

На правах рукописи



ЖЕГЛОВ КИРИЛЛ ДМИТРИЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ СВОЕВРЕМЕННОСТИ И ДОСТОВЕРНОСТИ
ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ В СЕТЯХ РАДИОСВЯЗИ
ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА**

Специальность 2.2.15 –
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Тюриков Андрей Михайлович

Официальные оппоненты:

Ходаковский Валентин Аветикович
 доктор технических наук, профессор,
 ФГБОУ ВО «Петербургский государственный
 университет путей сообщения Императора
 Александра I», кафедра информатики и
 информационной безопасности,
 профессор кафедры

Лукин Константин Игоревич
 кандидат технических наук, доцент,
 АО «Супертел», генеральный директор

Ведущая организация:

Акционерное общество «Российский институт
 мощного радиоостроения», 199178, г. Санкт-
 Петербург, 11-я Линия В.О., 66

Защита состоится « 03 » марта 2026 года в 14 ч 00 мин на заседании диссертационного совета 24.2.384.01 Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по адресу: 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения». по адресу: Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит.А. и на сайте <https://guap.ru>.

Автореферат разослан « 22 » января 2026 года.

Ученый секретарь
 диссертационного совета 24.2.384.01
 кандидат технических наук, доцент

А.М. Сергеев

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Системы радиосвязи декаметрового диапазона (ДМД) широко используются в авиации, на флоте и МЧС для передачи сообщений на большие расстояния в аварийных ситуациях при организации экстренных каналов связи. Как правило, передают голосовые сообщения и иногда телеграфные сообщения на скоростях до 200 Бод.

При экстренной передаче сообщений об аварийных ситуациях принципиально важно обеспечить возможность приема на обычные бытовые радиоприёмники, включая старые модели. Для приема голосовых сообщений достаточно наличия типового радиоприемника. Для приема дискретных сообщений кроме типового приемника используется типовой персональный компьютер, оснащенный звуковой платой. Типовой приемник осуществляет прием дискретного сигнала и перенос его спектра в звуковой диапазон частот для аналого-цифрового преобразования и ввода в персональный компьютер. Собственно демодуляция дискретного сигнала и его отображение в виде текста осуществляется программными методами в персональном компьютере. При этом используемый метод модуляции должен допускать программную демодуляцию в реальном масштабе времени. Исходя из вышеизложенного, наиболее предпочтительным, а иногда единственно технически возможным методом модуляции в рассматриваемых случаях, является амплитудная модуляция (АМ).

Широко используемым форматом АМ является однополосная амплитудная модуляция (ОМ), предполагающая передачу только одной боковой полосы спектра (верхней или нижней) при частично или полностью подавленной несущей частоте для экономии спектра частот.

В ряде ситуаций в диапазоне декаметровой связи может возникать незадействованный частотный ресурс, который может быть использован для повышения помехоустойчивости передачи экстренных сообщений с целью повышения их достоверности и своевременности.

Перспективным подходом к использованию свободных участков спектра, выделенных по регламенту, но фактически не задействованных, может стать поочередная передача сигнала в верхней и в нижней боковых полосах, что можно рассматривать, как частотное разнесение. Используя данный способ, можно формировать сигнальные конструкции в виде частотно-временных матриц, которые позволяют повысить помехоустойчивость приема на типовые радиоприемники сигналов с амплитудной модуляцией.

Тема диссертационной работы, посвященной разработке новых научно-технических решений (НТР), направленных на повышение достоверности и своевременности приема, в том числе экстренных сообщений в сетях радиосвязи ДМД является **актуальной и значимой**.

Проведенный анализ широко известных и доступных методов (способов) приема, реализованных в современных средствах и комплексах радиосвязи, используемых в СРС ДМД, показал, что они не в полной мере удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям по достоверности и своевременности.

В результате возникает объективное противоречие, обусловленное необходимостью достоверной и своевременной передачи сообщений в сетях

радиосвязи ДМД в условиях насыщенной сигнально-помеховой обстановки и несоответствием известного и доступного научно-методического аппарата (НМА), обеспечивающего решения данной задачи при организации экстренных каналов связи.

Научной задачей является повышение достоверности приема и своевременности передачи сообщений в сетях радиосвязи ДМД.

В качестве **объекта исследования** были определены сети радиосвязи ДМД.

А в качестве **предмета исследования** — методы и способы, обеспечивающие повышение достоверности приема и своевременности передачи сообщений в сетях радиосвязи ДМД за счет управления их частотным ресурсом и применения сигналов с повышенной энергоэффективностью.

Целью работы является разрешение противоречия между необходимостью повышения достоверности и своевременности передачи сообщений в сетях радиосвязи ДМД и ограничением - сохранением существующего парка приёмных устройств, включая бытовые радиоприёмники, а также необходимостью обеспечения надежной связи в аварийных условиях.

В интересах достижения цели научного исследования были поставлены следующие **частные задачи**:

1. Разработка способа повышения помехоустойчивости в сетях ДМД на основе уже используемых классов излучений.
2. Модификация метода повышения информационной скорости передачи сообщений в режимах с программной перестройкой рабочей частоты радиосвязи ДМД
3. Разработка способа повышения скорости системы передачи на основе уже используемых в ДМД классов излучений в условиях наличия избыточного частотного ресурса.

Научные положения, выносимые на публичную защиту:

1. Математическая модель сигналов однополосной модуляции с управляемым уровнем несущего колебания, позволяющая повысить достоверность приема в сетях радиосвязи ДМД в условиях воздействия внешних и внутренних помех.
2. Метод управления частотным ресурсом радиолиний в сетях радиосвязи ДМД, позволяющий обеспечить повышение своевременности передачи сообщений в режиме программной перестройки рабочей частоты, при котором пригодность текущего канала на рабочей частоте оценивается по результатам обратной передачи по нему квитанции.
3. Способ использования избыточного частотного ресурса при передаче АМн сигналов на основе шестнадцатипозиционных сигнальных конструкций, позволяющий повысить своевременность системы передачи.

Научная новизна новых научных результатов в том, что впервые:

- доказана возможность формирования сигналов ОМ методом квадратурного синтеза, отличающаяся от ранее известных управляемым уровнем несущего колебания;
- модифицирован метод проактивного контроля пригодности рабочих частот в режиме программной перестройки рабочей частоты, отличающийся возможностью

отбраковки каналов, несоответствующих заданным требованиям на длительности передачи последующего за выявленным информационным блоком данных, принятого с ошибкой;

- предложен способ повышения помехоустойчивости системы передачи с помощью частотно-временной матрицы, отличающейся от ранее известных тем, что эффект повышения помехоустойчивости достигается за счёт использования избыточно располагаемого частотного ресурса;

- получено аналитическое выражение для оценки помехоустойчивости приема многопозиционных сигнальных конструкций, сформированных на основе 2-х частотных и 3-х временных интервалов разнесения.

Теоретическая значимость научных результатов в том, что впервые:

- введено понятие параметра управления пилот-сигналом, и определено его место в уравнении аналитического синтеза сигналов ОМ;

- обоснована возможность перераспределения мощности, высвободившейся в результате изменения уровня несущего колебания, для повышения энергоэффективности (дальности) связи;

- получено уравнение аналитического синтеза сигналов ОМ с управляемым уровнем несущего колебания;

- разработан механизм исключения непригодных частотных каналов непосредственно в процессе передачи, а также механизм повторного включения ранее отключенных каналов непосредственно в процессе передачи, основным параметром которого является длительность временного интервала блокировки частот.

- разработан способ кодирования шестиэлементных частотно-временных матриц 4-х битовыми информационными блоками.

Практическая значимость научных результатов в том, что впервые:

- получены значения коэффициентов повышения энергии, составляющее до 2.8 раз, приходящейся на информационные составляющие в зависимости от изменения величины параметра управления уровнем несущего колебания сигнала ОМ, позволяющие повысить достоверность не менее чем на 16% и до 64%;

- модифицирован за счет алгоритма автоматического обратного включения временно непригодного канала метод проактивного контроля рабочих частот при передаче сообщений в режиме программной перестройки рабочей частоты, не требующий тестирования и исключающий перерывы в ходе сеанса связи, а также повышающий своевременность не менее чем на 3%, и до 46% в условиях медленных замираний;

- разработан способ кодирования, формирования и приема помехозащищенной 16-позиционной сигнальной конструкции, состоящей из трех сигналов ОМ, последовательно разнесенных по временным интервалам, верхние и нижние боковые полосы которых определяют задействованный частотный интервал, позволяющий повысить своевременность передачи на 7%.

Достоверность полученных в диссертации результатов и выводов обеспечивается преемственностью подхода к решению научной задачи, адекватностью применяемых методов исследования при решении частных задач, обоснованным выбором исходных данных при разработке НМА повышения

достоверности и своевременности приема сигналов в условиях сложной сигнально-помеховой обстановки, обусловленной высокой загруженностью ДМД, приводящей к возникновению взаимных помех, корректностью вводимых допущений и ограничений, использованием фундаментальных положений общей теории связи и статистической радиотехники при исследовании вопросов повышения средней энергии формируемых сигнальных конструкций, непротиворечивостью и строгой аргументацией полученных теоретических результатов, подтверждением их данными имитационного моделирования.

Новизна результатов исследования подтверждается наличием патентов на изобретения по тематике научного исследования, а также непротиворечивостью полученных решений результатам предшествующих теоретических и экспериментальных исследований.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 16 опубликованных работах, 7 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, две из которых написаны единолично, 1 – в журнале, включенном в Scopus, 1 – в прочих журналах, включенных в РИНЦ, 3 — в сборниках конференций. По теме исследования получено 3 патента на изобретения и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Реализация. Результаты диссертационной работы реализованы (внедрены) в учебном процессе ГУАП, в материале отчетов об ОКР «Переход» в АО «ЦКБ МТ «Рубин» и НИР «Коллектив» в АО «Невское ПКБ».

Апробация. Материалы диссертации докладывались на 5-ом Международном форуме «Метрологическое обеспечение инновационных технологий», IV Международном форуме «Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве», Международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, каждая из которых представляет собой отдельное защищаемое положение, и заключения, изложена на 140 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунка, 3 таблицы и 7 приложений, список литературы содержит 122 наименования.

II. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы и показана ее актуальность, сформулированы и определены цель и научная задача исследования, изложены основные результаты, выносимые на защиту, дано краткое содержание диссертации по главам, а также приведены сведения о публикациях, апробациях и реализациях полученных результатов.

В первой главе проведен анализ условий функционирования СРС ДМД. Показана роль и место радиосвязи ДМД в инфокоммуникационном пространстве. Проанализированы основные требования, предъявляемые к линиям морской и авиационной связи, а также радиосвязи МЧС России, функционирующими в диапазоне промежуточных и коротких волн. Интерпретированы и выражены через

процентное соотношение показатели, характеризующие повышение достоверности как снижение требуемого отношения сигнал/шум (ОСШ) для достижения равной вероятности битовой ошибки для разработанной и известной модели ОМ при передаче амплитудно-манипулированных сигналов, а повышение своевременности - как повышение вероятности передачи заданного количества информации за фиксированное время при сравнении известных и разработанных способов. Рассмотрены технические возможности современных средств и комплексов радиосвязи ДМД. Проведен анализ известных технологий синтеза сигналов ОМ, исследованы особенности их формирования. Проанализирована сигнально-помеховая обстановка в ДМД и произведен выбор моделей описания каналов связи, сигналов, шумов и помех. Рассмотрены способы оценки качества канала путем определения ОСШ по несущему колебанию. Рассмотрены известные подходы к повышению помехозащищенности линий радиосвязи (ЛРС) ДМД, осуществлена постановка задачи на исследование, а также сформулированы основные допущения и ограничения.

Показано, что наиболее эффективным направлением повышения достоверности является применение методов формирования сигналов с повышенной энергоэффективностью, а для повышения своевременности – методов управления частотно-энергетическими параметрами СРС, в том числе, с программной перестройкой рабочей частоты.

В выводах, сформулированных по первой главе, указано:

- радиосвязь ДМД обеспечивает дальнюю связь на необорудованных территориях, однако высокая помеховая обстановка требует новых НТР для повышения помехоустойчивости;
- перспективными являются методы, основанные на управлении энергетическими параметрами сигнала, для чего требуется разработка модели сигналов ОМ с управляемым уровнем несущей, при этом сохранение несущей целесообразно для оценки по ней ОСШ;
- для повышения своевременности передачи при высокой загрузке диапазона целесообразно применять проактивный контроль состояния канала и адаптивную перестройку рабочей частоты;
- в задачах экстренной передачи сообщений необходим поиск НТР по реализации ОМ в многопозиционных сигналах за счет ЧВМ, для повышения своевременности приема.

Во второй главе представлены научные результаты по формированию сигналов ОМ с управляемым уровнем несущего колебания в интересах повышения достоверности приема в СРС, отличающихся повышенной энергоэффективностью их информационных составляющих. Проведен анализ особенностей синтеза сигналов амплитудной модуляции (АМ) и ОМ, в том числе с сохраненной несущей. Разработан способ формирования сигналов ОМ с управляемым уровнем несущего колебания и проведена оценка их энергетического потенциала.

Если аналитически технологию квадратурного синтеза представить как

$$s_{\text{OM-y}}(t) = [m_{\text{OM}} + m_{\text{AM}}s(t)]\cos(\omega_0 t) \pm [m_{\text{OM}} + m_{\text{AM}}s^*(t)]\sin(\omega_0 t), \quad (1)$$

где m_{AM} – индекс амплитудной модуляции (AM), $s(t)$ – модулирующий сигнал, то регулирование параметром m_{OM} , который определен как параметр управления пилот-сигналом, в пределах [0; 1], позволяет управлять уровнем несущего колебания. Для синтеза сигналов $s_{OM-U}(t)$ предложено дополнительно ввести генератор формирования управляемого уровня (ГУУ).

Сигнал $s_{OM-U}(t)$ определим, как сигнал ОМ с управляемым уровнем несущей (ОМ-У).

На рис. 1 показаны спектры сигналов $s_{OM-U}(t)$ при значении регулирующего параметра m_{OM} равном 1, 0,7 и 0,3.

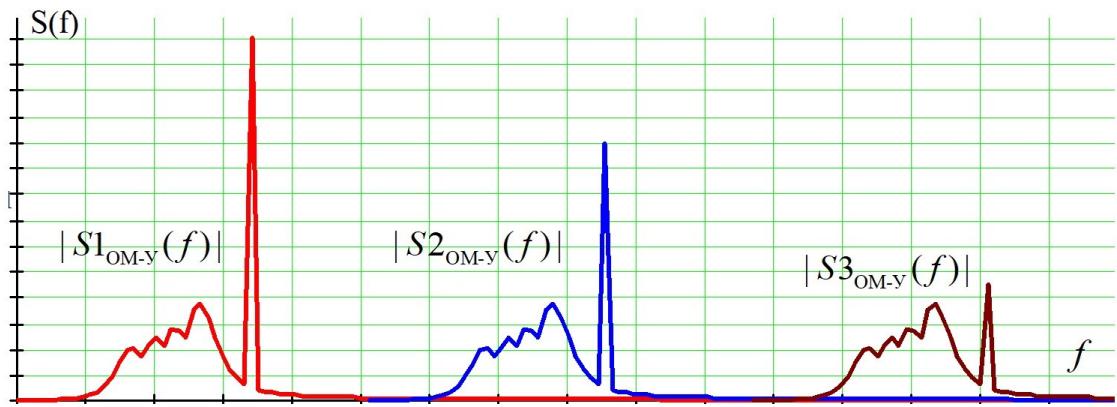


Рисунок 1 – Спектры сигналов ОМ-У при различном значении m_{OM}

Способность управления уровнем несущего колебания сигналов ОМ-У, позволяет повысить достоверность их приема в СРС ДМД. Это становится реализуемым за счет перераспределения мощности пилот-сигнала в интересах увеличения энергии, приходящейся на информационную составляющую формируемого сигнала. Коэффициент повышения энергии \mathcal{E}_P представлен в таб. 1.

Таблица 1 – Коэффициент повышения энергии, приходящейся на информационные составляющие при изменении величины параметра управления пилот-сигналом

m_{OM}	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
\mathcal{E}_P	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2	2,2	2,4	2,6	2,8

В выводах, сформулированных по второй главе, указано:

- для управления уровнем несущей необходимо при синтезе сигнала ОМ ввести параметр управления пилот-сигналом. Класс сигналов определен как сигналы ОМ с управляемым уровнем несущего колебания;
- возможность управления уровнем несущей позволяет на этапе установления связи передавать сигнал с высоким уровнем несущей. А после завершения синхронизации, снижать уровень пилот-сигнала, перераспределяя высвободившуюся мощность в интересах повышения энергии боковых

составляющих. Это позволяет энергию боковых составляющих повысить в 2,8 раз относительно первоначального состояния.

В третьей главе представлены научные результаты по разработке метода, обеспечивающего повышение своевременности при передаче сообщений в режиме программной перестройки рабочей частоты в СРС ДМД, за счет проактивного контроля пригодности текущего канала на рабочей частоте. Проведен анализ ресурса времени при реализации традиционного режима программной перестройки рабочей частоты. Разработан метод проактивного контроля в режиме программной перестройки рабочей частоты, в котором непосредственно в процессе передачи предусмотрен механизм исключения непригодных частотных каналов, а также механизм повторного включения ранее отключенных каналов. В режиме программной перестройки рабочей частоты общий ресурс, необходимый для передачи информации с учетом времени, потраченного на выявление непригодных частот, может быть получен из выражения

$$T_{\Xi} = \left(2U_0 + U + N_F + N_n \left[\frac{1+U}{N_F} \right] \right) \times \Delta t. \quad (3)$$

где U – объем передаваемого информационного сообщения в информационных блоках; U_0 – объем передаваемых тестовых сообщений в информационных блоках; N_F – набор частот для программной перестройки рабочей частоты; Δt – время пребывания на каждой субчастоте; N_n – количество непригодных каналов.

Задача сводится к минимизации общего времени T_{Ξ} передачи сообщений в режиме с программной перестройки рабочей частоты в условиях непригодности хотя бы одной рабочей частоты.

Принцип реализации способа представлен на рис. 2.

В зависимости от используемого типа канала радиолинии генерируется список рабочих частот в соответствии с условиями распространения и помеховой обстановкой. После этого с учетом имеющихся радиоданных он дополнительно уточняется, как и порядок их замены ввиду появления непригодных радиоканалов, выявленных в ходе сеанса связи.

Из списка адресной группы источник информации последовательно на каждой из частот передает закодированный помехоустойчивым кодом тестовый блок данных, известный на приемной стороне.

Приемник получает данные, по контрольной сумме проверяет их целостность и, если все в порядке, по обратному каналу отправляет положительную квитанцию. Если данные отсутствуют, или повреждены, отправляется отрицательная квитанция. Подтверждение получения переданного текстового блока передается на той же частоте, на которой было принято сообщение. Обратная передача осуществляется в тот момент времени, когда передающая сторона посылает тестовый блок уже на следующей частоте из адресной группы. Двусторонняя передача «тестовый блок – квитанция» производится последовательно на всех частотах из адресной группы. Для повышения точности результатов тестирования, передача тестовых блоков производится со скоростью, на которой планируется

передавать информационные блоки. На передающей стороне оценивается значение принятой квитанции. По результатам анализа принимается итоговое решение о целесообразности дальнейшего использования тестируемого канала для сеанса связи. Если квитанция принимает положительное значение – канал пригоден для дальнейшего сеанса связи, если не принята вовсе или имеет отрицательное значение – канал не пригоден.

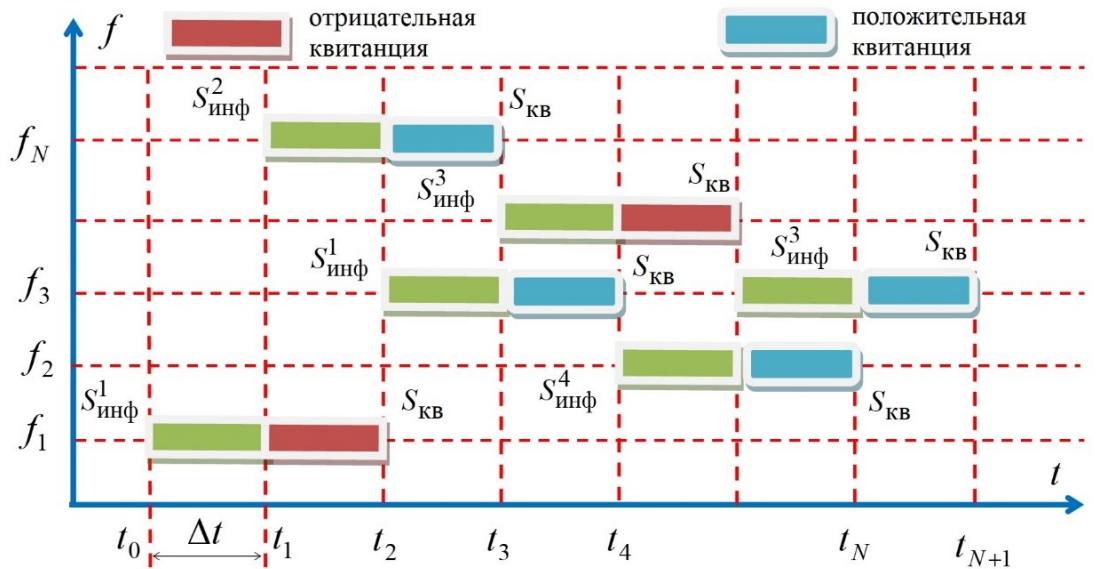


Рисунок 2 – Принцип тестирования рабочих частот в предлагаемой методике

В предлагаемой концепции для тестирования потребуется время, определяемое следующим образом

$$T_{\Sigma} = (N + 1) \times \Delta t , \quad (4)$$

где N – количество частот в адресной группе; Δt – длительность временного интервала, определяемого скоростью перестройки с одной рабочей частоты на другую в режиме программной перестройки рабочей частоты.

После подбора адресной группы рабочих частот осуществляется передача сообщения посредством информационных блоков длительностью Δt . При этом передача осуществляется только на тех частотах, которые были отобраны в ходе предыдущего этапа.

На приемной стороне квитанцию о принятом информационном блоке передают обратно на той же частоте, на которой он был принят.

В случае непригодности канала запускается механизм исключения частоты из списка используемых. При дальнейшей передаче текущего сообщения эта частота определённое время (далее интервал блокировки) не будет использоваться, после чего автоматически включится в список. Во время смены рабочей частоты из адресной группы информационный блок повторно передается на следующей рабочей частоте.

Анализ описанных процедур показывает, что в случае непригодности канала произойдет задержка при передаче сообщения только на длительности одного

информационного блока, поскольку на следующем этапе данный канал будет исключен из рабочего списка.

Механизм повторного включения ранее отключённого канала в режиме программной перестройки рабочей частоты включается через временной интервал блокировки T . Для каждого из отключённых каналов отсчёт времени ведётся независимо друг от друга. В общем случае для каждого из каналов длительность его блокировки может быть различной. Длительность интервала T для каждой из частот должна определяться периодом функции корреляции замираний на этой частоте. Однако, на практике эта длительность заранее неизвестна и может быть оценена только путём постоянной тестирования данной частоты. Такой подход несовместим с необходимостью высокоскоростной передачи сообщений. Поэтому предлагается задать длительность интервала блокировки T одинаковым для всех частот, выбранных в качестве рабочих для текущего сеанса связи.

Учитывая, что длительность интерференционных замираний в декаметровом канале достигает 10 мин, данный интервал времени может быть выбран в качестве опорной точки для задания интервала блокировки отключенного канала T . Такая схема гарантирует, что отключённый канал не проверяется слишком часто (чтобы не нагружать систему), но и не остаётся режиме ожидания слишком долго.

Для оценки эффективности разработанного метода адаптации системы передачи данных был использован метод имитационного моделирования. Если на некоторой частоте, ранее пригодной для передачи информации, отношение сигнал/шум уменьшилось до величины, не позволяющей передавать данные с заданной достоверностью при использовании определённой сигнально-кодовой конструкции, то в течении некоторого, заранее неизвестного времени, отношение сигнал/шум будет принимать значения, не превышающие данную величину.

Такой подход позволяет каждую из доступных для передачи частот рассматривать как марковскую цепь с двумя состояниями: «Пригодна для передачи данных» и «Непригодна для передачи данных». Хотя отношение сигнал/шум и меняется во времени непрерывно, однако при передаче кодовых блоков определённой длительности, на качество связи оказывает влияние усреднённая на длительности передачи кодового блока величина отношения сигнал/шум. Поэтому переход из состояния в состояние представлен дискретным процессом, шаг которого соответствует интервалам времени, равным длительности передачи кодового блока.

Вероятности перехода из состояния в состояние определяются периодом функции корреляции, характеризующей замирания в радиоканале. Поскольку данный период заранее неизвестен, то моделирование проводится при различных соотношениях вероятностей перехода. Весь выделенный для связи набор из N частот при описанном подходе представляет собой совокупность из N марковских цепей, в каждой из которых протекает независимый от других цепей случайный процесс.

На первоначальном этапе для передачи сообщений используются все выделенные для связи частоты. Каждое из сообщений передаётся на одной из частот, номер которой определяется программным способом. В случае неуспешной передачи сообщения на какой-либо из частот, данная частота временно

исключается из списка рабочих частот на время, длительность которого определяется интервалом блокировки. По истечении заданного времени частота автоматически возвращается в список рабочих частот. При этом, если качество связи на данной частоте не увеличилось за тот период, когда она была исключена из списка, то она вновь будет исключена из списка после передачи первого же сообщения на этой частоте.

Моделирование проводилось при следующих параметрах: количество рабочих частот – 30, интервал блокировки, т.е. длительность временного интервала до повторного использования частоты, оказавшейся непригодной по результатам передачи — 300 кодовых блоков. Вероятность перехода частоты из состояния 0 (частота пригодна для передачи сообщений с заданным качеством при использовании текущей сигнально-кодовой конструкции) в состояние 1 (частота непригодна для передачи сообщений) p_{01} фиксировалась, а вероятность перехода из состояния 1 в состояние 0 p_{10} принимала ряд последовательных значений.

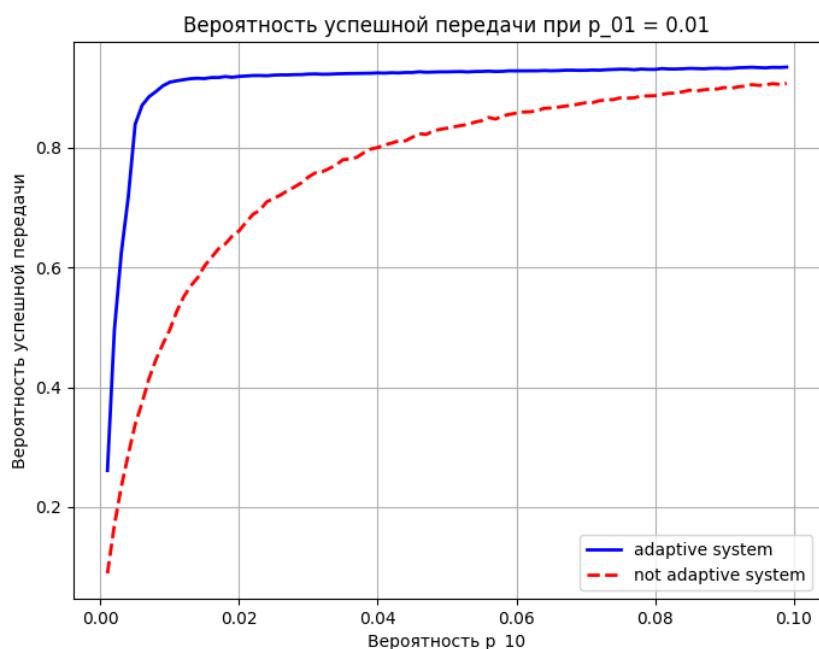


Рисунок 3 – Зависимости вероятности успешной передачи от вероятности перехода p_{10} для адаптивной (сплошная линия) и неадаптивной (пунктирная линия) систем при фиксированной вероятности $p_{01} = 0,01$.

В выводах, сформулированных по третьей главе, указано:

- эффективность режима программной перестройки рабочей частоты во многом определяется пригодностью выделенных для его реализации каналов. Однако наличие замираний, характерных для ДМД, существенно снижает эффективность его применения. В таких условиях существенно возрастает значимость технических решений, позволяющих своевременно выявлять каналы непригодные для реализации режима программной перестройки рабочей частоты.

- анализ существующих подходов к организации режима с программной перестройки рабочей частоты показал, что даже при передаче пакетной информации, оценка достоверности переданной информации осуществляется только по

окончанию текущего сеанса связи, что существенно снижает своевременной передачи на наличии непригодных каналов.

– даже при наилучших условиях, общее время, затрачиваемое на передачу в режиме с программной перестройки рабочей частоты с учетом непригодности хотя бы одной частоты, будет складываться из времени, затрачиваемого на передачу исходной информации, времени, затрачиваемого на обратную передачу информационных блоков, переданных с ошибками и времени, необходимого для повторной передачи информационных блоков, переданных с ошибками.

– анализ временного бюджета, затрачиваемого на реализацию режима с программной перестройки рабочей частоты в различных условиях, позволяют судить о его избыточности, что указывает на возможность его сокращения, например, за счет изменения самого подхода, к реализации процедур контроля состояния рабочих каналов. В частности, на основе реализации процедур проактивного контроля, в соответствии с которым анализ качества пригодности рабочих частот производят непосредственно в ходе сеанса связи с последующей отбраковкой каналов, несоответствующих заданным требованиям.

– сущность предлагаемого подхода к реализации проактивного контроля состоит в следующем. В ходе сеанса связи принятый блок в виде квитанции передают обратно на частоте приема в тот момент времени, когда передающая сторона передает информационный блок уже на следующей частоте из адресной группы рабочих частот, выделенных для режима с программной перестройки рабочей частоты.

– концепция проактивного контроля рабочих частот отличается наличием разработанного алгоритма повторного включения ранее отключенного частотного канала. Основным параметром разработанного алгоритма является длительность временного интервала блокировки частот.

– разработанная методика, базирующаяся на проактивном контроле пригодности текущего канала на рабочей частоте, приводит к задержке в передаче сообщения только на длительности одного информационного пакета (блока), поскольку уже на следующем такте эта частота будет исключена из рабочего списка, и в последующем некоторый промежуток времени, обозначенный как интервал блокировки, не будет использоваться для связи.

– Анализ полученных зависимостей подтверждает работоспособность и значительную эффективность разработанного метода для случая, когда переход из состояния в состояние осуществляется с малыми вероятностями. При увеличении вероятностей перехода из состояния в состояние преимущество адаптивной системы снижается даже при оптимально выбранном интервале блокировки. Таким образом, предложенный метод успешно функционирует при наличии медленных замираний в радиоканале и не даёт выигрыша при быстрых замираниях радиоканала.

В четвертой главе проработаны НТР по реализации ОМ в многопозиционных сигналах в интересах повышения помехоустойчивости их приема за счет ЧВК. В рамках способа рассмотрены особенности реализации методов разнесения на ЛРС ДМД, обоснована структура помехоустойчивых сигнальных конструкций на основе частотно-временных матриц (ЧВМ) и оценена

их помехоустойчивость.

В интересах повышения помехоустойчивости приема предлагается формировать сигнальную конструкцию из трех сигналов ОМ, последовательно разнесенных по временным интервалам. При этом центральную частоту каждого из сигналов ОМ определить на границе между частотными интервалами разнесения. Тогда НБП каждого из сигналов ОМ будет занимать позицию в первом (с меньшим номиналом) частотном канале разнесения, а ВБП – во втором канале. Информационное наполнение такой сигнальной конструкции будет определять комбинация энергетических максимумов сигналов ОМ в пределах частотных интервалов. Так, на рис. 4 представлен вариант комбинаций кодированных символов, в соответствии с разработанным подходом. Темным цветом показано энергетическое наполнение подцикла. Особенность предложенного кодирования состоит в том, что если в информационной комбинации первый бит «1», то во всех временных циклах сигнальной конструкции или в первом, или во втором частотном интервале будет присутствовать сигнал, а при нулевом значении первого бита сигнал будет присутствовать только в каких-то двух временных подциклах.

В предложенном способе при передаче используются 16 кодовых комбинаций (матриц). ЧВМ формируется в виде двух частотных и трех временных интервалов разнесения, что обеспечивает передачу одним символом (слотом) сигнально-кодовой конструкции из четырех информационных битов.

Помехоустойчивость предложенных сигнальных конструкций оценивается по показателю вероятности ошибки приема сигнального символа как совокупности результатов энергетического обнаружения полезного излучения в пределах каждого из слотов ЧВМ, взяв за основу АМ сигналы, передаваемые поочередно в двух полосах – верхней и нижней.

В предложенном способе при передаче используются 16 кодовых комбинаций (матриц), тогда как всего матриц со всеми возможными значениями существует 64. При приеме искаженной под действием помех матрицы, если она попадает в одну из 48-ми не использующихся комбинаций, демодулятор будет принимать решение в пользу 16-ти заявленных комбинаций. В результате, при демодуляции данная матрица будет отнесена к максимально подобной из 16-ти используемых, исходя из того, что расстояние Хеминга между данными комбинациями должно быть минимальным. Таким образом итоговая символьная ошибка демодуляции может быть уменьшена, так как оценка при принятии решения в таком случае будет производиться для матрицы (комбинации из трех подциклов) в целом.

В работе введена вероятность перехода ошибочной комбинации (одна из 48-ми неиспользуемых матриц) при демодуляции в истинную. Такие комбинации называются дополнительными.

1000	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
1001	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
1010	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
1011	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
1100	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
1101	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
1110	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
1111	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
0000	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
0001	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
0010	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
0011	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
0100	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
0101	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
0110	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			
0111	ОМ	номер временного подцикла		
		1	2	3
	ВБП			
	НБП			

Рисунок 4 – Матрица кодирования символов сигнальной конструкции

001	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100px;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">ВБП</td><td></td><td></td><td style="background-color: #800000;"></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">НБП</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	ВБП				НБП				<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100px;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">ВБП</td><td></td><td></td><td style="background-color: #800000;"></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">НБП</td><td style="background-color: #800000;"></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	ВБП				НБП				201
	1	2	3																								
ВБП																											
НБП																											
	1	2	3																								
ВБП																											
НБП																											

а) для вероятности p_a (переход матрицы в комбинацию с минимальным отличием в одном символе)

000	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100px;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">ВБП</td><td></td><td></td><td style="background-color: #800000;"></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">НБП</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	ВБП				НБП				<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100px;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">ВБП</td><td></td><td style="background-color: #800000;"></td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">НБП</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	ВБП				НБП				012
	1	2	3																								
ВБП																											
НБП																											
	1	2	3																								
ВБП																											
НБП																											

б) для вероятности p_b (переход матрицы в комбинацию с минимальным отличием в двух символах)

330	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100px;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">ВБП</td><td></td><td style="background-color: #800000;"></td><td></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">НБП</td><td style="background-color: #800000;"></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	ВБП				НБП				<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 100px;"> <tr><td></td><td style="text-align: center;">1</td><td style="text-align: center;">2</td><td style="text-align: center;">3</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">ВБП</td><td style="background-color: #800000;"></td><td></td><td style="background-color: #800000;"></td></tr> <tr><td style="text-align: center;">НБП</td><td></td><td></td><td></td></tr> </table>		1	2	3	ВБП				НБП				111
	1	2	3																								
ВБП																											
НБП																											
	1	2	3																								
ВБП																											
НБП																											

в) для вероятности p_c (переход матрицы в комбинацию с минимальным отличием в трех символах)

Рисунок 5 – Пример вариантов перехода из матрицы в матрицу при демодуляции для вероятностей p_a (а), p_b (б), p_c (с)

В случае предложенных конструкций сигнальный символ состоит из 6 элементов частотно-временной матрицы. Если при демодуляции не учитывать переход ошибочной матрицы (из 48-ми несуществующих), в одну из используемых при передаче с минимальным отличием, то вероятность символьной ошибки для слота P_s будет вычисляться в соответствии с выражением

$$P_s = 1 - (1 - p)^6, \quad (5)$$

где p – вероятность ошибки на бит при амплитудной модуляции, вычисляемая по известной формуле

$$p = 0,5 \cdot \exp\left(-\frac{h_{AM}^2}{4}\right), \quad (6)$$

где h_{AM}^2 – отношение энергии сигнала в одном временном подцикле на одной из частот на входе демодулятора к спектральной плотности мощности шума.

Вероятность перехода одной матрицы в другую равна произведению вероятностей перехода каждого символа в одном временном интервале.

Результирующее выражение для расчета вероятности символьной ошибки предложенной сигнальной конструкции

$$P_{ЧВМ} = 1 - \left((1 - p)^6 + \frac{29}{16} \cdot 2p \cdot (1 - p)^5 + \frac{17}{16} \cdot 4p^2 \cdot (1 - p)^4 + \frac{2}{16} \cdot 8p^3 \cdot (1 - p)^3 \right). \quad (7)$$

В интересах сравнительной оценки помехоустойчивости разработанной сигнальной конструкции как с применением, так и без применения дополнительных комбинаций, целесообразно провести сравнение с амплитудной модуляцией (АМн), так же передающей 4 бита на той же общей длительности такта.

В данном случае вероятность ошибки на бит считается по формуле (5). Под символом понимается совокупность 4 бит, следовательно, формула определения вероятности символьной ошибки P_{AM} будет иметь следующий вид

$$P_{AM} = 1 - \left(1 - 0,5 \cdot \exp\left(-\frac{h^2}{4}\right) \right)^4. \quad (8)$$

Для предложенного способа передача одной сигнальной конструкции, занимающей три временных подцикла, обеспечивает прием четырех информационных бит. Поэтому, если оценивать помехоустойчивость с точки зрения равной скорости передачи 4-х битного символа, то для АМн модуляции длительность передачи одного информационного бита $T_b=0,25T_s$, тогда как для ЧВМ $T_b=0,33T_s$. Длительность передачи 1 бита для ЧВМ в 4/3 раза больше, чем для АМн, что даёт аналогичный выигрыш для величины энергии сигнала к плотности шума в расчете на 1 бит.

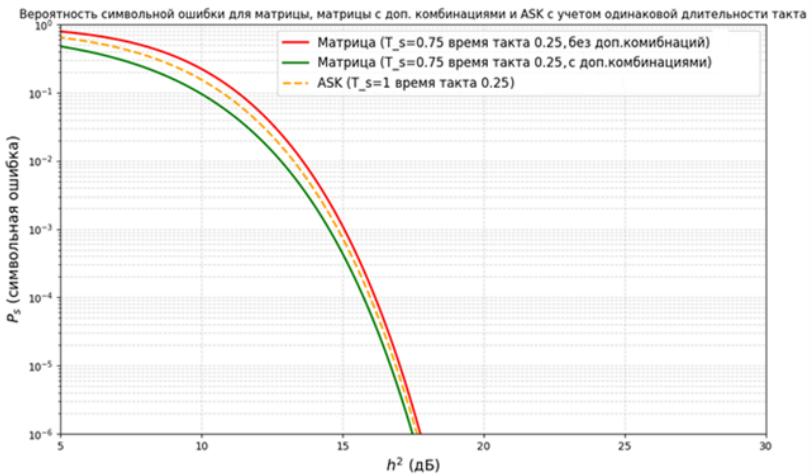


Рисунок 6 – Зависимость вероятности символической ошибки от соотношения энергии 4-битного символа к спектральной плотности мощности шума для сигналов АМн и ЧВМ с применением дополнительных комбинаций при равной скорости передачи 1 бита

При одинаковой длительности передачи 1 бита, предложенная конструкция на 0,3 дБ выигрывает в помехоустойчивости по сравнению с сигналами АМн, и при этом в 1,33 раза превосходит его по скорости при передаче целого символа. Без учета дополнительных комбинаций матрица на те же 0,3 дБ будет проигрывать сигналам АМн при аналогичном выигрыше в скорости.

В заключении сформулированы основные выводы и определены направления дальнейшего исследования. Ниже представлены основные результаты работы.

Предложены сигналы ОМ с управляемым уровнем несущего колебания, позволяющие повысить достоверность приема сообщений минимум на 16 и до 64% в зависимости от значения регулирующего параметра. Предложен способ формирования сигналов ОМ с управляемым уровнем несущего колебания и проведена оценка повышения достоверности приема таких сигналов. Коэффициент повышения энергии, обеспечиваемый применением сигналов с управляемым уровнем несущего колебания ОМ-У, при значении параметра управления уровнем пилот-сигнала равном $t_{OM} = 0,1$ составит 2,8;

Разработан способ, обеспечивающий повышение своевременности минимум на 3% и до 46% при передаче сообщений в режиме программной перестройки

рабочей частоты в СРС ДМД за счет проактивного контроля пригодности текущего канала на рабочей частоте. Метод позволяет производить отбраковку каналов, несоответствующих заданным требованиям на длительности передачи последующего за выявленным информационным блоком данных, принятого с ошибкой. При этом непосредственно в процессе передачи предусмотрен механизм исключения непригодных частотных каналов, а также механизм повторного включения ранее отключенных каналов.

Предложен способ повышения своевременности передачи сообщений на 7% в сетях радиосвязи ДМД за счет применения сигнальных конструкций, сформированных посредством частотно-временных матриц, обеспечивающих передачу одним символом сигнально-кодовой конструкции, состоящей из четырех информационных битов. Разработанная сигнальная конструкция на основе 16-ти позиционной ЧВМ при одинаковой длительности передачи 1 бита на 0,3 дБ выигрывает в помехоустойчивости по сравнению с сигналами АМн, и при этом в 1,33 раза превосходит его по скорости при передаче целого символа.

Разработанные научные результаты могут быть использованы при модернизации существующего парка радиостанций ДМД.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК

1. **Жеглов К.Д.** Способ тестирования радиоканалов в режиме с программной перестройкой рабочей частоты / Жеглов К.Д., Дворников С.В. // Информация и космос. 2022. № 4. С. 15-20.

2. **Жеглов К.Д.** Проактивный контроль пригодности радиоканалов в режиме ППРЧ / Жеглов К.Д., Дворников С.В., Дворников С.С.// Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 11. С. 15-20.

3. **Жеглов К.Д.** Модель сигнала однополосной модуляции с вариативным уровнем несущего колебания / Жеглов К.Д.// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 2. С. 75-81.

4. **Zheglov K.D.** SSB Signals with controlled pilot level / ZheglovK.D., DvornikovS.S., DvornikovS.V.// T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 3. С. 41-47.

5. **Жеглов К.Д.** Выбор канала связи для радиолиний «Воздух-Земля» /Жеглов К.Д.// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 3. С. 100-107.

6. **Жеглов К.Д.** Эффективность многоканальных передач с однополосной модуляцией /Жеглов К.Д., Дворников С.С., Русин А.А., Чудаков А.М., Пшеничников А.В., Дворников С.В.// Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. № 3. С. 94-99.

7. **Жеглов К.Д.** Метод оценки доступности радиоканалов в режиме с ППРЧ непосредственно в ходе сеанса связи / Жеглов К.Д., Мингалев А.Н., Тюрликов А.М. // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2025. – Т. 19, № 7. – С. 19-24.

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в Scopus

8. Жеглов К.Д. Помехоустойчивость сигналов однополосной модуляции с управляемым уровнем несущего колебания / Жеглов К.Д., Дворников С.В., Дворников С.С.// Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22. № 2. С. 261-288.

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в РИНЦ

9. Жеглов К.Д. Обоснование и выбор вида передачи для декаметровых линий радиосвязи МЧС России / Жеглов К.Д., Чудаков А.М., Русин А.А., Дворников С.В., Дворников С.С.// Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2023. № 1. С. 62-74.

Патенты

10. Жеглов К.Д. Способ помехозащищенной передачи шестнадцатипозиционных сигналов на основе однополосной модуляции /К.Д. Жеглов, Дворников С.В., Пшеничников А.В., Дворников С.С.// Патент на изобретение 2791729 С1, 13.03.2023. Заявка № 2022132275 от 09.12.2022.

11. Жеглов К.Д. Способ контроля рабочих частот / Жеглов К.Д., Дворников С.С., Дворников С.В., Пшеничников А.В., // Патент на изобретение 2799491 С1, 05.07.2023. Заявка № 2022128329 от 01.11.2022.

12. Жеглов К.Д. Демодулятор сигналов амплитудной манипуляции / Жеглов К.Д., Дворников С.В., Дворников С.С., Павлов А.А., Федосов А.Ю., Гордиенко Д.Ю., Богданов А.В., Козлов М.Д. // Патент на изобретение RU 2808227 С1, 28.11.2023. Заявка № 2023117678 от 05.07.2023.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

13. Жеглов К.Д. Программа синтеза сигналов однополосной и амплитудной модуляции с управляемым уровнем несущего колебания/ Жеглов К.Д., Дворников С.В., Киршина И.А., Дворников С.С.// Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023617118, 05.04.2023. Заявка № 2023616351 от 05.04.2023.

Статьи, опубликованные в сборниках трудов конференций

14. Жеглов К.Д. Проактивный контроль пригодности радиоканалов в режиме ППРЧ / Жеглов К.Д. // Вестник научных конференций. «Перспективы развития науки и образования»: материалы международной научно-практической конференции, г. Тамбов, 30 ноября 2022 г. 2022. № 11-1 (87). С. 46-47.

15. Жеглов К.Д. Анализ проблем организации КВ связи в гражданской авиации /Жеглов К.Д., Дворников С.В.// Метрологическое обеспечение инновационных технологий: сборник статей V Международного форума. Под редакцией В.В. Окрепилова, Санкт-Петербург, 02 марта 2023 г. Санкт-Петербург : Изд-во ГУАП, 2023. С. 20-21.

16. Жеглов К.Д. Вариативный уровень несущего колебания в сигнале однополосной модуляции /Жеглов К. Д., Дворников С. В. // Математические методы и модели в высокотехнологичном производстве: сборник статей IV Международного форума. Санкт-Петербург, 07 ноября 2024 г. Санкт-Петербург : Изд-во ГУАП, 2024. ч.1. С 256-258.