

На правах рукописи



БЕЛОКОНЬ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ДЕКАМЕТРОВОГО КАНАЛА СВЯЗИ С
ЦИФРОВЫМИ СИГНАЛАМИ В УСЛОВИЯХ ДИФФУЗНОСТИ ИОНОСФЕРЫ

Специальность: 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика (технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ставрополь 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном
учреждении высшего образования
«Северо-Кавказский федеральный университет»

Научный руководитель: **Пашинцев Владимир Петрович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Габриэлян Дмитрий Давидович**
доктор технических наук, профессор, заместитель
начальника научно-технического комплекса по
науке ФГУП «Ростовский-на-Дону научно-
исследовательский институт радиосвязи»,
г. Ростов-на-Дону

Филатов Владимир Иванович
кандидат технических наук, доцент, докторант
ФГКВОУ ВО «Военная академия Ракетных войск
стратегического назначения имени Петра Великого»
Министерства обороны Российской Федерации
г. Балашиха

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Поволжский государственный
университет телекоммуникаций и информатики»,
г. Самара


Защита состоится 28.11. 2025 года в 10:00 часов на заседании диссертационного
совета 24.2.398.02 при ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»
по адресу: 355017, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, корпус 20, ауд. 312.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГАОУ ВО
«Северо-Кавказский федеральный университет» по адресу: 355029, г. Ставрополь, пр.
Кулакова, 2, и на сайте ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»:
<https://ncfu.ru/upload/medialibrary/959/lxnwp36mf7bh0tgtqetqbh8rkywx8x7z/Dissertatsiya-Belokon-D.A.pdf>

С авторефератом можно ознакомиться на сайте ФГАОУ ВО «Северо-
Кавказский федеральный университет»: <https://ncfu.ru/nauka/dissertatsionnyesovety/obyavleniya-o-zashchite-dissertatsiy/32547/>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор

 Г.В. Шагорова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Обеспечение радиосвязи на расстояния более тысячи километров с помощью организации декаметрового (ДКМ) канала связи (КС) на сегодняшний день не утратила своей актуальности. ДКМ радиосвязь обеспечивает обмен информацией для дальней морской связи, связи между государственными учреждениями и объектами силовых структур, в коммерческом секторе между удаленными объектами предприятий. Отдельное внимание стоит уделить актуальности применения ДКМ радиосвязи в условиях Арктической зоны Российской Федерации.

Анализ современных и перспективных ДКМ систем связи показывает, что они создаются на базе ДКМ радиостанций, которые функционируют на базе протоколов и стандартов MIL-STD-188-110C/D, STANAG 4285 и STANAG 4539. Которые в свою очередь используют для передачи информации многократные цифровые виды модуляции сигналов (фазовая модуляция – PSK с кратностью модуляции $M=4, 8, 16$, квадратурная амплитудная модуляция – QAM с кратностью модуляции $M=16, 32, 64$). Скорость передачи информации в таких модемах доходит до 240 Кбит в секунду.

Известно, что надежность ДКМ связи описывается как вероятность того, что помехоустойчивость (или вероятность ошибки $P_{\text{ош}}$) приема сигналов будет не хуже допустимого значения ($P_{\text{ош доп}}$). В настоящее время требуемое значение надежности связи ($D_{\text{св}}$) для ДКМ радиолинии составляет $D_{\text{св тр}} = 0,8$ при традиционной для ДКМ радиосвязи допустимой вероятности ошибки $P_{\text{ош доп}} = 3 \cdot 10^{-3}$. Однако анализ современных тенденций развития ДКМ радиосвязи показал, что требования к надежности ДКМ КС выросли до значений $D_{\text{св тр}} = 0,85$, а так же увеличилось требование к значению допустимой вероятности ошибки $P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$.

Анализ влияния мелкомасштабных возмущений ионосферы на надежность ДКМ КС при передаче цифровых сигналов с многократной модуляцией показал, что предъявляемые требования к надежности ($D_{\text{св тр}} = 0,85$) и помехоустойчивости ($P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$) связи не всегда можно обеспечить традиционными путями (за счет увеличения мощности излучения передатчика и применения узконаправленных антенн).

Данные обстоятельства свидетельствуют о наличии актуальной практической проблемы (**противоречия в практике**), которое состоит в том, что в условиях диффузности ионосферы обеспечить перспективные требования к надежности связи $D_{\text{св тр}} = 0,85$ при современных требованиях к допустимой вероятности ошибки

$P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$ при реализуемом отношении С/Ш на входе приемника $h^2 \leq 40$ дБ в ДКМ КС при приеме цифровых сигналов с эффектами многолучевого распространения радиоволн только за счет повышения мощности передатчика и узконаправленных антенн не представляется возможным.

Результаты проведенного анализа методов оценки надежности и выбора параметров (параметрического синтеза) ДКМ КС при возмущениях ионосферы позволили сделать вывод о наличии **противоречия в науке**, которое состоит в следующем.

Известна методика оценки надежности ДКМ канала связи с замираниями Накагами сигналов с бинарной частотной модуляцией (BFSK). Однако известно, что в ДКМ канале связи чаще наблюдаются замирания Райса, а методика, позволяющая провести оценку надежности ДКМ канала связи с райсовскими замираниями при одиночном приеме сигналов BFSK, в настоящее время отсутствует. Методика оценки надежности ДКМ канала связи с цифровыми видами модуляций сигнала (M -PSK, M -QAM) при пространственно-разнесенном приеме с райсовскими замираниями обусловленных диффузностью ионосферы также отсутствует.

Объектом исследования является однолучевой ДКМ КС с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы.

Цель исследования состоит в обеспечении требуемой надежности ДКМ ($D_{\text{св тр}} = 0,85$ при помехоустойчивости $P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$) КС с цифровыми сигналами (M -PSK, M -QAM) в условиях диффузности ионосферы.

Предметом исследования являются методы оценки надежности и выбора параметров ДКМ КС с одиночным и пространственно-разнесенным приемом цифровых сигналов в условиях диффузности ионосферы.

Общая научная задача исследования состоит в разработке методики параметрического синтеза ДКМ КС с одиночным и пространственно-разнесенным приемом цифровых сигналов, позволяющей обеспечить требуемую надежность ДКМ КС в условиях диффузности ионосферы.

Для решения поставленной общей научной задачи была проведена ее декомпозиция на **частные научные задачи** разработки:

1) методики оценки надежности ДКМ КС при одиночном приеме сигналов BFSK с райсовскими замираниями в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ при допустимой вероятности ошибки ($P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$) в условиях диффузности ионосферы;

2) методики оценки надежности ДКМ КС при разнесенном ($n > 1$) некоррелированном приеме сигналов с цифровыми видами модуляции (PSK, QAM) с различной кратностью модуляции (M) с райсовскими замираниями в зависимости от

выбора отношения рабочей частоты к МПЧ при допустимой вероятности ошибки ($P_{\text{ош.доп}} = 10^{-5}$) в условиях диффузности ионосферы;

3) методики выбора параметров ДКМ КС (отношение рабочей частоты к МПЧ (f_0/f_m), вид модуляции (g), кратность модуляции (M), кратность ветвей разнесения приемных антенн (n), допустимой дистанции разноса приемных антенн ($\Delta\rho_{\text{а доп}}$) для обеспечения требуемой надежности связи ($D_{\text{св}} \geq D_{\text{св.гр}} = 0,85$ при заданной допустимой вероятности ошибки $P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}$) на основе результатов оценки диффузности ионосферы.

Научная новизна диссертационного исследования обоснована получением следующих результатов:

1. Применение методов системного анализа проблемы обеспечения требуемой помехоустойчивости и надежности однолучевого ДКМ канала связи в условиях диффузности ионосферы (возрастания ее уровня) позволили сформулировать противоречие в науке и практике, а так же выполнить постановку общей научной задачи.

2. Разработана методика оценки надежности ДКМ канала связи с сигналами BFSK с райсовскими замираниями в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ при повышенных требованиях к помехоустойчивости ($P_{\text{ош.доп}} = 10^{-5}$) с учетом диффузности ионосферы, которая отличается от известных тем, что позволяет более достоверно оценить надежность связи, так как в однолучевом ДКМ канале преобладают райсовские замирания сигнала.

3. Разработана методика оценки надежности ДКМ канала связи при разнесенном приеме сигналов с цифровыми видами модуляции (M -PSK, M -QAM) с различной кратностью модуляции с райсовскими замираниями в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ при допустимой вероятности ошибки ($P_{\text{ош.доп}} = 10^{-5}$) с учетом диффузности ионосферы, которая отличается от известных тем, что позволяет учесть влияние диффузности ионосферы при оценке надежности ДКМ канала связи с многократными цифровыми сигналами.

4. Разработана методика выбора параметров ДКМ канала связи для обеспечения требуемой надежности связи, которая отличается от известных тем, что позволяет осуществить многопараметрическую адаптацию ДКМ КС за счет выбора: отношения рабочей частоты к МПЧ, вида и кратности модуляции, характеристик разнесения приемных антенн (количества и дистанции допустимого разноса приемных антенн).

5. За счет решения общей научной задачи достигнута цель диссертационного исследования по обеспечению требуемой надежности связи в однолучевом ДКМ канале ($D_{\text{св.гр}} = 0,85$ при $P_{\text{ош.доп}} = 10^{-5}$) с многократными цифровыми сигналами (M -

PSK, M-QAM) в условиях диффузности ионосферы. Результаты зондирования уровня диффузности ионосферы и применения разработанной методики выбора параметров ДКМ канала связи позволяют в условиях сильной диффузности ионосферы обеспечить повышение надежности ДКМ канала связи с многократными цифровыми сигналами на 55...64% за счет разнесенного приема на $n=2-4$ антенны и на 11...16 % за счет выбора кратности (M) и вида модуляции.

Теоретическая значимость Теоретическая значимость результатов работы заключается в разработке новых и развитии существующих методик оценки надежности и помехоустойчивости ДКМ КС с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы на основе результатов ее GPS-зондирования с использованием двухчастотного приемника спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в том, что разработанные методики позволяют выработать практические рекомендации по выбору параметров ДКМ КС с цифровыми сигналами ($f_0/f_m, g, M, n, \Delta\rho_{\text{доп}}$) для обеспечения требуемой надежности связи в условиях диффузности ионосферы.

Методы исследования. Методы исследования включают применение научно-методического аппарата системного анализа, радиозондирования ионосферы с использованием спутниковых радионавигационных систем GPS/ГЛОНАСС, статистической радиофизики, численные методы, построения многолучевых математических моделей КС, цифровой обработки сигналов, оценки помехоустойчивости одиночного и разнесенного приема сигналов с цифровыми видами модуляций, методы оценки надежности связи.

Достоверность и обоснованность результатов диссертационного исследования подтверждается применением апробированного научно-методического аппарата при решении поставленных научных задач, апробацией полученных результатов и их практической реализацией, корректностью принятых допущений и ограничений.

Авторский вклад. Все изложенные в диссертационной работе результаты получены при непосредственном участии автора. Из результатов работ, выполненных коллективно, в диссертацию включены только полученные непосредственно автором. Автором рассмотрены ДКМ КС с бинарной частотной, многократной фазовой и квадратурно-амплитудной модуляцией сигналов. Проанализировано влияние диффузности ионосферы на помехоустойчивость приема сигналов с бинарной частотной многократной фазовой и квадратурно-амплитудной модуляцией. Автором самостоятельно проведен углубленный анализ отечественной и зарубежной научной литературы, определена цель и задачи исследования. Все основные этапы выполнены лично автором. Автором разработаны методики оценки ДКМ КС с цифровыми

сигналами в условиях диффузности ионосферы и на их основе выработаны практические рекомендации для обеспечения требуемой надежности и помехоустойчивости ДКМ КС.

Апробация результатов диссертации осуществлялась в ходе докладов ее материалов на следующих научно-технических конференциях, среди которых «XL Всероссийская научно-техническая конференция проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем, филиал ВА РВСН» (г. Серпухов), 2021, «Всероссийская конференция (с международным участием) «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» РНТОРЭС им. А.С. Попова (г. Москва), 2023-2024, «XXXI Международная научно-техническая конференция // Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж), 2025, «Новые информационные технологии в системах связи и управления» Труды XXIII Российской межведомственной научно-технической конференции (г. Калуга), 2024.

Реализация результатов работы. Согласно актам о реализации, основные результаты диссертационного исследования были реализованы в ФГКВОУ ВО «Военная академия связи» (г. Санкт-Петербург) в ходе выполнения научно-исследовательской работы «Опорник-ВНС-ВАС», в АО «НПО «Рязаньприбор» при выполнении инициативной работы «Разработка аппаратуры передачи специальных данных ПД-442», в АО «РАДИЙ-ТН» (г. Москва) в ходе выполнения опытно-конструкторской работы «Лир» и в учебном процессе кафедры радиосвязи ФГКВОУ ВО «Военная академия связи» (г. Санкт-Петербург).

Публикации материалов исследования. Результаты диссертации опубликованы в 20 научных трудах из них 7 статей опубликованы в журналах из перечня ВАК: Системы управления, связи и безопасности, 2022, № 1, 2023, № 2; Двойные технологии, 2023, № 4; «Известия института инженерной физики», 2024, № 1, 2025, №1, 2; 2 статьи в журналах, индексируемых в базе RSCI: Известия вузов России. Радиоэлектроника, 2022, № 6; Журнал радиоэлектроники, 2024, №. 12; 2 свидетельства регистрации программ на ЭВМ, 1 патенте Российской федерации на изобретение, 1 патенте Российской федерации на полезную модель, 7 докладов в сборниках научно-технических конференций.

Соответствие паспорту научной специальности. Результаты исследования соответствует паспорту научной специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика по следующим пунктам:

2 – «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта»;

7 – «Методы и алгоритмы структурно-параметрического синтеза и идентификации сложных систем»;

11 – «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем».

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- 1) методика оценки надежности декаметрового канала связи при одиночном приеме сигналов BFSK с замираниями Райса в условиях диффузности ионосферы;
- 2) методика оценки надежности декаметрового канала связи при разнесенном приеме цифровых сигналов (M -PSK, M -QAM) с замираниями Райса в условиях диффузности ионосферы;
- 3) методика выбора параметров декаметрового канала связи с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы для обеспечения требуемой надежности связи на основе результатов оценки уровня диффузности ионосферы.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, списка литературы и 3 приложений. Работа содержит 47 рисунков и 8 таблиц. Список использованных источников литературы насчитывает 161 наименование. Диссертация изложена на 189 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель и научные задачи (общая и частные), раскрыты научная новизна и практическая ценность результатов работы, приведена краткая характеристика полученных результатов и представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена системному анализу проблемы обеспечения требуемой надежности ДКМ каналов связи с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы.

Анализ современных и перспективных ДКМ систем связи (СС), используемых для обеспечения дальней связи с подвижными и стационарными объектами показывает, что наиболее широкое применение получили радиостанции, построенные по стандартам MIL-STD-188-110, STANAG 4285 и STANAG 4539.

Существенное влияние на качество функционирования ДКМ СС оказывают эффекты, возникающие при распространении радиоволн через ионосферу Земли. Известно, что оно может носить многолучевой характер и сопровождаться возникновением интерференционных замираний (мерцаний) принимаемых сигналов. На рисунке 1 приведена карта глобального распределения индекса мерцаний (S_4), на которой можно выделить области наиболее интенсивных мерцаний в полярных ($S_4 \approx 0,25...0,45$) и экваториальных широтах (где $S_4 \approx 1$, что соответствует случаю рэлеевских замираний).

На рисунке 2 представлен механизм распространения ДКМ волны в условиях диффузной ионосферы. В процесс распространения фазовый фронт волны искажается на ММН электронной концентрации ионосферы. Интенсивность ММН определяется как:

$$\beta_{\text{и}} = (\Delta N(\rho, h)^2)^{0.5} / \bar{N}(h) = \sigma_{\Delta N}(h) / \bar{N}(h) = \sigma_{\Delta N}(h_m) / \bar{N}(h_m) \approx \text{const}, \quad (1)$$

Качественный анализ влияния эффектов трансionoсферного распространения радиоволн на надежность ДКМ КС с цифровыми сигналами позволил сделать следующие выводы:

1) в ДКМ канале связи с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы при традиционных требованиях к допустимой вероятности ошибки ($P_{\text{ош.доп}} = 3 \cdot 10^{-3}$) и наиболее глубоких рэлеевских замираниях возможно обеспечить традиционные ($D_{\text{св тр}} = 0,8$) и перспективные ($D_{\text{св тр}} = 0,85$) требования к надежности связи при реализуемом отношении С/Ш на входе приемника в ДКМ канале связи $h^2 \leq 40$ дБ;

2) при перспективных требованиях к допустимой вероятности ошибки ($P_{\text{ош.доп}} = 10^{-5}$) в условиях диффузности ионосферы для обеспечения традиционные ($D_{\text{св тр}} = 0,8$) и перспективные ($D_{\text{св тр}} = 0,85$) требования к надежности связи потребуется обеспечить отношения С/Ш на входе приемника более $h^2 \geq 60$ дБ, что превышает реально реализуемое отношение С/Ш в ДКМ канале связи $h^2 \leq 40$ дБ.

Данные обстоятельства свидетельствуют о наличии актуальной практической проблемы (**противоречия в практике**) и позволяют сформулировать цель диссертационного исследования, которая состоит в обеспечении требуемой надежности ДКМ КС с цифровыми сигналами в условия диффузности ионосферы. Выбор пути ее достижения осуществлен на основе применения методов системного анализа.

В работе проведен сравнительный анализ возможности применения 4-х альтернативных методов борьбы с эффектами многолучевого распространения радиоволн в ДКМ канале связи, не требующих изменения энергетики радиолинии (см. таблица 1).

Таблица 1 – Качественный анализ альтернативных методов повышения помехоустойчивости и надежности ДКМ КС за счет борьбы с эффектами многолучевого распространения радиоволн

1. Применение помехоустойчивого кодирования	2. Применение разнесенного приема	3. Применение тестовых сигналов и адаптация схемы эквалайзера	4. Выбор параметров ДКМ канала связи на основе результатов оценки уровня
Основные достоинства			
Позволяет повысить помехоустойчивость канала связи за счет введения избыточности передаваемых битов информации	Позволяет значительно повысить помехоустойчивость за счет приема сигнала по нескольким независимым каналам	Позволяет повысить помехоустойчивость за счет адаптации эквалайзера под текущие характеристики канала	Позволяет повысить помехоустойчивость за счет уменьшения влияния БЗ на канал связи за счет оценки уровня диффузности ионосферы
Существующие ограничения (недостатки)			
1) избыточность кодирования приводит к расширению ширины спектра передаваемого сигнала, что приводит к возникновению ЧСЗ и МСИ; 2) снижение скорости передачи информации; 3) увеличивается сложность и задержка обработки сигнала, особенно при использовании сложных кодов и алгоритмов декодирования.	1) требует значительных площадей для развертывания; 2) при возникновении коррелированных замираний в ветвях разнесения значительно ухудшается помехоустойчивость; 3) сложность системы синхронизации и обработки сигналов.	1) применение тестовых сигналов приводит к увеличению времени вхождения в связь; 2) адаптивный эквалайзер эффективен только при изменении характеристик ДКМ канала; 3) требуется точный подбор параметров эквалайзера, неоптимальные значения приводят к неустойчивой работе эквалайзера.	1) не учитывает замирания Райса; 2) не позволяет провести оценки надежности ДКМ связи при использовании пространственно- 3) не учитывает оценку помехоустойчивости многократных цифровых видов модуляции сигнала.

Таким образом, качественный анализ и сравнение рассмотренных альтернативных путей обеспечения требуемой надежности ДКМ КС с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы позволяет принять решение о выборе в качестве пути достижения поставленной цели последнего из них.

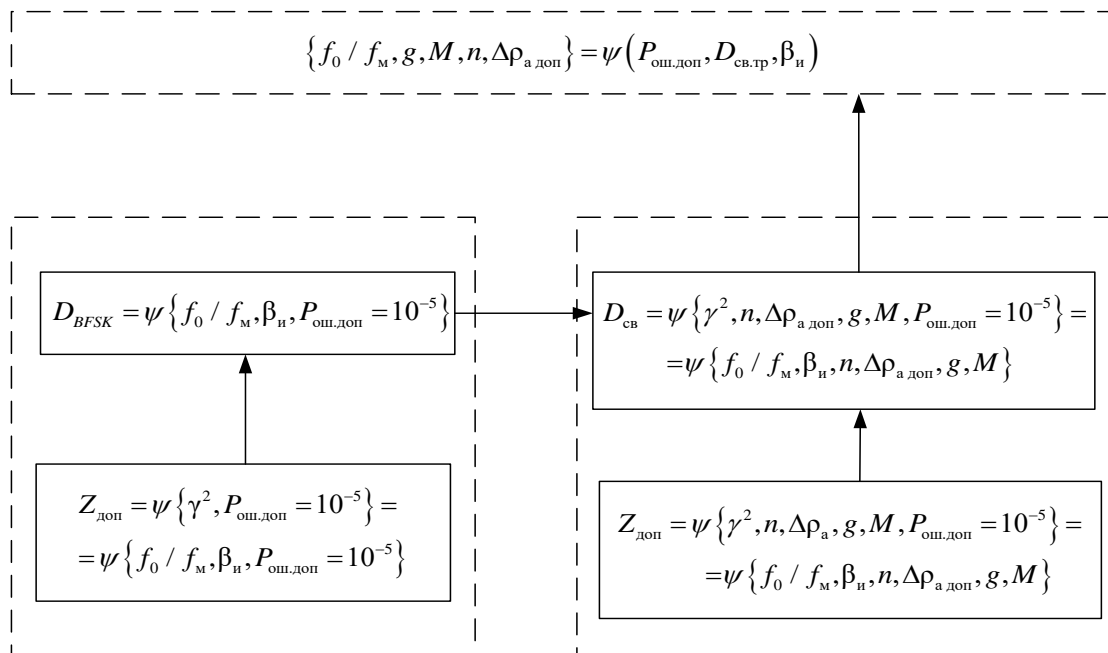
Проведенный анализ также показывает следующее. Известная методика оценки надежности ДКМ КС при возмущениях ионосферы не учитывает райсовские замирания сигнала в ДКМ канале связи, не учитывается зависимость надежности связи от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ, не позволяет оценить надежность ДКМ КС при использовании пространственно-разнесенного приема, не учитывает современных тенденций развития ДКМ систем связи к допустимой вероятности ошибки ($P_{\text{ош.доп}} = 10^{-5}$), не позволяет оценить надежность ДКМ КС при приеме цифровых сигналов (PSK, QAM) с многократной модуляцией ($M > 2$).

Из этого следует вывод о наличии **противоречия в науке**.

С учетом уточненной центральной идеи диссертационного исследования и выявленного противоречия в науке осуществлена постановка **общей научной задачи** диссертационного исследования. Она состоит в разработке метода параметрического синтеза ДКМ КС с цифровыми сигналами, позволяющего обеспечить требуемую надежность ДКМ КС в условиях диффузности ионосферы. Для обеспечения эффективного решения поставленной общей научной задачи осуществлена ее декомпозиция на **3 частные задачи** с использованием метода построения «дерева целей» (рисунок 3).

Методика параметрического синтеза однолучевого ДКМ канала связи с многократными цифровыми сигналами, позволяющей обеспечить требуемую надежность связи в условиях диффузности ионосферы

Методика выбора параметров однолучевого ДКМ канала связи (отношение рабочей частоты к МПЧ f_0/f_M , вид модуляции g , кратность модуляции M , кратность ветвей разнесения приемных антенн n , допустимого разнеса приемных антенн $\Delta\rho_{a\text{ доп}}$) для обеспечения требуемой надежности связи ($D_{св} \geq D_{св,тр} = 0,85$ при допустимой вероятности ошибки $P_{ош} \leq P_{ош,доп} = 10^{-5}$) на основе результатов оценки уровня диффузности ионосферы $\beta_{и}$



Методика оценки надежности связи ($D_{св}$) в однолучевом ДКМ канале при приеме сигналов *BFSK* с райсовскими замираниями (γ^2) в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ f_0/f_M при повышенных требованиях к помехоустойчивости ($P_{ош,доп} = 10^{-5}$) с учетом диффузности ионосферы $\beta_{и}$

Методика оценки надежности связи в однолучевом ДКМ канале при разнесенном ($n \geq 2$) некоррелированном приеме сигналов с цифровыми видами модуляции $g = (PSK, QAM)$ с различной кратностью модуляции (M) с райсовскими замираниями в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ f_0/f_M при допустимой вероятности ошибки ($P_{ош,доп} = 10^{-5}$) с учетом диффузности ионосферы $\beta_{и}$

Рисунок 3 – Дерево целей диссертационного исследования

Вторая глава посвящена решению **1-й частной научной задачи** разработки методики оценки надежности ДКМ КС при одиночном приеме сигналов BFSK с замираниями Райса в условиях диффузности ионосферы. Она решена в два этапа.

На 1-м этапе решения 1-й частной научной задачи разработана методика оценки допустимого отношения С/Ш при одиночном приеме сигналов BFSK с замираниями Райса в ДКМ канале связи в условиях диффузности ионосферы.

Известна аналитическая зависимость вероятности ошибки от отношения С/Ш и параметра Райса при оптимальном некогерентном приеме ортогональных сигналов с частотной модуляцией (BFSK):

$$P_{\text{ош}} = \frac{\gamma^2 + 1}{h^2 + 2(\gamma^2 + 1)} \exp\left[-\frac{\gamma^2 h^2}{h^2 + 2(\gamma^2 + 1)}\right]. \quad (3)$$

Оценка допустимого отношения $Z_{\text{доп}}$ из выражения (3) производится с помощью численных методов, встроенных в пакет прикладных программ MATLAB.

Так же известно, что для определения вероятности ошибки при оптимальном некогерентном приеме ортогональных сигналов с райсовскими замираниями существует упрощенная аналитическая формула

$$P_{\text{ош}} \approx \frac{(1 + \gamma^2)}{h^2} \exp(-\gamma^2), \quad (4)$$

которая справедлива при условии $h^2 \gg 1 + \gamma^2$, т.е. когда отношение С/Ш на входе приемника намного превышает параметр Райса.

Из выражения (4) легко выразить зависимость параметра допустимого превышения С/Ш $Z_{\text{доп}} = 10 \lg h_{\text{доп}}^2$ от допустимой вероятности ошибки $P_{\text{ош доп}}$ и параметра Райса γ^2 в виде приближенной формулы:

$$Z_{\text{доп}} \approx 10 \lg \left(\frac{1 + \gamma^2}{P_{\text{ош.доп}}} \exp(-\gamma^2) \right). \quad (5)$$

Оценка параметра глубины замираний Райса в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ (f_0 / f_m) и уровня диффузности ионосферы (β_n) производится на основе модифицированного известного выражения:

$$\gamma^2 = \left\{ \exp\left[\sigma_\varphi^2(f_0 / f_m, \beta_n)\right] - 1 \right\}^{-1} \quad (6)$$

где σ_φ^2 – дисперсия флуктуаций фазы во фронте отраженной волны на выходе неоднородной ионосферы. Выражение для среднеквадратического отклонения (СКО) флуктуаций фазового фронта отраженной волны определяется согласно выражения:

$$\sigma_\varphi = \pi (f_0 / f_m) \beta_n f_m / c \sec^2 \varphi_0 \left(\sqrt{\pi r_0 L_s} \right)^{0.5}, \quad (7)$$

где c – скорость света; φ_0 – угол падения волны на нижнюю границу h_0 отражающего слоя F ионосферы; r_0 – характерный (средний) размер мелкомасштабных ионосферных неоднородностей (200...500 м); L_s – эквивалентный однородный путь волны в слое F2 ионосферы (зависящий от его критической частоты f_{F2} , высоты нижней границы h_0 и максимума ионизации h_m слоя F2 ионосферы, дальности радиосвязи d).

На основе зависимости (6) и подстановке его в выражения (3, 5) представляется возможным получить искомую функциональную зависимость допустимого отношения С/Ш от выбора рабочей частоты и степени диффузности:

$$Z_{\text{доп}} = \psi(\gamma^2, P_{\text{ош, доп}} = 10^{-5}) = \psi(f_0 / f_m, \beta_n). \quad (8)$$

На 2-м этапе решения 1-й частной научной задачи разработана методика оценки надежности ДКМ КС при одиночном приеме сигналов BFSK с замираниями Райса в условиях диффузности ионосферы.

Надежность (вероятность) связи в ДКМ канале связи описывается как вероятность P того, что величина вероятности ошибки $P_{\text{ош}}$ при приеме сигналов будет не хуже допустимого значения $P_{\text{ош, доп}}$:

$$D_{\text{св}} = P(P_{\text{ош}} \leq P_{\text{ош, доп}}) = F\left[\frac{(\bar{Z} - Z_{\text{доп}})}{\sigma_Z}\right] = F(\Delta Z / \sigma_Z) = F(\xi), \quad (9)$$

где $F(\xi) = (\sqrt{2\pi})^{-1} \int_{-\infty}^{\xi} \exp(-0.5t^2) dt$ – функция Лапласа, $\xi = (\bar{Z} - Z_{\text{доп}}) / \sigma_Z = \Delta Z / \sigma_Z$,

\bar{Z} – среднее (медианное) отношение (превышение) С/Ш на входе приемника (ПРМ), выраженное в дБ, в условиях замираний, равное отношению С/Ш при отсутствии замираний ($Z = \bar{Z}$).

Оценка функциональной зависимости $\bar{Z} = \psi(f_0 / f_m)$ производится на основе методик Международного союза электросвязи (ITU-R P.533-13, ITU-R P.372-12).

На основе выражения (9), полученной функциональной зависимости (8) и известной зависимости $\bar{Z}(f_0 / f_m)$ производится оценка надежности ДКМ КС ($D_{\text{св}}$) при приеме сигналов BFSK с райсовскими замираниями (γ^2) в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ f_0 / f_m и уровня диффузности ионосферы β_n :

$$\begin{aligned} D_{\text{св}}(f_0 / f_m, \beta_n) &= F\left\{\left[\frac{(\bar{Z}(f_0 / f_m) - Z_{\text{доп}}(\gamma^2, P_{\text{ош, доп}} = 10^{-5}))}{\sigma_Z}\right]\right\} = \\ &= F\left\{\left[\frac{(\bar{Z}(f_0 / f_m) - Z_{\text{доп}}(f_0 / f_m, \beta_n))}{\sigma_Z}\right]\right\} \end{aligned} \quad (10)$$

Совокупность выражений (3-10), позволила получить искомую функциональную зависимость:

$$D_{\text{св}} = \psi(\gamma^2, P_{\text{ош, доп}} = 10^{-5}) = \psi(f_0 / f_m, \beta_n). \quad (11)$$

Третья глава посвящена решению 2-й и 3-й частных научных задач. **2-я частная научная задача разработки** методики оценки надежности ДКМ КС при разнесенном приеме многократных цифровых сигналов с замирениями Райса в условиях диффузности ионосферы решена в два этапа.

На 1-м этапе решения 2-й частной научной задачи разработана методика оценки допустимого отношения С/Ш ДКМ КС при разнесенном приеме многократных цифровых сигналов с замирениями Райса в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы.

Вероятность ошибочного приема в канале связи с райсовскими замирениями сигналов с модуляцией вида PSK, QAM может быть найдена с помощью производящей функции моментов M_h :

$$M_h\left(-\frac{g}{\sin^2\theta}\right) = \frac{(\gamma^2 + 1)\sin^2\theta}{(\gamma^2 + 1)\sin^2\theta + gh^2} \exp\left[-\frac{\gamma^2 gh^2}{(\gamma^2 + 1)\sin^2\theta + gh^2}\right], \quad (12)$$

где g является константой, зависящей от определенного сочетания модуляции/детектирования, угол θ описывает погрешность фазовой синхронизации приемника и принимаемого сигнала.

Параметр g для сигналов с модуляцией M -PSK и M -QAM кратностью $M > 2$ описывается выражениями следующего вида:

$$M\text{-PSK: } g = \sin^2(\pi/M); \quad (13)$$

$$M\text{-QAM: } g = 1,5/(M-1). \quad (14)$$

Известно, что для нахождения вероятности ошибки при многократном некоррелированном приеме для вида модуляции M -PSK используется выражение:

$$P_{MPSK} = \frac{1}{k} \left(\sum_{i=1}^{M/2} (w'_i) P_i \right). \quad (15)$$

Здесь $k = \log_2 M$ определяет количество передаваемых бит на один символ; $w'_i = w_i + w_{M-i}$, где w_i - вес Хемминга на i -ый символ, а P_i определяется выражением:

$$P_i = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi(1-(2i-1)/M)} \prod_{n=1}^N M_h\left(-\frac{1}{\sin^2\theta} \cdot g(2i-1)\right) d\theta - \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi(1-(2i+1)/M)} \prod_{n=1}^N M_h\left(-\frac{1}{\sin^2\theta} \cdot g(2i+1)\right) d\theta. \quad (16)$$

Здесь n определяет количество ветвей приемных антенн.

Известно, что вероятности ошибочного приема при многократном некоррелированном приеме сигналов с модуляцией M -QAM определяются согласно выражениям вида:

$$P_{MQAM} = \frac{2}{\pi\sqrt{M} \log_2 \sqrt{M}} \cdot \sum_{k=1}^{\log_2 2\sqrt{M}} \sum_{i=0}^{(1-2^{-k})\sqrt{M}-1} \left((-1)^{\frac{i2^{k-1}}{\sqrt{M}}} \cdot \left(2^{k-1} - \left(\frac{i2^{k-1}}{\sqrt{M}} + \frac{1}{2} \right) \right) \int_0^{\pi/2} \prod_{n=1}^N M_h \left(-\frac{(2i+1)^2 \cdot g}{\sin^2 \theta} \right) d\theta \right). \quad (17)$$

На основе выражений (12-17) строятся графики зависимости вероятности ошибки от отношения С/Ш и параметра Райса. С помощью этих графиков определяется допустимое отношение С/Ш в зависимости от допустимой вероятности ошибки и параметра Райса.

Для допустимости применения выражений (12-17) необходимо обеспечить отсутствие корреляция в ветвях разнесения приемных антенн. Известно что при значении коэффициента корреляции $R \leq 0,7$ замирания можно считать некоррелированными.

Выражение для определения величины коэффициента пространственной корреляции R (или нормированной пространственной корреляционной функции) замираний в канале (радиолинии) связи:

$$R = \exp\left(-\left(\Delta\rho_a / \Delta\rho_k\right)^2\right). \quad (18)$$

Известно, что в однолучевом ДКМ канале связи интервал пространственной корреляции замираний $\Delta\rho_k$, определяется согласно выражению:

$$\Delta\rho_k = l_s \cdot \sqrt{-\ln\left(1 - \frac{1 - \ln(1 - \exp(-\sigma_\varphi^2)) + \exp(1 - \sigma_\varphi^2)}{\sigma_\varphi^2}\right)} \quad (19)$$

На основе выражений (18-19) получено выражения для определения допустимого разноса антенн $\Delta\rho_{а доп}$, что бы обеспечить соблюдение условия некоррелированности замираний:

$$R = \exp\left(-\left(\Delta\rho_a / \Delta\rho_k\right)^2\right) \leq 0,7. \quad (20)$$

Для определения допустимого разноса антенн $\Delta\rho_{а доп}$ выражение (20) преобразовано в следующие выражение:

$$\Delta\rho_{а доп} \geq \Delta\rho_k \sqrt{\ln(0,7)^{-1}} = 0,71\Delta\rho_k. \quad (21)$$

Таким образом совокупность выражения (6, 12-17, 21) позволяет получить искомую функциональную зависимость:

$$Z_{доп} = \psi\left\{\gamma^2, n, \Delta\rho_{а доп}, g, M, P_{ош, доп} = 10^{-5}\right\} = \psi\left\{f_0 / f_m, \beta_i, n, \Delta\rho_{а доп}, g, M\right\}. \quad (22)$$

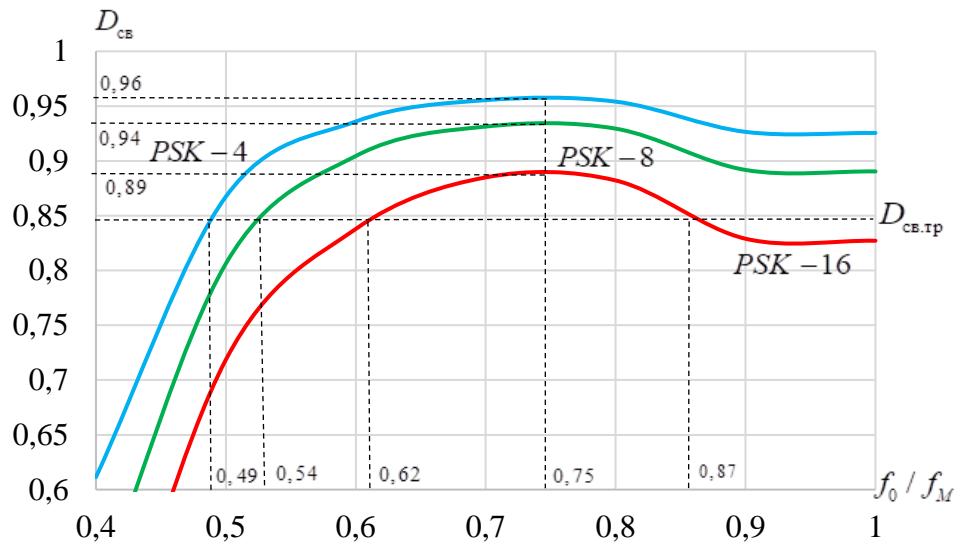
На основе выражений (9), а также выражений (6, 12-17, 21) получена зависимость надежности ДКМ КС при разнесенном приеме многократных цифровых

сигналов с замираниями Райса в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ и уровня диффузности ионосферы:

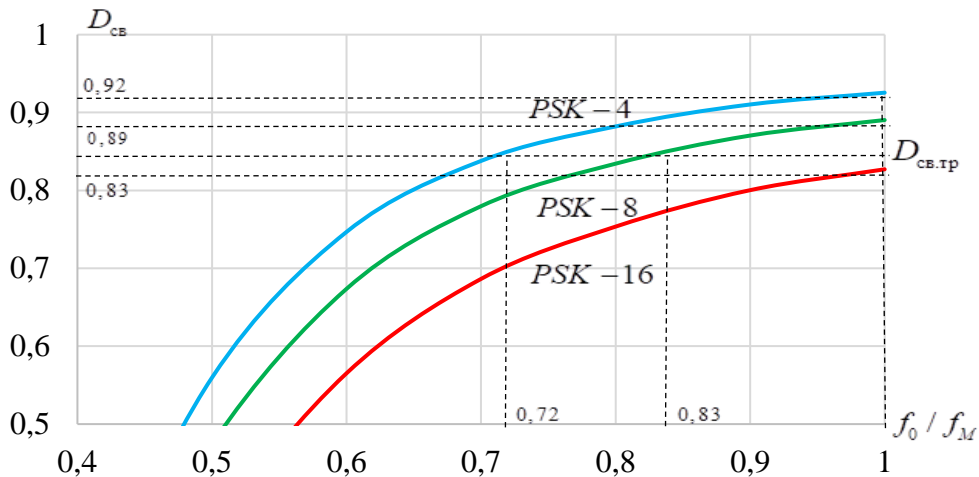
$$D_{\text{св}} = F \left\{ \left[\bar{Z}(f_0 / f_M) - Z_{\text{доп}}(\gamma^2, n, g, M, \Delta\rho_{\text{а доп}}, P_{\text{ош доп}} = 10^{-5}) \right] / \sigma_Z \right\} = \quad (23)$$

$$= F \left\{ \left[\bar{Z}(f_0 / f_M) - Z_{\text{доп}}(f_0 / f_M, \beta_{\text{и}}, n, g, M, \Delta\rho_{\text{а доп}}) \right] / \sigma_Z \right\}.$$

В качестве примера на рисунке 5 представлены графики зависимости $D_{\text{св}}$ надежности связи при сдвоенном приеме ($n=2$) сигналов PSK с кратностью модуляции $M=4$, $M=8$, $M=16$, при мощности передатчика 1000 Вт и степени диффузности ионосферы (а - $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$, б - $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$).



а)



б)

Рисунок 5 – Зависимости $D_{\text{св}}(f_0 / f_M, \beta_{\text{и}})$ для вида модуляции PSK ($M=4$, $M=8$, $M=16$), в условиях нормальной а) $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-3}$ и сильной диффузности б) $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$ при мощности передатчика 1000 Вт и $n=2$

В результате решения второй частной научной задачи получена искомая зависимость в виде совокупности выражений (6, 9, 12-17, 21), которая устанавливает функциональную зависимость:

$$D_{\text{св}} = \Psi\{\gamma^2, n, \Delta\rho_{\text{а доп}}, g, M, P_{\text{ош. доп}} = 10^{-5}\} = \Psi\{f_0 / f_M, \beta_{\text{и}}, n, \Delta\rho_{\text{а доп}}, g, M\} \quad (24)$$

надежности ДКМ КС при разнесенном некоррелированном приеме многократных цифровых сигналов с замираниями Райса в зависимости от выбора отношения рабочей частоты к МПЧ (f_0 / f_M), вида модуляции (g), кратности модуляции (M), кратности разнесения приемных антенн (n), допустимой дистанции разноса приемных антенн ($\Delta\rho_{\text{а доп}}$) и уровня диффузности ионосферы.

В результате решения **3-ей частной научной задачи** разработана методика выбора параметров ДКМ КС в условиях диффузности ионосферы для обеспечения требуемой надежности связи на основе результатов оценки уровня диффузности ионосферы.

На основе разработанной методики разработан алгоритм выбора параметров ДКМ КС в условиях диффузности ионосферы для обеспечения требуемой надежности связи на основе результатов оценки уровня диффузности ионосферы показанный на рисунке 6.

На основе алгоритма выбора параметров ДКМ КС разработанного в разделе 3 и рисунка 7 разработаны практические рекомендации по обеспечению требуемой надежности связи в однолучевом ДКМ КС ($D_{\text{св.тр}} = 0,85$ при $P_{\text{ош. доп}} = 10^{-5}$) с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы.

За счет решения общей научной задачи достигнута цель диссертационного исследования по обеспечению требуемой надежности связи в однолучевом ДКМ канале ($D_{\text{св.тр}} = 0,85$ при $P_{\text{ош. доп}} = 10^{-5}$) с многократными цифровыми сигналами (M -PSK, M -QAM) в условиях диффузности ионосферы. Результаты зондирования уровня диффузности ионосферы и применения разработанной методики выбора параметров ДКМ КС позволяют в условиях сильной диффузности ионосферы обеспечить повышение надежности ДКМ канала связи с многократными цифровыми сигналами на 55...64% за счет разнесенного приема на $n=2-4$ антенны и на 11...16 % за счет выбора кратности (M) и вида модуляции.

На основе совокупности полученных результатов диссертационного исследования разработана структура комплекса оценки надежности и выбора параметров ДКМ КС в условиях диффузности ионосферы на основе результатов GPS-зондирования. При разработке основных блоков комплекса были использованы решения, новизна которых подтверждена 1 патентом на изобретение, 1 патентом на полезную модель и 2 свидетельствами о регистрации программы для ЭВМ.

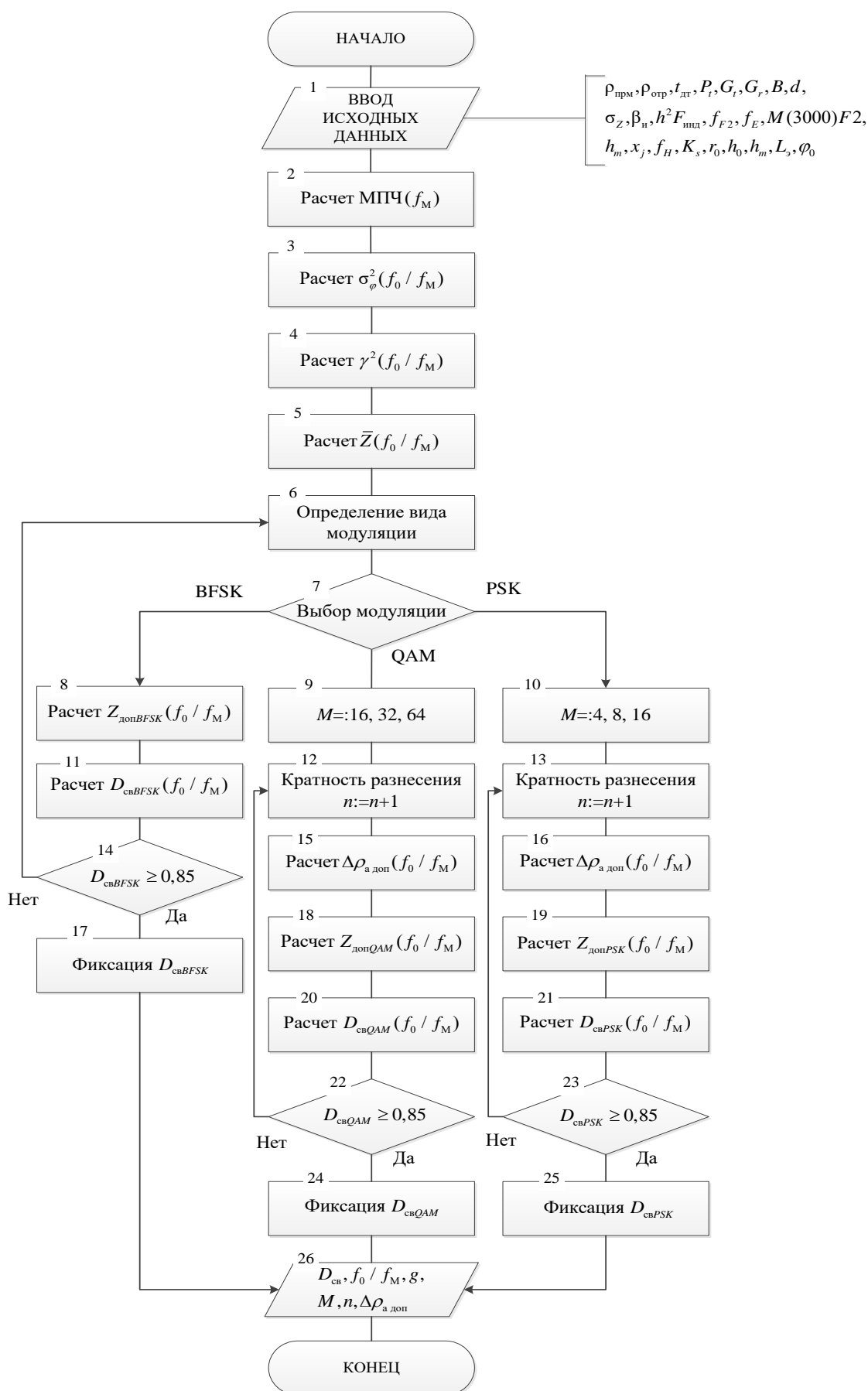


Рисунок 6 – Блок-схема алгоритма выбора параметров ДКМ КС в условиях диффузности ионосферы для обеспечения требуемой надежности связи на основе результатов оценки уровня диффузности ионосферы

Таким образом, совокупность выражений (3-6, 10, 12-17, 21, 23) и алгоритм представленный на рисунке 6 позволяют получить требуемый научный результат:

$$(f_0 / f_M, g, M, n, \Delta\rho_{\text{а доп}}) = \psi(P_{\text{ош доп}}, D_{\text{св.тр}}, \beta_{\text{и}}) \quad (25)$$

решения третьей частной научной задачи, который совпадает с требуемым результатом решения общей научной задачи диссертационного исследования.

Четвертая глава посвящена разработке практических рекомендаций и технических решений по обеспечению требуемой надежности ДКМ КС с цифровыми сигналами в условиях диффузности ионосферы. В качестве примера использования разработанного в разделе 3 алгоритма оценки надежности ДКМ КС с цифровыми сигналами на практике на рисунке 7 приведены результаты оценки надежности ДКМ КС.

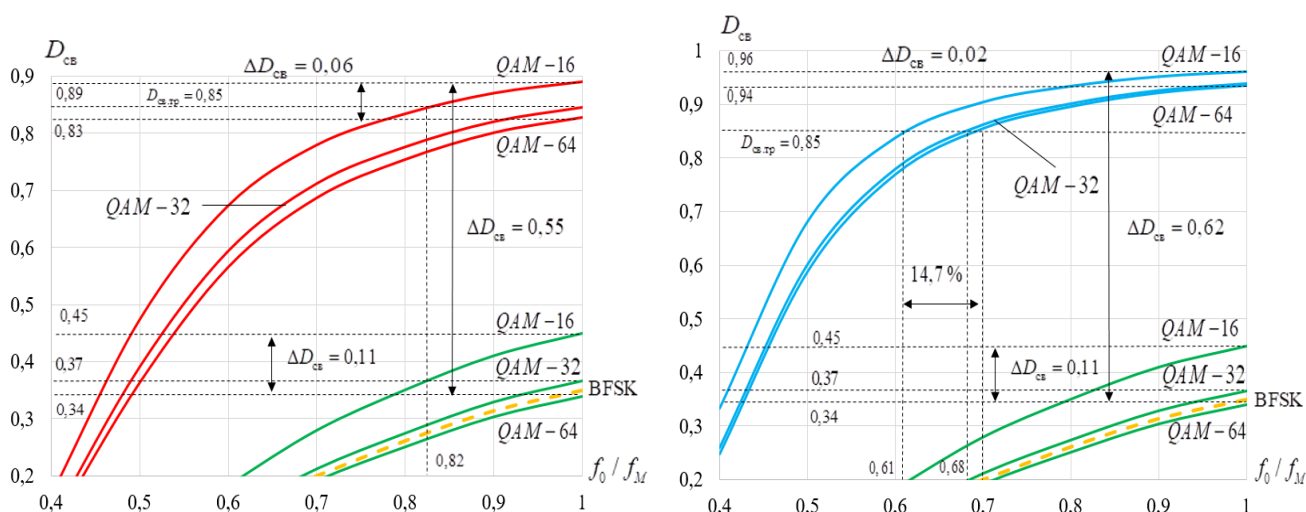


Рисунок 7 – Зависимость надежности ДКМ КС для вида модуляции QAM ($M=16, 32, 64$) в условиях сильной диффузности $\beta_{\text{и}} = 5 \cdot 10^{-2}$ при одиночном приеме ($n=1$) и разнесенном приеме на ($n=2$) и ($n=4$) антенны

Полученные результаты позволяют сделать вывод о достижении поставленной практической цели диссертационного исследования и могут служить основой для разработки перспективных систем ДКМ радиосвязи, в которых обеспечивается требуемая надежность при работе в условиях диффузности ионосферы естественного или искусственного происхождения.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие результаты и положения:

1. Разработана методика системного анализа проблемы обеспечения требуемой помехоустойчивости и надежности однолучевого ДКМ КС в условиях диффузности

ионосферы (возрастания ее уровня), которая позволила обосновать выбор пути разрешения выявленного противоречия в практике и сформулировать научную задачу разработки методики параметрического синтеза ДКМ КС на основе результатов зондирования ионосферы.

2. Разработана методика оценки надежности ДКМ КС при одиночном приеме сигналов BFSK с замираниями Райса в условиях диффузности ионосферы. В отличие от известных, предложенная методика позволяет более достоверно оценить надежность связи, так как в однолучевом ДКМ канале преобладают райсовские замирания сигнала.

3. Разработана методика оценки надежности ДКМ КС при разнесенном приеме цифровых сигналов (*M*-PSK, *M*-QAM) с замираниями Райса в условиях диффузности ионосферы. В отличие от известных, предложенная методика позволяет учесть влияние диффузности ионосферы при оценке надежности ДКМ КС с цифровыми сигналами.

4. Разработана методика выбора параметров ДКМ КС в условиях диффузности ионосферы для обеспечения требуемой надежности связи на основе результатов оценки уровня диффузности ионосферы. В отличие от известных, предложенная методика позволяет осуществить многопараметрическую адаптацию ДКМ КС за счет выбора: отношения рабочей частоты к МПЧ, вида и кратности модуляции, характеристик разнесения приемных антенн (количества и дистанции допустимого разноса приемных антенн).

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России и базы данных RSCI:

1. Пашинцев, В. П. Методика оценки надежности связи в коротковолновой радиолинии с райсовскими замираниями с учетом диффузности ионосферы / В. П. Пашинцев, Д. А. Белоконов, С. А. Коваль, А. Д. Скорик // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2022. – Т. 25, № 6. – С. 22–39. – 2,08 / авт. вклад 0,55 п. л.

2. Коваль, С. А. Метод определения интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровый радиолинии / С. А. Коваль, В. П. Пашинцев, В. В. Копытов, С. С. Манаенко, Д. А. Белоконов // Системы управления, связи и безопасности. – 2022. – № 1. – С. 67–103. – 1,8 / авт. вклад 0,2 п. л.

3. Пашинцев, В. П. Влияние требований к достоверности на надежность связи в коротковолновой радиолинии с райсовскими замираниями с учетом диффузности ионосферы / В. П. Пашинцев, Д. А. Белоконов // Двойные технологии. – 2023. – № 4. – С. 59–64. – 1,04 / авт. вклад 0,32 п. л.

4. Пашинцев, В. П. Методика определения зависимости среднеквадратического отклонения отношения сигнал-помеха в декаметровый радиолнии от выбора частоты / В. П. Пашинцев, Е. М. Гринев, А. Д. Скорик, **Д. А. Белоконов** // Системы управления, связи и безопасности. – 2023. – № 2. – С. 63–80. – 2,1 / авт. вклад 0,2 п. л.

5. Пашинцев, В. П. Область применимости приближенной формулы для допустимого отношения сигнал/помеха при расчете надежности коротковолновой связи с райсовскими замираниями / В. П. Пашинцев, **Д. А. Белоконов**, И. А. Бойченко, Е. М. Гринев // Известия института инженерной физики. – 2024. – № 1 (71). – С. 25–30. – 0,69 / авт. вклад 0,22 п. л.

6. Пашинцев, В. П. Методика оценки влияния диффузности ионосферы и выбора рабочей частоты на помехоустойчивость коротковолновой связи / В. П. Пашинцев, **Д. А. Белоконов**, В. А. Цимбал [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2024 – № 12. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec24/2/text.pdf>.

7. Пашинцев, В. П. Методика прогнозирования пропускной способности канала спутниковой связи при мелкомасштабных возмущениях ионосферы, возникновении частотно-селективных замираний и межсимвольной интерференции / В. П. Пашинцев, П. А. Диптан, **Д. А. Белоконов** // Системы управления, связи и безопасности. – 2025. – № 1. – С. 156–186. – 3,6 / авт. вклад 0,49 п. л.

8. Пашинцев, В. П. Пропускная способность коротковолнового канала связи с райсовскими замираниями при передаче сигналов с цифровыми видами модуляции / В. П. Пашинцев, **Д. А. Белоконов** // Известия института инженерной физики. – 2025. – № 1. – С. 23–29. – 0,86 / авт. вклад 0,27 п. л.

9. Пашинцев, В. П. Зависимость пропускной способности однолучевого коротковолнового канала связи от степени диффузности ионосферы и выбора рабочей частоты / В. П. Пашинцев, **Д. А. Белоконов**, П. А. Диптан // Известия института инженерной физики. – 2025. – № 2 (76). – С. 25–31. – 0,75 / авт. вклад 0,25 п. л.

Публикации в других научных изданиях:

10. Пашинцев, В. П. Повышение достоверности оценки надежности связи в декаметровый радиолнии / В. П. Пашинцев, **Д. А. Белоконов** // XL Всероссийская научно-техническая конференция проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем. – Серпухов: филиал ВА РВСН, – 2021. – С. 30–35. – 0,33 / авт. вклад 0,11 п. л.

11. Пашинцев, В. П. Сравнительный анализ методик оценки надежности декаметровый связи / В. П. Пашинцев, Е. М. Гринев, П. А. Диптан, **Д. А. Белоконов** // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – REDS-2023: доклады 78-й Международной конференции. – Москва: РНТОРЭС им. А.С. Попова, – 2023. – С. 253–255. – 0,31 / авт. вклад 0,1 п. л.

12. **Белоконь, Д. А.** Анализ зависимости помехоустойчивости цифровых видов модуляции от степени диффузности ионосферы / **Д. А. Белоконь, Н. В. Карпенко** // Новые информационные технологии в системах связи и управления: труды XXIII Российской межведомственной научно-технической конференции. – Калуга, 2024. – С. 158–164. – 0,23 / авт. вклад 0,13 п. л.

13. Пашинцев, В. П. Пропускная способность спутникового канала связи с частотно-селективными замираниями и межсимвольной интерференцией / В. П. Пашинцев, П. А. Диптан, Е. М. Гринев, **Д. А. Белоконь, Н. В. Киселев** // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – REDS-2024: доклады 79-й Международной конференции. – Москва: РНТОРЭС им. А. С. Попова, – 2024. – С. 208–213. – 0,31 / авт. вклад 0,06 п. л.

14. **Белоконь, Д. А.** Оценка помехоустойчивости в коротковолновой радиолинии с фазовой и квадратурно-амплитудной модуляцией в зависимости от уровня диффузности ионосферы и выбора рабочей частоты / **Д. А. Белоконь, В. П. Пашинцев, Н. В. Киселев** // Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий – REDS-2024: доклады 79-й Международной конференции. – Москва: РНТОРЭС им. А. С. Попова, 2024. – С. 218–223. – 0,31 / авт. вклад 0,06 п. л.

15. Пашинцев, В. П. Влияние мелкомасштабных возмущений ионосферы на пропускную способность канала спутниковой связи Р-диапазона частот / В. П. Пашинцев, П. А. Диптан, **Д. А. Белоконь, Е. М. Назаренко** // Радиолокация, навигация, связь: материалы 31-й Международной научно-технической конференции. – Воронеж: Созвездие, 2025. – С. 229–238. – 0,22 / авт. вклад 0,09 п. л.

16. Пашинцев В. П. Влияние требований к достоверности на надежность связи в коротковолновой радиолинии с райсовскими замираниями и учетом диффузности ионосферы / В. П. Пашинцев, П. А. Диптан, **Д. А. Белоконь, Е. М. Назаренко** // Радиолокация, навигация, связь, материалы 31-й Международной научно-технической конференции. – Воронеж: ВГУ, АО «Концерн “Созвездие”», 2025. С. 229–238. – 0,22 / авт. вклад 0,09 п. л.

Объекты интеллектуальной собственности:

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664360 Российская Федерация. Программа оценки надежности связи в декаметровая радиолинии в зависимости от выбора рабочей частоты с учетом одновременного изменения сигнально-помеховой обстановки и диффузности ионосферы: № 2020665508: заявл. 05.03.2020: опубл. 27.11.2020 / **Д. А. Белоконь** [и др.]; патентообладатель Концепт. – 21 с.

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024610350 Российская Федерация. Программа определения интервала частотной корреляции замираний в однолучевой декаметровая радиолинии: № 2024619078:

заявл. 09.01.2024: опубл. 18.04.2024 / **Д. А. Белоконь** [и др.]; патентообладатель **Д. А. Белоконь**. – 30 с.

19. Патент 2796656 Российская Федерация, МПК H04L 1/00. Способ адаптации декаметровый радиосвязи по ширине спектра передаваемых сигналов: № 2022118490: заявл. 07.07.2022: опубл. 29.05.2023, бюл. № 16 / Пашинцев В. П., Коваль С. А., Цимбал В. А., Скорик А. Д., Тоискин В. Е., Песков М. В., Сенокосов М. А., Литвинов А. И., Михайлов Д. А., **Белоконь Д. А.**; заявитель и патентообладатель Северо-Кавказский федеральный университет. – 19 с. – Текст : непосредственный.

20. Патент 232607 Российская Федерация, СПК G01S 19/14. Устройство для определения помехоустойчивости цифровых сигналов в декаметровом канале связи в условиях диффузности ионосферы: № 2024136028: заявл. 28.11.2024: опубл. 17.03.2025, бюл. № 9 / В. П. Пашинцев, **Д. А. Белоконь**, С. А. Коваль, П. А. Диптан, Д. А. Михайлов, А. Д. Скорик, А. Э. Володин; заявитель и патентообладатель Белоконь Дмитрий Александрович. – 11 с.