анализе полученных результатов и подготовке выводов и рекомендаций по результатам исследования.

Объем и структура работы

Диссертационная работа имеет объем в 141 машинописную страницу, состоит из введения, 6 глав, заключения и списка литературы. Иллюстративный материал состоит из 57 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 100 наименований.

Соответствие работы паспорту специальности

Работа соответствует паспорту специальности 2.2.13 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения», пункт 6 «Разработка и исследование методов и алгоритмов обработки сигналов и информации в радиотехнических устройствах и системах различного назначения, включая системы телевидения и передачи информации, при наличии помех с целью повышения помехоустойчивости, пункт 8 «Разработка и исследование радиотехнических устройств и систем передачи информации, в том числе эфирных, радиорелейных и космических, с целью повышения их пропускной способности, помехоустойчивости и помехозащищенности.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена и обоснована актуальность тематики диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи исследования, приведена научная новизна полученных результатов, а также практическая значимость работы. Описана методология, используемая в диссертационном исследовании. Сформулированы положения, выносимые на защиту, аргументирована степень достоверности, приведены данные об апробации результатов, описана структура работы.

В **первой главе** проведен анализ публикаций по СРС, импульсным помехам, способам борьбы с ними и обоснован выбор направления диссертационного исследования. Определена актуальность выбранной тематики и её практическая ценность, сформулированы решаемые задачи. Приводится описание ряда типовых импульсных помех, ухудшающих качество приема сигналов в РСПИ, например, импульсных квазипериодических гармонических и шумоподобных помех и, в частности, приводится описание импульсной шумоподобной помехи, связанной с работой стационарных плазменных двигателей, и ее воздействие на качество прием данных от земной станции. Описаны основные пути повышения устойчивости РСПИ к воздействию импульсных помех в канале связи.

Основные результаты первой главы нашли отражение в работах [10], [11].

Во **второй главе** представлена математическая постановка задачи слепого разделения сигналов, описан метод анализа независимых компонент и его ограничения, а также рассмотрены наиболее популярные алгоритмы СРС, основанные на данном методе. Приведены математические модели сигналов и помех, используемые в работе, а также представлена блок-схема разработанной имитационной модели для исследования эффективности использования методов слепого разделения сигналов и описаны основные ее функциональные элементы.

Математическую постановку задачи слепого разделения сигналов применительно к дискретным системам можно описать следующим матричным выражением:

$$\mathbf{X} = \mathbf{H} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{U}, \quad (1)$$

где $\mathbf{X} \in R^{M \times T}$, $\mathbf{H} \in R^{M \times N}$, $\mathbf{S} \in R^{N \times T}$, $\mathbf{U} \in R^{M \times T}$ и \mathbf{X} – матрица наблюдаемых смесей, \mathbf{S} – матрица исходных сигналов, \mathbf{H} – невырожденная матрица смешивания, \mathbf{U} – матрица шумов, N – количество исходных сигналов, M – количество наблюдаемых смесей, T – длина реализаций сигналов и шумов.

Термин слепое разделение сигналов означает, что не требуется никакой предварительной информации об исходных сигналах \mathbf{S} и процедуре смешивания \mathbf{H} .

Задачей СРС является поиск такой матрицы разделения \mathbf{W} ($N \times M$), которая обеспечивает оптимальное значение целевой функции (функции потерь или стоимости) $\psi(\mathbf{W}\mathbf{X})$. Когда это достигается, разделённые исходные сигналы могут быть определены как:

$$\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{W}\mathbf{X}, \quad (2)$$

где $\tilde{\mathbf{S}} \in R^{N \times T}$ – оценка разделённых сигналов.

Описан метод анализа независимых компонент и проанализированы ограничения на его применение. Также приводится описание наиболее популярных алгоритмов, основанных на данном методе: JADE, Infomax, FastICA (и его модификации), SOBI и AMUSE. Приводится описание основных видов целевых функций и методов оптимизации. Проводится сравнительный анализ эффективности указанных алгоритмов слепого разделения для типовых сигналов.

На рис.1 приведена блок-схема имитационной модели для исследования методов слепого разделения сигналов.

Пояснения к рис. 1: блоки «ГС», «ГП» и «ГШ» – генераторы сигнала, помехи и шума; блоки «М» и «ДМ» – модулятор и демодулятор; «БВС» – блок весового суммирования; «СРС» – блок слепого разделения сигналов; «И» – блок идентификации (оценки) полезного сигнала из принятых входных смесей. «О» – блок сравнения и оценки вероятности битовой ошибки.

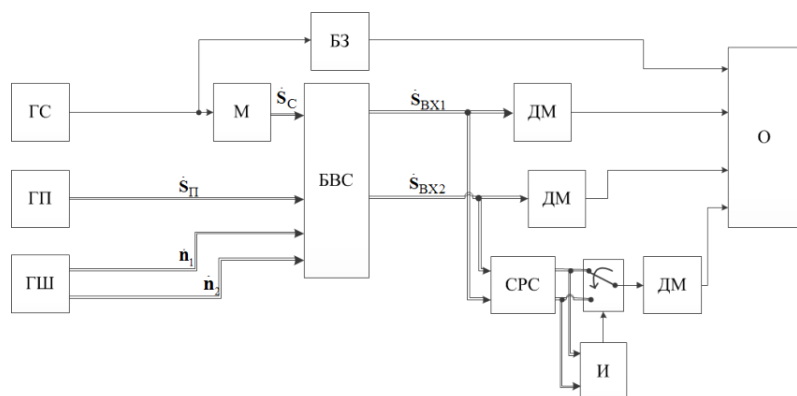


Рис.1 Блок-схема разработанной имитационной модели

Блок весового суммирования осуществляет формирование двух смесей из полезного сигнала, помехи и тепловых шумов приемника. Входные параметры величин битового отношения сигнал-шум и помеха-сигнал в каждой из смесей определяют величины весовых коэффициентов при сигнале, помехах и шумах. Каждая из сформированных смесей поступает на соответствующий ей демодулятор, а также на вход блока слепого разделения сигналов. Поскольку задача идентификации полезного сигнала из принятых смесей не осуществляется алгоритмами СРС, на выходе подключен блок идентификации, который определяет полезный сигнал и передает его на демодулятор. Далее, в блоке сравнения и оценки вероятности битовой ошибки осуществляет сравнение демодулированных бит на выходе всех трех демодуляторов с

исходной битовой последовательностью. Оценивается вероятность битовой ошибки для случаев с использованием СРС и без него.

На рис. 2 приведены примеры эпюр сигналов в различных точках блок-схемы, полученные в результате имитационного моделирования. Сверху вниз: нормированная амплитудная огибающая синфазной компоненты сигнала КАМ-16 на выходе модулятора; нормированная амплитудная огибающая синфазной компоненты смеси сигнала

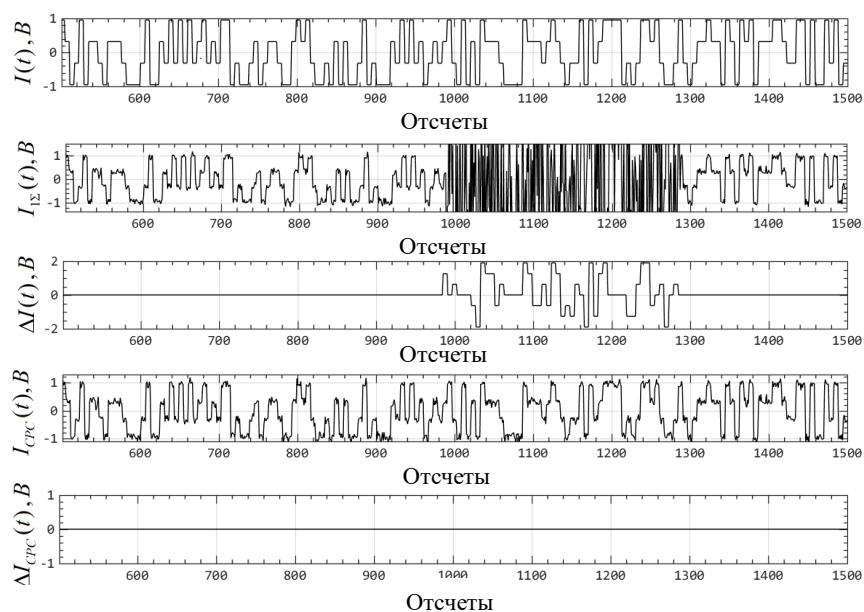


Рис. 2 Эпюры сигналов при имитационном моделировании

КАМ-16, импульсной шумовой помехи и АБГШ; разность переданной и принятой последовательностей символов без слепой обработки; амплитудная огибающая синфазной компоненты смеси выделенного сигнала КАМ-16 на выходе блока слепого разделения сигналов; разность переданной и принятой последовательностей символов после слепой обработки.

Разработанная имитационная модель позволяет проводить исследование для различных методов модуляции: частотной, фазовой манипуляции различной позиционности, квадратурной амплитудной модуляции и гауссовой манипуляции с минимальным сдвигом.

В главе также рассмотрены математические модели импульсных помех, используемых в работе, таких как гармоническая, шумовая и структурно-подобная, а также помеха от СПД, которая представляет собой электромагнитное излучение широкого диапазона частот: от сотен Гц до десятков ГГц с довольно сложной частотно-временной структурой. На рис. 3 приведены примеры эпюр излучения СПД-100-2, полученные экспериментально для различных величинах напряжения разряда (U_p) в диапазоне от 300 В до 800 В с шагом изменения 100 В. Эпюры получены в результате экспериментальных измерений характеристик радиоизлучения СПД, помещенного в радиопрозрачный вакуумный отсек, интегрированный в типовую безэховую камеру. Данные измерения проводились для диапазона частот 7 ГГц в полосе 140 МГц.

Приведено описание и сравнительный анализ различных феноменологических моделей формирования импульсного помехового излучения от СПД для целей имитационного моделирования. В имитационной модели были реализованы следующие варианты формирования импульсной помехи от СПД:

1. Применение реализаций реального излучения от СПД, полученных экспериментально.
2. Применение модели импульсного помехового излучения СПД на основе модифицированной модели Холла.
3. Применение упрощенной модели Холла для импульсного помехового излучения.

Применение в модели реализаций, полученных в результате эксперимента приоритетно, но ограничивается конечным объемом имеющихся выборок, а также невозможностью изменять параметры скважности.

В работе используется модель импульсного помехового излучения СПД на основе модифицированной модели Холла. Она обеспечивает схожие характеристики с реальными помехами от СПД и позволяет задавать различные параметры средней скважности помехи, однако ее использование связано с большим объемом вычислительных затрат при формировании реализаций помехового излучения.

На основе вышеупомянутой модифицированной модели Холла предложена упрощенная модель импульсной помехи, которая представляет собой последовательность квазипериодических шумоподобных импульсов, которые имеют нормальный закон распределения. Скважность данного процесса задается параметром в имитационной модели. Данная модель значительно проще в реализации с точки зрения используемых вычислительных ресурсов. Результаты моделирования показали, что она обеспечивает отличие от результатов, полученных для экспериментальных данных, не более чем 5% для доверительной вероятности $Q = 0,95$.

Основные результаты второй главы нашли отражение в работах [8], [12], [15].

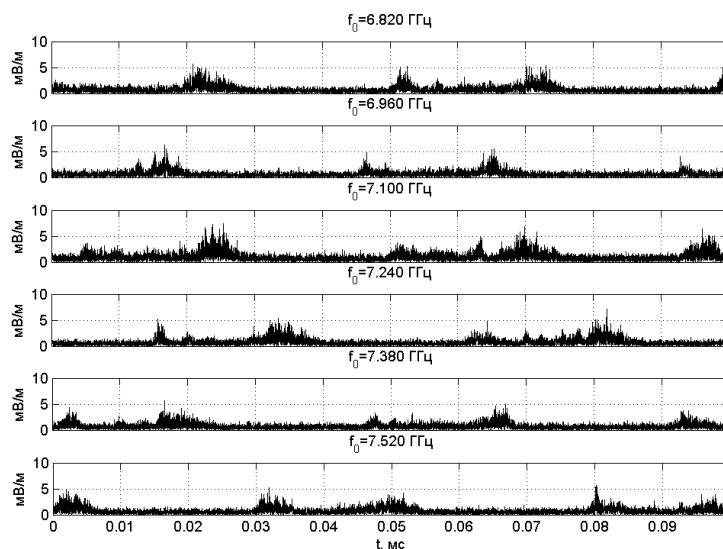


Рис. 3 Эпюры амплитудной огибающей излучения СПД-100-2 при величине напряжения разряда $U_p = 800$ В, полученные в полосе 160 МГц

В третьей главе представлен анализ полученных результатов имитационного моделирования для сигналов с модуляцией ЧМн-М, ФМн-М при воздействии импульсной помехи с гармоническим заполнением. В качестве алгоритма слепого разделения сигналов при моделировании был рассмотрен алгоритм SOBI. Был подтверждён эффект, связанный с возможностью инверсии фазы разделенного сигнала на выходе

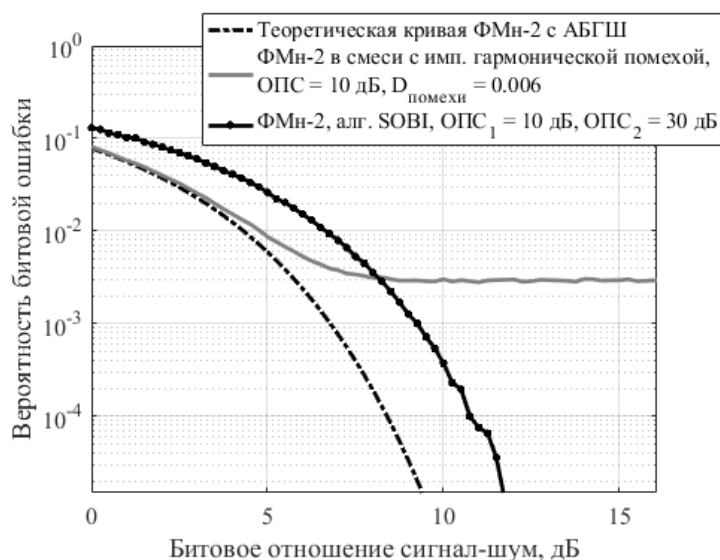


Рис. 4

алгоритмов СРС, и предложен алгоритм по его устранению. Получены численные значения выигрыша по вероятности битовой ошибки относительно случая демодуляции без слепого разделения сигналов. На рис.4 приведен пример зависимости вероятности битовой ошибки от величины битового отношения сигнал-шум, полученной в результате имитационного моделирования для канала с ФМн-2, импульсной помехой с коэффициентом заполнения 0,006 и АБГШ. Из графика видно, что при величинах битового отношения сигнал-шум более 7 дБ наблюдается выигрыш от использования СРС. Так, например, при битовом отношении сигнал-шум $E_b / N_0 = 10$ дБ, вероятность битовой ошибки при демодуляции смесей без слепого разделения составляет $2,96 \cdot 10^{-3}$. При демодуляции сигнала с использованием СРС вероятность битовой ошибки составляет $3,76 \cdot 10^{-4}$. Выигрыш по вероятности битовой ошибки в этом случае составляет 7,9 раз. Аналогичные исследования были проведены для сигналов ЧМн-М. Показано, что величина битового отношения сигнал-шум, при которой будет наблюдаться выигрыш от применения алгоритмов СРС в основном зависит от таких параметров как коэффициент заполнения импульсной помехи, уровни сигналов и помех в принятых смесях, а также от характеристик полезного сигнала и импульсной помехи. При этом, выигрыш по величине вероятности битовой ошибки от использования СРС может достигать 50 и более раз в зависимости от величин битового отношения сигнал-шум и отношения помеха-сигнал.

Основные результаты третьей главы нашли отражение в работах автора [10], [14].

В четвертой главе представлены результаты имитационного моделирования алгоритмов SOBI, AMUSE и c-FastICA для повышения помехоустойчивости каналов связи с ЧМН-М, ФМН-М, КАМ-М при воздействии импульсных шумовых помех и тепловых шумов приемника. Проведен анализ полученных результатов и построены графики зависимости выигрыша по вероятности битовой ошибки в зависимости от отношения сигнал-шум и помеха-сигнал, а также приведен анализ влияния отношения помеха-сигнал в каналах на качество слепого

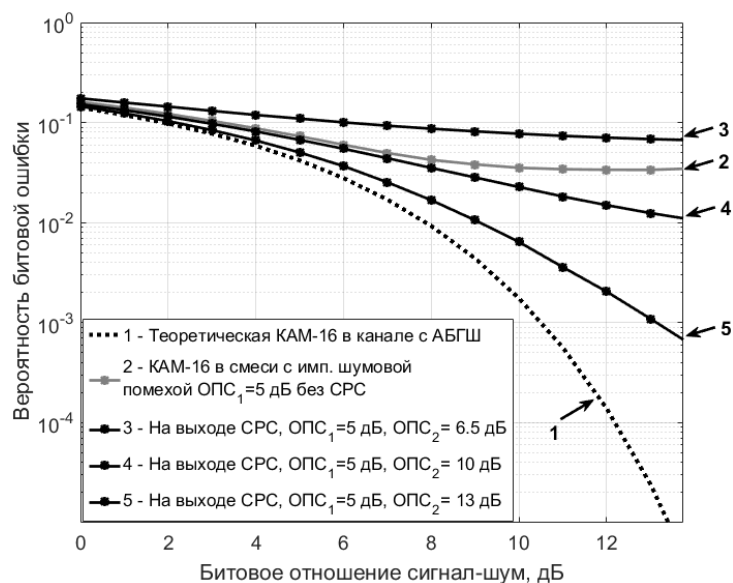


Рис. 5

разделения сигналов. На рис. 5 представлен пример зависимости вероятности битовой ошибки от величины отношения сигнал-шум в каналах с КАМ-16 при воздействии АБГШ и импульсной шумовой помехи с коэффициентом заполнения 0,07 при разных значениях отношения помеха-сигнал и отношения сигнал-шум в каналах при применении алгоритма СРС SOBI. Из графика видно, что чем меньше величина различия между величинами отношения помеха-сигнал в каналах приёма, тем большее значение битового отношения сигнал-шум требуется для получения преимущества от использования слепого разделения сигналов относительно случая демодуляции принятых смесей без СРС. Так, например в результате демодуляции смесей на выходе СРС SOBI с ОПС1= 5 дБ и ОПС2 = 10 дБ при $E_b / N_0 = 12$ дБ, вероятность битовой ошибки с использованием СРС составляет 0,015 (кривая 4), выигрыш по битовой ошибке относительно случая демодуляции принятых смесей с импульсной помехой без слепого разделения (кривая 2) составляет 2,4 раза. При ОПС1 = 5 дБ и ОПС2 = 13 дБ (кривая 5) выигрыш по битовой ошибке от применения СРС еще более заметен: при $E_b / N_0 = 12$ дБ, вероятность битовой ошибки равна $2,04 \cdot 10^{-3}$, что в 17,2 раза меньше, чем без слепого разделения (кривая 2).

Основные результаты четвертой главы нашли отражение в работах [7], [14-16].

Пятая глава посвящена вопросам применения методов слепого разделения для борьбы с импульсным помеховым излучением стационарных плазменных двигателей. Описана математическая постановка задачи, проведен анализ результатов имитационного моделирования функционирования РСПИ в условиях совместного воздействия помехового излучения СПД и тепловых шумов в каналах приема, сформулированы рекомендации по применению алгоритмов слепого разделения для борьбы с импульсными помехами от стационарных плазменных двигателей. На рис.6 приведен пример графиков зависимости вероятности битовой ошибки от величины битового отношения сигнал-шум при различных величинах отношения помеха-сигнал в каналах при демодуляции сигнала ГММС после слепого разделения из входных смесей с импульсной шумовой помехой с коэффициентом заполнения 0,05.

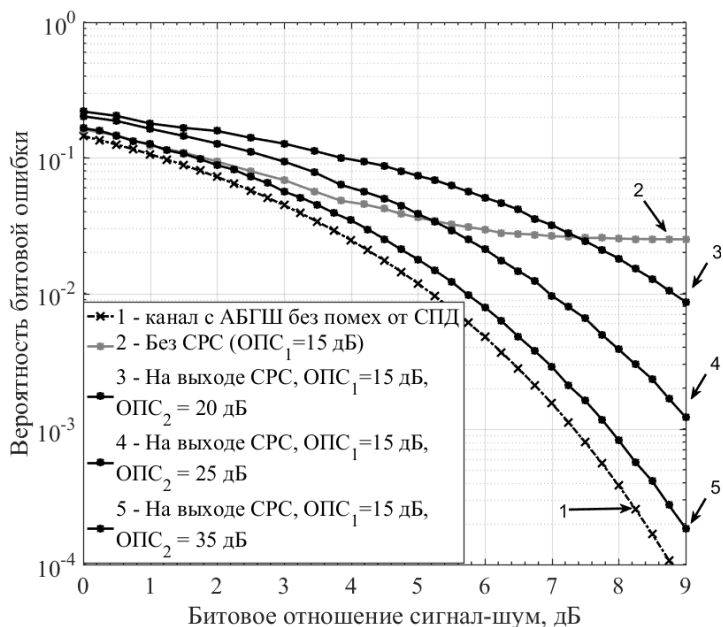


Рис. 6

Видно, что при уменьшении различия отношений помеха-сигнал в первом и во втором каналах приёма, выигрыш от применения слепого разделения достигается при больших величинах битового отношения сигнал-шум: например, при отношении помеха-сигнал в первом канале 15 дБ и 25 дБ во втором, выигрыш от применения СРС наблюдается при битовом ОСШ равном 5,4 дБ и более, в то время как при, отношении помеха-сигнал в первом канале 15 дБ и 20 дБ выигрыш наблюдается при битовом ОСШ равном 7,4 дБ и более.

Основные результаты данной главы нашли отражение в [3-5], [8], [19-21].

В шестой главе приведены результаты разработки и верификации аппаратно-программного комплекса для исследования методов слепого разделения сигналов в радиосистемах. Приводится постановка задачи и требования к разрабатываемому аппаратно-программному комплексу, а также результаты верификации и работы аппаратно-программного тестового комплекса и сравнение с результатами имитационного моделирования.

На рис. 7 приведена обобщенная блок-схема разработанного аппаратно-программного комплекса, пояснены основные функциональные блоки. Аппаратно-программный комплекс реализован на основе многоканального приемника на отладочной плате (см. рис. 8) с ПЛИС Artix A200T от AMD/Xilinx с применением технологии программно-определяемого радио. Измерения проводились в сертифицированной безэховой камере.

С использованием разработанного аппаратно-программного комплекса были исследованы зависимости вероятности битовых ошибок при различных отношениях сигнал-шум и помеха-сигнал в каналах приема. Рассматривались импульсные помехи с различными характеристиками, например, такие как: импульсные шумовые помехи, помехи с линейно-частотной модуляцией, помехи структурно подобные полезному сигналу и т.п.

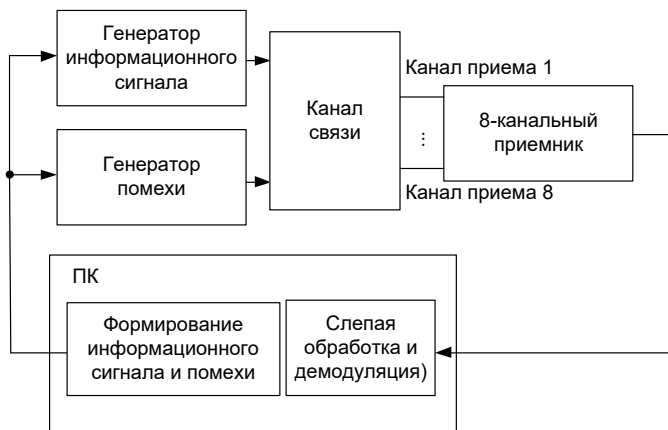


Рис. 7 Обобщенная блок-схема аппаратно-программного комплекса

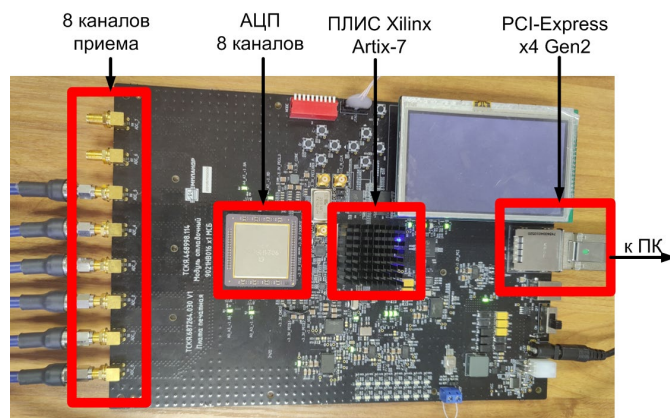


Рис. 8 Отладочная плата с АЦП, ПЛИС и PCI-Express, используемая для сбора данных в аппаратно-программном комплексе

На рис. 9 приведен пример сравнения результатов работы имитационной модели с аналогичными результатами, полученными при использовании аппаратно-программного комплекса. В качестве полезного сигнала использовался сигнал ФМн-4. В качестве помехи - импульсная шумовая помеха с коэффициентом заполнения 0,0075. Отношения помеха-сигнал в каналах приёма равны 10 дБ и 17 дБ соответственно.

Стрелками «4» и «5» на рис.9 обозначены результаты, полученные с использованием аппаратно-программного комплекса для величин битового отношения сигнал-шум в каналах 9 дБ, 11 дБ и 13,25 дБ, для случаев, когда СРС не использовалось («4»), и когда использовался алгоритм СРС SOBI («5»). Значения вероятностей битовой ошибки, полученные с использованием аппаратно-программного комплекса

отличаются от результатов имитационного моделирования не более чем на 15%, что может быть связано, например, с не идеальностью реализации систем синхронизации в цифровом

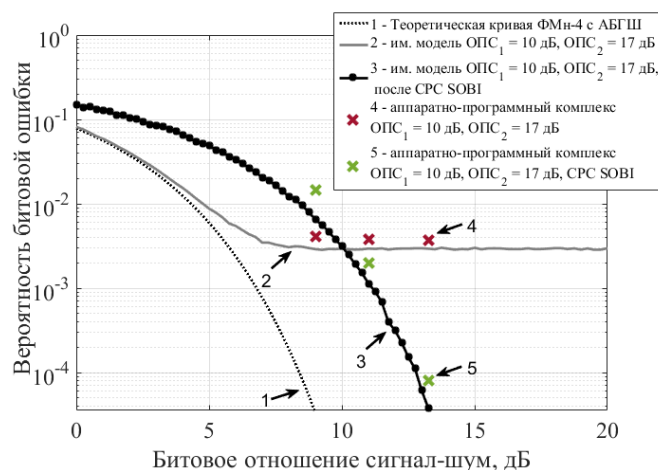


Рис. 9 Сравнение результатов имитационного моделирования с результатами, полученными на аппаратно-программном комплексе

приемнике. В целом результаты, полученные с использованием программного комплекса, подтверждают результаты, полученные с использованием имитационного моделирования на ЭВМ.

В работе дана оценка требований к вычислительной производительности аппаратно-программных средств, использующих алгоритмы слепого разделения сигналов и сформулированы рекомендации по их реализации на рассмотренной технической платформе.

Основные результаты шестой главы нашли отражение в [2], [9], [10], [17], [18].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа посвящена вопросам исследования эффективности и области применения алгоритмов слепого разделения сигналов применительно к каналам связи с разнесенным приемом при воздействии импульсных помех различного типа. Основные полученные результаты заключаются в следующем:

1. Для анализа эффективности использования алгоритмов слепого разделения сигналов в радиосистемах передачи информации при борьбе с импульсными помехами различного типа был разработан и апробирован комплекс математических и имитационных моделей, который позволяет осуществлять количественную оценку эффективности использования методов слепого разделения сигналов, проводить анализ и сравнение различных алгоритмов слепого разделения сигналов и на этой основе осуществлять выбор наиболее эффективного алгоритма применительно к рассматриваемому типу РСПИ.

2. Разработан аппаратно-программный комплекс, позволяющий проводить апробацию и отработку технической реализации алгоритмов слепого разделения сигналов на конкретной платформе ПЛИС или СнК, оптимизировать реализацию вычислительных алгоритмов и может быть использован в инженерной практике при проектировании и разработке перспективных радиосистем, использующих методы слепого разделения сигналов.

3. С использованием разработанных инструментальных средств получены количественные оценки эффективности использования методов слепого разделения сигналов для борьбы с импульсными помехами различного типа в каналах связи с методами модуляции ЧМн-2, ФМн-2, ФМн-4, ФМн-8, КАМ-16 и ГММС, разработаны рекомендации по применению данных методов борьбы с помехами и выявлены их ограничения, что позволяет принимать обоснованные технические решения при проектировании, выборе параметров РСПИ и определении области применимости данных методов в конкретных условиях.

4. Показано, что при выполнении разработанных рекомендаций использование методов слепого разделения сигналов для борьбы с импульсными помехами различного типа на фоне тепловых шумов в каналах приёма может обеспечить выигрыш по битовой ошибке от

нескольких раз до 100 и более раз в зависимости от используемого метода модуляции, параметров помехи, алгоритма СРС, текущих значений битового отношения сигнал-шум и отношения помеха-сигнал.

5. Предложены и апробированы алгоритмы практической реализации цифровой обработки принимаемых сигналов, использующие методы слепого разделения сигналов и учитывающие инверсию фазы, необходимость идентификации и выбора базового канала приёма, позволяющие повысить помехоустойчивость РСПИ с амплитудно-фазовой и частотной манипуляцией в условиях совместного воздействия квазипериодических импульсных помех различного типа и тепловых шумов приёмных трактов.

СПИСОК РАБОТ ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России

1. Тяпкин П.С., Важенин Н.А. Повышение помехоустойчивости систем связи в условиях импульсных квазигармонических помех с использованием слепых методов обработки сигналов // Труды МАИ. – 2023. – № 128.

2. Тяпкин П.С. Аппаратно-программный комплекс для отработки методов слепой обработки сигналов в радиосистемах // Труды МАИ. – 2023. – № 129. – С. 7-12.

3. Tyapkin P. S., Vazhenin N. A., Plokhikh A. P. Application of Blind Signal Separation Methods in the Problems on Improving the Interference Immunity of Space Communication Systems with Quadrature Amplitude Modulation // Russian Aeronautics. – 2023. – Т. 66. – №. 3. – С. 615-624. (Scopus) (русская версия опубликована в Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2023 г., № 3. – С. 175-183)

4. Тяпкин П.С., Важенин Н.А., Плохих А.П. Анализ эффективности использования методов слепого разделения сигналов для борьбы с помеховым излучением электрических ракетных двигателей в системах космической связи // Доклады ТУСУР. – 2023. – Т. 26. – № 4. – С. 7-12.

5. Tyapkin P. S., Vazhenin N. A., Plokhikh A. P. Improvement of Interference Immunity of Deep Space Communication Systems Exposed to Interference from Stationary Plasma Thrusters // Russian Aeronautics. – 2024. – Т. 67. – №. 2. – С. 427-439. (Scopus) (русская версия опубликована в Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2024. - №3. – С.185-196)

Публикации, индексируемые в Scopus и Web of Science

6. Tyapkin P.S., Vazhenin N.A. Applying Blind Signal Processing Methods in Data-Transmission Systems // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9416105>

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

7. Тяпкин П.С., Важенин Н.А. Имитационная модель канала связи с квадратурной амплитудной модуляцией для исследования методов слепого разделения сигналов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2023685739 от 29 ноября 2023 г.

8. Тяпкин П.С., Важенин Н.А. Имитационная модель для исследования эффективности использования методов слепого разделения сигналов в радиосистемах дальней космической связи // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2024619053 от 18 апреля 2024 г.

Публикации в докладах конференций

9. Тяпкин П. С. Проектирование перепрограммируемого SDR-приемника на ПЛИС с использованием методов МОП и автоматической генерации кода // XLIV Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2018». – С. 222-223.

10. Тяпкин П.С. Анализ методов слепой обработки сигналов в задачах повышения помехоустойчивости радиомодемов // XLVI Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2020». – МАИ, г. Москва: МАИ, 2020. – С. 614.

11. Тяпкин П.С. Анализ характеристик выделения сигналов на фоне аддитивных помех с применением алгоритмов JADE и FastICA при наличии априорной неопределенности относительно параметров сигнала // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». – МАИ, г. Москва: Издательство «Перо» (Москва), 2020. – С. 360-361.

12. Тяпкин П.С. Особенности реализации и ограничения применения алгоритмов слепого разделения сигналов в системах передачи информации // XLVII Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2021». – МАИ, г. Москва: Издательство «Перо», 2021. – С. 561.

13. Тяпкин П.С. Многоканальный цифровой приемник для исследования алгоритмов слепой обработки сигналов // 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». – МАИ, г. Москва: Издательство «Перо», 2022. – С. 315-316.

14. Тяпкин П.С. Применение методов слепого разделения сигналов для борьбы с помехами в радиосистемах передачи информации // XLIX Международная молодёжная научная

конференция «Гагаринские чтения – 2023». – МАИ, г. Москва: Издательство «Перо», 2023. – С. 256.

15. Тяпкин П.С., Важенин Н.А. Моделирование канала связи с многопозиционной частотной модуляцией в рамках исследования методов слепого разделения сигналов // XIII Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах». – ВолГУ, г. Волгоград: Волгоградский государственный университет, 2023. – С. 24-26.

16. Тяпкин П.С. Использование алгоритмов слепого разделения сигналов при приеме сигналов с QAM модуляцией в условиях помех // XLIX Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2023». – МАИ, г. Москва: Издательство «Перо», 2023. – С. 390-391.

17. Тяпкин П.С. Аппаратная реализация алгоритма слепого разделения сигналов на основе «системы на кристалле» при разнесённом приеме сигналов // 22-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». – МАИ, г. Москва: Издательство «Перо», 2023. – С. 199.

18. Тяпкин П.С., Усс Е.С. Анализ методов автоматической генерации кода для повышения эффективности реализации цифровых алгоритмов обработки сигналов на ПЛИС // XLIX Международная молодёжная научная конференция «Авиация и космонавтика». – МАИ, г. Москва: Издательство «Перо», 2023. – С. 198-199.

19. Тяпкин П.С., Важенин Н.А., Плохих А.П. Анализ эффективности использования методов слепого разделения сигналов для борьбы с помеховым излучением электрических ракетных двигателей в системах космической связи // Пятая международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных средств передачи информации «Шарыгинские чтения». – ТУСУР, г. Томск: Издательство ТУСУР, 2023. – С. 77-80.

20. Тяпкин П.С., Важенин Н.А., Плохих А.П. Особенности использования алгоритмов слепого разделения сигналов для повышения помехоустойчивости систем космической связи // XXV Международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» ПТиТТ-2023. – КАИ, г. Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2023. – Т. 1. – С. 194-196.

21. Тяпкин П.С. Исследование помехоустойчивости приемников дальней космической связи с ГММС при воздействии помех от стационарных плазменных двигателей с применением методов слепого разделения сигналов // 50-я Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения». – МАИ, г. Москва: Издательство «Перо», 2024.