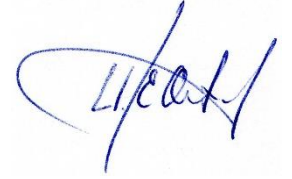


*На правах рукописи*



**Ефременков Иван Дмитриевич**

**МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ТУРБОКОДА СИСТЕМЫ ОСТАТОЧНЫХ  
КЛАССОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ПОВЫШЕНИЕ  
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ БЕСПРОВОДНЫХ СИСТЕМ  
СТАНДАРТА LTE-R**

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: **Калмыков Игорь Анатольевич**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Ажмухамедов Искандар Маратович**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры информационной безопасности ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет имени В.Н. Татищева», г. Астрахань

**Ищукова Евгения Александровна**  
кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры безопасности информационных технологий им. О.Б. Макаревича Инженерно-технологической академии ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Таганрог

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Защита состоится «25» июня 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.398.02 при ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» по адресу: 355017, г. Ставрополь, 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 СКФУ:  
[https://ncfu.ru/upload/medialibrary/aa8/jtftcqqjy0k72huo4ajlnrxke3s4b692/Efremenkov\\_ID\\_dissertaciya.pdf](https://ncfu.ru/upload/medialibrary/aa8/jtftcqqjy0k72huo4ajlnrxke3s4b692/Efremenkov_ID_dissertaciya.pdf)

С авторефератом можно ознакомиться на сайте ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»: <https://ncfu.ru/nauka/dissertatsionnyesovety/obyavleniya-o-zashchite-dissertatsiy/31386/>

Автореферат разослан « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор



Г.В. Шагрова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы и направление исследований.** В настоящее время при построении радиосетей управления железнодорожного транспорта (ЖТ) наибольшее распространение получил стандарт GSM-R. Для обеспечения достоверного обмена данными между центрами оперативного управления и машинистом, а также между объектами ЖТ в этом стандарте используется помехоустойчивый непрерывный сверточный код (НСК). Однако, несмотря на свои достоинства стандарт GSM-R постепенно заменяется на новый стандарт LTE-R.

Повышение качества управления движением и обслуживания пассажиров на ЖТ в новом стандарте достигается за счет применения технологии OFDM и помехоустойчивых сверточных турбокодов (СТК). Выбор СТК для обеспечения помехоустойчивости беспроводных систем передачи данных (БСПД) стандарта LTE-R связан с тем, что эти коды имеют высокую скорость кодирования и декодирования. В результате этого время кодирования и декодирования в СТК оказывает минимальное негативное воздействие на скорость передачи данных в БСПД с OFDM.

Однако, СТК не обеспечивают максимально возможный уровень помехоустойчивости. Поэтому дальнейшее повышение помехоустойчивости БСПД с OFDM, возможно за счет применения блочного турбокода (БТК). Однако, БТК не используются в системах LTE-R, так затраты на формирование и проверку горизонтальных и вертикальных избыточных кодовых комбинаций (КК) в кодовом слове БТК значительно превосходят время вычисления контрольных разрядов и проверку КК СТК. Поэтому, время формирования помехоустойчивого сигнала OFDM на основе БТК требует больших временных затрат по сравнению СТК, что снижает скорость передачи данных в БСПД.

Проведенные исследования позволили выявить следующую **проблему на практике**. С одной стороны, для эффективного решения задач по управлению и обеспечению безопасности ЖТ в сложной помеховой обстановке в стандарте LTE-R используются сверточные турбокоды, которые при отношении сигнал/шум равного 7 дБ обеспечивают вероятность ошибки  $BER = 2 \cdot 10^{-5}$ . С другой стороны, блочные турбокоды, построенные на основе циклических кодов и имеющие при данном отношении сигнал/шум вероятность ошибки  $BER = 2 \cdot 10^{-6}$ , не применяются в стандарте LTE-R, так как не обеспечивают временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM соизмеримые с затратами при использовании СТК.

Отсюда следует, что прагматическая цель исследований – повышение помехоустойчивости системы передачи, поддерживающей стандарт LTE-R, за счет применения блочного турбокода, обеспечивающего временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM соизмеримые с затратами при использовании СТК.

Для решения этого противоречия и достижения прагматической цели была выдвинута гипотеза исследований – необходимо разработать такой метод построения блочного турбокода, который бы обеспечил более высокую помехоустойчивость по сравнению СТК стандарта LTE-R, а временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM были соизмеримы с затратами

при использовании СТК. Это можно достичь если временные затраты на кодирование и декодирование кодовых слов в БТК будут компенсированы за счет сокращения времени на выполнение цифровой обработки сигналов (ЦОС) в БСПД, поддерживающих стандарт LTE-R. В ходе исследований был проведен анализ работ, в которых ЦОС в системах с OFDM выполнялась на основе параллельных кодов системы остаточных классов (СОК). Выбор этих кодов обусловлен тем, что операции сложения, вычитания и умножения, выполняются в СОК параллельно и с малоразрядными остатками. Поэтому применение СОК в БСПД с OFDM позволяет сократить временные затраты на ЦОС по сравнению с позиционным кодом (ПК). Значит полученный выигрыш во времени можно использовать для компенсации временных затрат на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM на основе БТК.

Среди отечественных ученых, которые обеспечили становление и развитие теории построения кодов СОК, можно отметить: Акушского И.Я., Амербаева В.М., Бабенко М.Г., Калмыкова И.А., Коляду А.А., Пака И.Т., Торгашева В.А., Финько О.А., Червякова Н.И., Юдицкого Д.И. и других. Среди зарубежных ученых, посвятивших свои исследования СОК, можно отметить: Fraenkel A.S. Garner H.L., Hanzo L., Huang A.M., Jenks W.A., Keller T., Krishna H.H., Liew T.H., Mohan A., Omondi A., Purhami B.C., Szabo N., Valach M., Yang L. и других.

Очевидно, что проблема повышения помехоустойчивости беспроводных систем, поддерживающих стандарт LTE-R, под которой понимается способность беспроводной системы передачи данных правильно принимать информацию, несмотря на воздействие помех на нее в канале связи, является актуальной, имеет множество альтернативных решений и еще не разрешена полностью. Появление этой проблемы связано с тем, что желаемое состояние системы не соответствует тому, в котором эта система сейчас находится. Проведенные исследования показали, что разработка метода построения турбокода СОК является решением проблемы, которая была выявлена в процессе развития системы. Решение данной проблемы позволит обеспечить более эффективное функционирование за счет совершенствования сложной системы. В результате таких решений произойдет изменение структуры самой системы, что приведет к улучшению ее характеристик. Кроме того, выявленная проблема является слабоструктурированной, для которой характерно одновременное количественное и качественное описание. При этом, предполагаемое ее решение находится на стыке нескольких предметных областей. То есть, в этом случае полученная новая предметная область имеет пока не полное формальное описание. В этом случае для решения проблем такого типа разрабатывается множество альтернативных решений, каждое из которых имеет свою эффективность. Выбрать наиболее эффективное решение можно с помощью методов системного анализа. Поэтому в диссертации был сделан вывод о целесообразности применения научно-методологического аппарата системного анализа (НМАСА) для решения проблемы, связанной с повышением помехоустойчивости БСПД, стандарта LTE-R. Известно, что наибольший эффект от применения НМАСА наблюдается в ситуациях, когда существует множество альтернативных решений выявленной проблемы. В диссертации был проведен сравнительный анализ альтернативных методов повышения помехоустойчивости

беспроводных систем передачи данных, поддерживающих стандарт LTE-R. В качестве альтернатив были рассмотрены методы построения СТК, БТК на основе циклических кодов, а также БТК СОК. Полученные результаты позволили сделать вывод, что известный БТК СОК, имея более высокую помехоустойчивость по сравнению с альтернативными решениями, не обеспечивает минимально возможные временные затраты на вычисление проверочных остатков и их проверку. В результате этого временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM не соизмеримы с затратами при использовании СТК.

Для устранения данного недостатка был проведен сравнительный анализ альтернативных алгоритмов обнаружения и коррекции ошибок, таких как, проекция, нулевизация, вычисление старших коэффициентов полиадической системы счисления (ПоСС) и позиционной характеристики (ПХ) интервал на основе функции Эйлера. Проведенный анализ показал, что эти алгоритмы обладают большими временными затратами. Поэтому разработка алгоритма коррекции, обладающего меньшим временем на поиск и исправление ошибок в коде СОК, является актуальной задачей.

Так как временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM также зависят от времени вычисления проверочных символов, то диссертации был проведен сравнительный анализ алгоритмов расширения кортежа остатков кода СОК. На основе анализа был выбран алгоритм, обладающий минимальным временем вычисления контрольных остатков. Однако при реализации этого алгоритма происходит уменьшение рабочего диапазона разрешенных КК СОК в несколько раз. Поэтому разработка алгоритма, обеспечивающего соизмеримые временные затраты на расширения кортежа остатков кода СОК без снижения величины рабочего диапазона, является актуальной задачей.

Проведенные исследования позволили сформулировать **противоречие в теории**. Оно состоит в следующем. Методы построения сверточных турбокодов, имеющих высокую скорость кодирования, не обеспечивают максимально возможную помехоустойчивость беспроводных систем передачи данных стандарта LTE-R. При этом известный метод построения блочного турбокода, использующий избыточные коды системы остаточных классов и обладающий большей корректирующей способностью по сравнению с СТК и меньшими временными затратами на кодирование и декодирование по сравнению с БТК, не позволяет достичь поставленной практической цели без его усовершенствования за счет разработки новых алгоритмов расширения кортежа и коррекции ошибок, а также метода построения турбокода СОК.

**Объект диссертационных исследований** – беспроводные системы передачи данных, поддерживающие стандарт LTE-R.

**Цель диссертационной работы** – повысить помехоустойчивость системы передачи стандарта LTE-R на основе метода построения турбокода, в котором за счет применения кодов СОК временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM будут соизмеримыми с затратами при использовании СТК.

**Предметы исследования:** математический аппарат непозиционной системы остаточных классов; алгоритмы расширения кортежа остатков и коррекции ошибок в кодовых комбинациях СОК; методы построения турбокодов.

**Научная задача диссертационных исследований** состоит в применении научно-методологического аппарата системного анализа при разработке метода построения блочного турбокода, обеспечивающего повышение помехоустойчивости БСПД, в котором за счет новых алгоритмов расширения кортежа остатков и коррекции ошибок в кодовых комбинациях СОК временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM будут соизмеримы с затратами при использовании СТК.

Для обеспечения эффективного решения общей научной задачи диссертации был использован метод декомпозиции. Ее декомпозиция позволила получить **частные задачи:**

1. Разработка алгоритма коррекции ошибок в кодах системы остаточных классов, построенный на основе изоморфизма Китайской теоремы об остатках, применение которого позволяет повысить скорость поиска и исправления ошибок в коде СОК.

2. Разработка алгоритма расширения кортежа остатков кода СОК, применение которого обеспечивает вычисление избыточных остатков без снижения величины рабочего диапазона.

3. Разработка метода построения турбокода СОК, применение которого обеспечивает при одинаковых корректирующих способностях более высокую скорость кодирования по сравнению с классическими избыточными кодами СОК.

4. Разработка структурной схемы системы передачи данных, поддерживающей стандарт LTE-R, в которой применение турбокода СОК позволяет обеспечить более высокий уровень помехоустойчивости по сравнению с турбокодами сверточного кода при соизмеримых временных затратах на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM, использующего СТК.

При этом решение первых трех научных частных задач обеспечивает решение практической задачи для достижения практической цели.

**Методы исследования.** В ходе выполнения исследований были использованы методы системного анализа, методы и алгоритмы построения корректирующих кодов СОК, методы построения турбокодов.

**Научная новизна диссертационной работы:**

1. Разработан алгоритм коррекции ошибок в кодах системы остаточных классов, отличающийся от ранее известных использованием изоморфизма Китайской теоремы об остатках (КТО) при вычислении интервального номера числа и обладающий меньшими временными затратами на поиск и коррекцию ошибок в коде СОК.

2. Разработан алгоритм расширения кортежа остатков кода СОК, отличающийся от ранее известных использованием изоморфизма, порожденного КТО, при вычислении интервального номера числа и обеспечивающий вычисление избыточных остатков без снижения величины рабочего диапазона.

3. Разработан метод построения турбокода СОК, отличающийся от ранее известного использования единой алгебраической системы при формировании

кодированного слова ТК СОК и обеспечивающий при одинаковых корректирующих способностях более высокую скорость кодирования по сравнению с классическими избыточными кодами СОК.

**Практическая значимость результатов** данной работы:

1. В ходе выполнения исследований была разработана структурная схема беспроводной системы, поддерживающей стандарт LTE-R, в которой применение турбокода СОК позволяет обеспечить более высокий уровень помехоустойчивости по сравнению с турбокодами сверточного кода при соизмеримых временных затратах на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM.

**Основные положения**, выносимые на защиту:

1. Алгоритм коррекции ошибок в кодах системы остаточных классов, построенный на основе изоморфизма Китайской теоремы об остатках, применение которого позволяет повысить скорость поиска и исправления ошибок в коде СОК.

2. Алгоритм расширения кортежа остатков кода СОК, применение которого обеспечивает вычисление избыточных остатков без снижения величины рабочего диапазона.

3. Метод построения турбокода СОК, применение которого обеспечивает при одинаковых корректирующих способностях более высокую скорость кодирования по сравнению с классическими избыточными кодами СОК.

4. Структурная схема системы, поддерживающей стандарт LTE-R, в которой применение турбокода СОК позволяет обеспечить более высокий уровень помехоустойчивости по сравнению с турбокодами сверточного кода при соизмеримых временных затратах на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика. Отрасль – технические науки. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности и пунктам паспорта: п. 2. Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта; п. 4. Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта.

**Достоверность и обоснованность** определяется строгостью проводимых математических доказательств, в получении которых был использован научно-методологический аппарат системного анализа, методы и алгоритмы построения корректирующих кодов системы остаточных классов, а также методы построения турбокодов. Справедливость полученных в диссертации научных результатов подтверждается проведением сравнительного анализа разработанного метода построения турбокода СОК с известными ранее.

**Апробация работы.**

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Международной научно-практической конференции «Развитие науки и техники: механизм выбора и реализации приоритетов», Екатеринбург, 2017; Международной научно-

практической конференции «Фундаментальные проблемы науки», Казань, 2017; Международной научно-практической конференции «Проблемы внедрения результатов инновационных разработок», Стерлитамак, 2017; Международной научно-практической конференции «Фундаментальные проблемы основных направлений научно-технических исследований», Волгоград, 2018; Международной научно-практической конференции «Развитие науки и техники: механизмы выбора и реализации приоритетов», Самара, 2018; Международной научно-практической конференции «Технические системы и технологические процессы», Стерлитамак, 2018; Международной научно-практической конференции «Научное обеспечение технического и технологического прогресса», Магнитогорск, 2018; Международного научно-практического форума «Каспий в эпоху цифровой экономики», Астрахань, 2019; 47-я, 48-я Всероссийская научно-техническая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов с международным участием, Октябрьский, 2020, 2021; Всероссийская научно-методическая конференция (с международным участием) «Актуальные вопросы высшего образования – 2020», Октябрьский, 2020; Всероссийской конференции, посвященной «Дню радио» «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий («РЭУС-ИТ 2023»)), Москва, 2023; Международной научно-практической конференции «Инновационные подходы к решению современных проблем: комплексный анализ и практическое применение», Волгоград, 2024; Международной научно-практической конференции «Инновационные исследования: проблемы внедрения результатов и тенденции развития», Самара, 2024.

#### **Публикации.**

Основные результаты диссертационной работы отражены в 32 научных трудах по теме диссертационной работы, в том числе: в 4 статьях в журналах из перечня ВАК по специальности 2.3.1, в 2 статьях в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus, в 4 статьях в других рецензируемых журналах, в 1 патенте РФ на изобретение, в 7 свидетельствах о государственной регистрации программы для ЭВМ, в 14 докладах на Международных и Всероссийских научно-практических конференциях.

**Авторский вклад в разработку.** Все изложенные в диссертационной работе результаты были получены при непосредственном участии автора. В качестве личного авторского вклада можно выделить разработку алгоритма поиска и коррекции ошибок в коде СОК, алгоритма расширения кортежа остатков в коде СОК, метода построения турбокода СОК, структурной схемы помехоустойчивой системы, поддерживающей стандарт LTE-R, использующей турбокод СОК.

**Внедрение.** Согласно акту об использовании результатов диссертационных исследований, основные результаты были внедрены филиалом Военной академии РВСН имени Петра Великого (г. Серпухов) при выполнении раздела № 3 «Повышение устойчивости радиосетей соединения на основе применения современных информационных технологий» НИР «Радиосеть-23». Результаты диссертационного исследования были использованы в проекте № 26096 «Разработка программно-технического комплекса мониторинга инфраструктуры энергетических систем на основе технологий «интернета вещей»», выполняемым

ООО «Инфоком-С», что подтверждается актом внедрения. Также результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедры информационной безопасности автоматизированных систем института цифрового развития ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (г. Ставрополь).

**Объем и структура работы.** Диссертация изложена на 167 страницах основного текста, включает в себя 24 рисунка, 11 таблиц; состоит из введения, трех глав, заключения, приложений и списка используемой литературы, содержащего 117 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** на основе исследований перспектив внедрения в систему управления ЖТ технологий OFDM был выбран объект исследований. Выявлено противоречие на практике. Определена цель проводимых исследований. Обоснована перспективность использования НМАСА для решения проблемы на практике и достижения поставленной цели. Описаны альтернативные методы, применение которых позволяет повысить помехоустойчивость БСПД стандарта LTE-R. На основе анализа этих методов была сформулировано противоречие в теории. Представлена научная задача диссертационных исследований. Описаны частные задачи исследования. Показана научная и практическая значимость диссертационных исследований. Описаны основные положения, которые будут выноситься на защиту.

**В первой главе** диссертации проведены исследования основных ИТ, применяемых в беспроводных сетях связи ЖТ и поддерживающих стандарты GSM-R и LTE-R. Проведен анализ основных способов повышения помехоустойчивости радиосетей управления и сбора данных, используемых на ЖТ. Показаны достоинства и недостатки СТК и БТК. Для устранения недостатков БТК был проведен анализ основных моделей структур систем с OFDM. Показана перспективность использования моделей систем OFDM, в которых ЦОС выполняется на основе параллельных кодов СОК. Сделан вывод о целесообразности разработки метода построения турбокода в СОК. Сформулированы противоречие на практике и цель проводимых исследований. Проведено обоснование использования НМАСА для достижения поставленной цели. Проведен сравнительный анализ методов повышения помехоустойчивости, БСПД стандарта LTE-R. Сформулировано противоречие в теории. Произведен выбор критерия качества для оценки эффективности различных методов повышения помехоустойчивости БСПД стандарта LTE-R. Сформулирована научная задача диссертационных исследований, а также ее математическая постановка:

$$W(B, L, \{p_n\}, \{p_\rho\}, M, E, U) \rightarrow \{\Delta P_{BER}\}, \Delta P_{BER} > 0, \quad (1)$$

$$P_n \geq 2^{L(\max)}, T_{БТК\text{СОК}} < T_{БТК}, d_{ТК} \geq d_{нред},$$

где  $W = \{W_1, \dots, W_s\}$  – множество методов построения ТК;  $B = \{B_1, \dots, B_G\}$  – множество методов построения избыточных кодов;  $L = \{L_1, \dots, L_D\}$  – размерность пакетов сообщений, поступающих на вход кодера;  $\{p_n\}$  и  $\{p_\rho\}$  – множество наборов

информационных и контрольных оснований;  $M = \{M_1, \dots, M_z\}$  – множество алгоритмов коррекции ошибок в кодах СОК;  $E = \{E_1, \dots, E_H\}$  – множество алгоритмов расширения кортежей в СОК;  $U = \{U_1, \dots, U_Q\}$  – множество методов перемежения в ТК;  $\Delta P_{BER} = P_{BER}^* - P_{BER}^{W_j}$  – уменьшение вероятности появления битовой ошибки  $P_{BER}$  при использовании  $W_j$  метода построения ТК;  $P_{BER}^*$  – вероятность появления битовой ошибки в БСПД без использования помехоустойчивых кодов;  $T_{БТК\ СОК}$  и  $T_{БТК}$  – время обработки сигнала в БТК СОК и БТК на основе циклических кодов;  $P_n$  – диапазон разрешенных комбинаций СОК;  $d_{ТК}$  и  $d_{пред}$  – минимальное кодовое расстояние БТК и предельное значение.

Используя НМАСА, было построено «дерево целей» диссертации. На основе «дерева целей» выполнена декомпозиция научной задачи диссертационных исследований на 4 частные задачи.

**Во второй главе** представлены решения первых двух частных задач исследования. Первая частная задача связана с разработкой алгоритма коррекции ошибок в кодах СОК. Для этого в главе были рассмотрены основные принципы построения кодов СОК. В коде СОК в качестве оснований выбираются попарно простые числа  $p_1, p_2, \dots, p_n$ , где  $p_1 < p_2 < \dots < p_n$ . Их произведение дает рабочий диапазон, который определяет количество разрешенных кодовых комбинаций:

$$P_n = \prod_{i=1}^n p_i. \quad (2)$$

Тогда целое число  $X < P_n$ , можно представить в виде:

$$X = (X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (3)$$

где  $X_i = X \bmod p_i$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Если в процессе выполнения модульных операций двух чисел  $X$  и  $M$  результат  $C$  не превысит рабочий диапазон, то справедливы равенства:

$$C = X \circ M = \left( X_1 \circ M_1 \Big|_{p_1}^+, X_2 \circ M_2 \Big|_{p_2}^+, \dots, X_n \circ M_n \Big|_{p_n}^+ \right), \quad (4)$$

где  $\circ$  – операции сложения, вычитания и умножения;  $M_i \equiv M \bmod p_i$ ;  $i = 1, \dots, n$ .

Согласно (4) модульные операции выполняются параллельно и независимо по основаниям кода СОК. При этом используются малоразрядные остатки. Благодаря этому, повышается скорость вычислений.

Для выполнения прямого преобразования из ПК в код СОК было выбрано  $M$ -арное представление двоичного кода, а для обратного СОК-ПК – Китайская теорема об остатках (КТО), так как они обладают меньшими временными затратами.

Для решения первой частной задачи был проведен анализ основных алгоритмов, которые используются для поиска и коррекции ошибок в кодах СОК. Для коррекции однократной ошибки (исправления одного остатка) в код СОК вводят два контрольных основания  $p_{n+1}$ ,  $p_{n+2}$ , для которых:

$$p_{n+1} p_{n+2} > p_{n-1} p_n. \quad (5)$$

В этом случае кодовая комбинация является разрешенной, если:

$$X = (X_1, \dots, X_n, X_{n+1}, X_{n+2}) < P_n. \quad (6)$$

При возникновении ошибки условие (6) нарушается. Поэтому в алгоритмах коррекции ошибок в кодах СОК используются ПХ, с помощью которых проверяется условие (6). В диссертации были рассмотрены алгоритмы: проекции, нулевизации, различные модификации вычисления коэффициентов ПоСС, вычисления ПХ интервал. Рассмотренные алгоритмы имеют недостаток – значительные временные затраты на реализацию. Для устранения этого недостатка был разработан алгоритм коррекции, в котором в вычислениях интервала используется изоморфизм, порожденный КТО. Известно, что:

$$X = \sum_{i=1}^{n+\rho} X_i B_i \bmod P_{n+\rho} = \sum_{i=1}^{n+\rho} X_i B_i - r_X P_{n+\rho}, \quad (7)$$

где  $B_i = m_i P_n / p_i$  – ортогональный базис;  $m_i \delta_i = 1 \bmod p_i$ ;  $\delta_i = B_i \bmod p_i$ ;  $r_X$  – ранг числа  $X$ ;  $\rho$  – количество контрольных оснований.

Тогда ПХ интервал вычисляется согласно:

$$L = \begin{bmatrix} X \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n+\rho} X_i B_i - r_X P_{n+\rho} \\ P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^{n+\rho} X_i B_i - r_X P_n P_\rho \\ P_n \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Упростим выражение (8), разделив ортогональные базисы на  $P_n$ :

$$L = \left| \frac{\sum_{i=1}^{n+\rho} X_i (K_i P_n + \ddot{B}_i)}{P_n} \right|_{P_\rho}^+ = \left| \sum_{i=1}^{n+\rho} X_i K_i + \ddot{r}_X \right|_{P_\rho}^+, \quad (9)$$

где  $B_i = K_i P_n + \ddot{B}_i$ ;  $\ddot{r}_X = \left[ \sum_{j=1}^n X_j \ddot{B}_j / P_n \right]$ ,  $\ddot{B}_i$  – ранг числа  $X$  и ортогональный базис

кода СОК с основаниями  $p_1, p_2, \dots, p_n$ ;  $P_\rho = \prod_{j=n+1}^{n+\rho} p_j$ .

Недостатком алгоритма (9) является вычисления по составному модулю  $P_\rho$ , что снижает скорость вычисления ПХ. Устранить этот недостаток можно за счет использования изоморфизма КТО, согласно которому получаем:

$$\begin{aligned} L_{n+1} &= \left( \sum_{i=1}^{n+\rho} X_i \left| K_i \right|_{P_{n+1}}^+ + \ddot{r}_X \right) \bmod p_{n+1}, \\ &\vdots \\ L_{n+\rho} &= \left( \sum_{i=1}^{n+\rho} X_i \left| K_i \right|_{P_{n+\rho}}^+ + \ddot{r}_X \right) \bmod p_{n+\rho}, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $L_j \equiv L \bmod p_j$ ;  $j = n+1, \dots, n+\rho$ .

Разработанный алгоритм (10) позволяет сократить время на вычисление ПХ интервал. Так при выполнении алгоритма (9) необходимо совершить  $n+\rho$  операций умножений и  $n+\rho-1$  операций сложения по составному модулю  $P_\rho$ , а в разработанном алгоритме (10) – только  $n+1$  операций умножения и сложения,

так как константы  $|K_i|_{p_i}^+$  по контрольным основаниям все нулевые за исключением только одной. В диссертации представлены структурная схема декодера ошибок в СОК, реализующего разработанный алгоритм, а также пример реализации разработанного алгоритма. Для коррекции ошибок были выбраны три информационных основания  $p_1 = 63, p_2 = 64, p_3 = 65$  и два контрольных  $p_4 = 67, p_5 = 77$ . Применение разработанного алгоритма для данного набора оснований позволило сократить временные затраты на поиск и коррекцию ошибочных остатков на 20%.

Вторая частная задача исследований связана с разработкой алгоритма расширения кортежа оснований СОК. В диссертации были рассмотрены алгоритмы вычисления контрольных остатков на основе КТО, с последующим выполнением  $X_{n+1} = X \bmod p_{n+1}$ , с использованием полиномиальных кодов, а также коэффициентов ПоСС. Проведенные исследования показали, что данные алгоритмы требуют больших временных затрат на расширение кортежа оснований. Устранить этот недостаток позволяет алгоритм, в котором вычисления контрольного остатка осуществляется:

$$X_{n+1} = \left| \sum_{i=1}^{n-1} X_i |B_i|_{p_{n+1}}^+ + r_3 \left( p_{n+1} - |(P^*)^{-1}|_{p_{n+1}}^+ \right) \right|_{p_{n+1}}^+, \quad (11)$$

где  $P_{n-1} = \prod_{i=1}^{n-1} p_i$ ;  $r_X = \left| \sum_{i=1}^n X_i g_i \right|_{p_n}^+$ ;  $g_i = |m_i p_i^{-1}|_{p_n}^+$ ;  $m_i$  - вес ортогонального базиса;

$$g_n = p_n - |(P^*)^{-1}|_{p_n}^+.$$

В качестве недостатка рассмотренного алгоритма можно отметить уменьшение рабочего диапазона в  $p_n$  раз, так как в вычислениях старшее основание не участвует.

Устранить отмеченный недостаток позволяет разработанный алгоритм расширения оснований кода СОК. В основе разработанного алгоритма расширения кортежа оснований положен алгоритм (10). Пусть контрольным основанием выступает модуль  $p_{n+1}$ . В этом случае выражение (10) имеет вид:

$$L_{n+1} = \left| \sum_{i=1}^{n+1} X_i |K_i|_{p_{n+1}}^+ + \ddot{r}_X \right|_{p_{n+1}}^+ = \left| \sum_{i=1}^n X_i |K_i|_{p_{n+1}}^+ + X_{n+1} |K_{n+1}|_{p_{n+1}} + \ddot{r}_X \right|_{p_{n+1}}^+. \quad (12)$$

Значение  $L_{n+1} = 0$  возможно только в том случае, когда избыточная комбинация СОК не содержит ошибку. Тогда справедливо:

$$-X_{n+1} |K_{n+1}|_{p_{n+1}} = \left| \sum_{i=1}^n X_i |K_i|_{p_{n+1}}^+ + \ddot{r}_X \right|_{p_{n+1}}^+. \quad (13)$$

В этом случае остаток по контрольному основанию  $p_{n+1}$  будет равен:

$$X_{n+1} = p_{n+1} - \left| \frac{\sum_{i=1}^n X_i |K_i|_{p_{n+1}}^+ + \ddot{r}_X}{K_{n+1}} \right|_{p_{n+1}}^+. \quad (14)$$

Аналогичным образом можно вычислить все контрольные остатки. При этом алгоритм (14) может выполняться параллельно, что снижает временные затраты на получение комбинаций для кодового слова турбокода СОК. В диссертации представлены структурная схема кодера СОК, реализующего разработанный алгоритм, а также пример реализации разработанного алгоритма. Для коррекции ошибок были выбраны  $p_1 = 63, p_2 = 64, p_3 = 65$  – информационные и  $p_4 = 67, p_5 = 77$  – контрольные основания. Проведенный сравнительный анализ показал, что при равных временных затратах разработанный алгоритм обеспечил в 65 раз больший диапазон разрешенных КК СОК по сравнению с алгоритмом (11).

**В третьей главе** представлены решения третьей и четвертой частных задач исследования. Третья частная задача посвящена разработке метода построения турбокода СОК. При решении данной задачи был использован подход генерации кодового слова БТК. Разработанный метод построения турбокода СОК содержит следующие этапы:

1. В состав кодера ТК СОК входят первый кодер – это преобразователь ПК-СОК, второй кодер, реализующий разработанный алгоритм расширения кортежа остатков СОК (14), а также перемежитель.

2. Задается набор информационных оснований  $p_1, \dots, p_n$ , произведение которых определяет диапазон разрешенных комбинаций, т.е.:

$$P_n = \prod_{i=1}^n p_i. \quad (15)$$

3. Определяется минимальное кодовое расстояние, которым должен обладать турбокод СОК, используя  $d_{\min}^e, d_{\min}^z$  – минимальные кодовые расстояния вертикального и горизонтального кодов:

$$d_{\min}^{TK} = d_{\min}^e \cdot d_{\min}^z. \quad (16)$$

Затем, используя условие (16), вычисляется количество контрольных оснований для горизонтального  $\rho_H$  и вертикального кодирования  $\rho_B$ .

4. На вход первого кодера поступает двоичная последовательность, которая воспринимается как целое число, не превышающее рабочий диапазон (15). С выхода кодера снимаются комбинации, имеющие  $n$  информационных и  $\rho_H$  контрольных остатков:

$$\begin{aligned} X^{\Gamma}(1) &= (X_{11}, \dots, X_{1n}, X_{1(n+1)}^{\Gamma}, \dots, X_{1(n+\rho)}^{\Gamma}), \\ X^{\Gamma}(2) &= (X_{21}, \dots, X_{2n}, X_{2(n+1)}^{\Gamma}, \dots, X_{2(n+\rho)}^{\Gamma}), \\ &\vdots \\ X^{\Gamma}(k) &= (X_{n1}, \dots, X_{nn}, X_{n(n+1)}^{\Gamma}, \dots, X_{n(n+\rho)}^{\Gamma}). \end{aligned} \quad (17)$$

5. Информационные остатки поступают на вход перемежителя, который задает правила получения вертикальных наборов информационных остатков. В работе был выбран детерминированный перемежитель вида:

$$P_n^B = \begin{pmatrix} X_{ij} & X_{(i+1)(j+1)} & \cdots & X_{(i+n-2)(j+n-2)} & X_{(i+n-1)(j+n-1)} \\ X_{(i+1)j} & X_{(i+2)(j+1)} & \cdots & X_{(i+n-1)(j+n-2)} & X_{i(j+n-1)} \\ X_{(i+2)j} & X_{(i+3)(j+1)} & \cdots & X_{i(j+n-2)} & X_{(i+1)(j+n-1)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{(i+n-1)j} & X_{i(j+1)} & \cdots & X_{(i+n-3)(j+n-2)} & X_{(i+n-2)(j+n-1)} \end{pmatrix}, \quad (18)$$

где  $i = 1, j = 1; n$  – количество информационных оснований.

6. Полученные «вертикальные» наборы поступают на вход второго кодера, который используя разработанный алгоритм расширения кортежа остатков СОК (14), вычисляет соответствующие контрольные остатки. Эти вычисленные остатки записываются по столбцам турбокода СОК:

$$\begin{aligned} X^B(1) &= (X_{11}, X_{22}, \dots, X_{nn}, X_{1(n+1)}^B, \dots, X_{1(n+\rho)}^B), \\ X^B(2) &= (X_{21}, X_{32}, \dots, X_{1n}, X_{2(n+1)}^B, \dots, X_{2(n+\rho)}^B), \\ &\vdots \\ X^B(k) &= (X_{n1}, X_{12}, \dots, X_{(n-1)n}, X_{k(n+1)}^B, \dots, X_{k(n+\rho)}^B). \end{aligned} \quad (19)$$

7. Вертикальные контрольные остатки поступают на вход детерминированного перемежителя, который задает их расположение в кодовом слове:

$$P_\rho^B = \begin{pmatrix} X_{1(n+1)}^B & X_{(n-1)(n+1)}^B & \cdots & X_{3(n+1)}^B & X_{2(n+1)}^B \\ X_{2(n+2)}^B & X_{1(n+2)}^B & \cdots & X_{4(n+2)}^B & X_{3(n+2)}^B \\ X_{3(n+3)}^B & X_{2(n+3)}^B & \cdots & X_{5(n+3)}^B & X_{4(n+3)}^B \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{(n-1)(n+\rho)}^B & X_{(n-2)(n+\rho)}^B & \cdots & X_{2(n+\rho)}^B & X_{1(n+\rho)}^B \end{pmatrix}. \quad (20)$$

Рассмотрим этапы декодирования кодового слова турбокода СОК.

1. Из блока памяти на вход первого декодера поступают комбинации СОК, которые берутся из кодового слова горизонтально:

$$\begin{aligned} X^\Gamma(1) &= (X_{11}, \dots, X_{1n}, X_{1(n+1)}^\Gamma, \dots, X_{1(n+\rho)}^\Gamma), \\ X^\Gamma(2) &= (X_{21}, \dots, X_{2n}, X_{2(n+1)}^\Gamma, \dots, X_{2(n+\rho)}^\Gamma), \\ &\vdots \\ X^\Gamma(k) &= (X_{n1}, \dots, X_{nn}, X_{n(n+1)}^\Gamma, \dots, X_{n(n+\rho)}^\Gamma). \end{aligned} \quad (21)$$

2. Первый декодер, используя разработанный алгоритм коррекции ошибок (10), производит проверку этих комбинаций. Если кратность ошибки соответствует корректирующим способностям кода, то первый декодер производит исправление искаженных остатков. При этом информация о местоположении откорректированных остатков поступает в блок принятия решения (БПР). Также в БПР поступают данные, которые содержат сведения об ошибках, кратность которых превышает корректирующие способности горизонтальных избыточных комбинаций. Эти данные будут использованы при проведении декодирования вертикальных комбинаций СОК.

3. Одновременно с этим второй декодер, используя правила размещения информационных остатков:

$$P_n^B = \begin{pmatrix} X_{ij} & X_{(i+1)(j+1)} & \cdots & X_{(i+n-2)(j+n-2)} & X_{(i+n-1)(j+n-1)} \\ X_{(i+1)j} & X_{(i+2)(j+1)} & \cdots & X_{(i+n-1)(j+n-2)} & X_{i(j+n-1)} \\ X_{(i+2)j} & X_{(i+3)(j+1)} & \cdots & X_{i(j+n-2)} & X_{(i+1)(j+n-1)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{(i+n-1)j} & X_{i(j+1)} & \cdots & X_{(i+n-3)(j+n-2)} & X_{(i+n-2)(j+n-1)} \end{pmatrix},$$

а также проверочных вычетов:

$$P_\rho^B = \begin{pmatrix} X_{1(n+1)}^B & X_{(n-1)(n+1)}^B & \cdots & X_{3(n+1)}^B & X_{2(n+1)}^B \\ X_{2(n+2)}^B & X_{1(n+2)}^B & \cdots & X_{4(n+2)}^B & X_{3(n+2)}^B \\ X_{3(n+3)}^B & X_{2(n+3)}^B & \cdots & X_{5(n+3)}^B & X_{4(n+3)}^B \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{(n-1)(n+\rho)}^B & X_{(n-2)(n+\rho)}^B & \cdots & X_{2(n+\rho)}^B & X_{1(n+\rho)}^B \end{pmatrix},$$

восстанавливает вертикальные комбинации кода СОК:

$$\begin{aligned} X^B(1) &= (X_{11}, X_{22}, \dots, X_{nn}, X_{1(n+1)}^B, \dots, X_{1(n+\rho)}^B), \\ X^B(2) &= (X_{21}, X_{32}, \dots, X_{1n}, X_{2(n+1)}^B, \dots, X_{2(n+\rho)}^B), \\ &\vdots \\ X^B(k) &= (X_{n1}, X_{12}, \dots, X_{(n-1)n}, X_{k(n+1)}^B, \dots, X_{k(n+\rho)}^B), \end{aligned} \tag{22}$$

Полученные комбинации заносятся в память для хранения.

4. Второй декодер, используя разработанный алгоритм коррекции ошибок (10), производит проверку вертикальных комбинаций. Если кратность ошибки соответствует корректирующим способностям кода, то второй декодер производит исправление искаженных остатков. При этом информация о местоположении откорректированных остатков поступает в БПР, который анализирует данные о местоположении исправленных остатков, поступивших от двух декодеров. Эти данные уменьшают множество альтернативных решений по исправлению ошибочных остатков, которые возникают при обнаружении ошибок, кратность которых превышает корректирующие способности горизонтального или вертикального кодов СОК. Используя сведения об уже исправленных остатках декодерами, БПР передает комбинации, которые имели альтернативные решения на повторное декодирование. Так как кратность ошибки уже уменьшилась, то декодеры исправляют оставшиеся в комбинации ошибки.

В диссертации представлен пример реализации разработанного метода построения турбокода СОК, в котором были выбраны  $p_1 = 63, p_2 = 64, p_3 = 65$  – информационные и  $p_4 = 67, p_5 = 77$  – контрольные основания. Проведенный сравнительный анализ с классическим кодом СОК, имеющим 3 информационных и 6 контрольных оснований показал, что при равных корректирующих способностях ТК СОК обеспечивает более высокую скорость кодирования  $R = 3/7$  по сравнению с кодом СОК, у которого  $R = 1/3$ .

Четвертая частная задача исследований посвящена разработке структурной схемы помехоустойчивой системы, поддерживающей стандарт LTE-R и использующей турбокод СОК. При решении этой частной задачи были

использованы результаты первых трех частных задач. На рисунке 1 и 2 показаны передающая и приемная части разработанной структурной схемы.

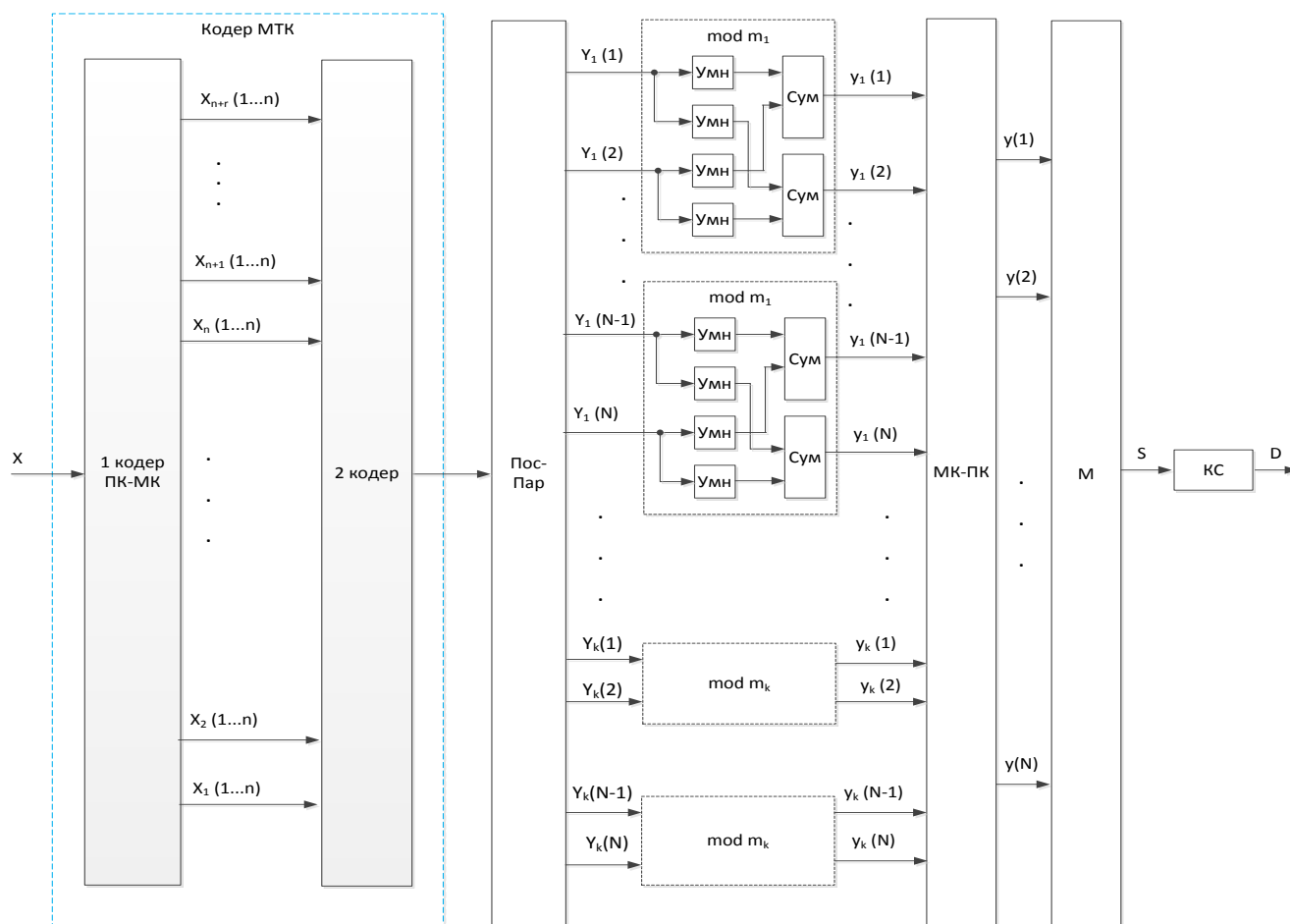


Рисунок 1 – Структурная схема передатчика помехоустойчивой системы OFDM, использующей ТК СОК

На основе проведенного анализа графиков, показанных на рисунке 3, можно сделать следующий вывод: при обеспечении отношения сигнал/шум равного 7 дБ в БСПД с OFDM, в которой не используется помехоустойчивое кодирование, вероятность битовой ошибки  $BER = 1 \cdot 10^{-2}$ .

Применение НСК стандарта GSM-R позволяет снизить вероятность битовой ошибки до  $BER = 2 \cdot 10^{-3}$ . Дальнейшее снижение вероятности битовой ошибки до величины  $BER = 2 \cdot 10^{-5}$  обеспечивает СТК стандарта LTE-R. Использование БТК, построенного на основе ЦК (15,11), позволяет снизить вероятность битовой ошибки до величины  $BER = 2 \cdot 10^{-6}$ .

Применение разработанного метода построения БТК СОК уменьшает вероятность битовой ошибки до величины  $BER = 6 \cdot 10^{-7}$ .

Таким образом, очевидно, что использование разработанного метода построения блочного турбокода СОК позволяет повысить помехоустойчивость БСПД стандарта LTE-R.

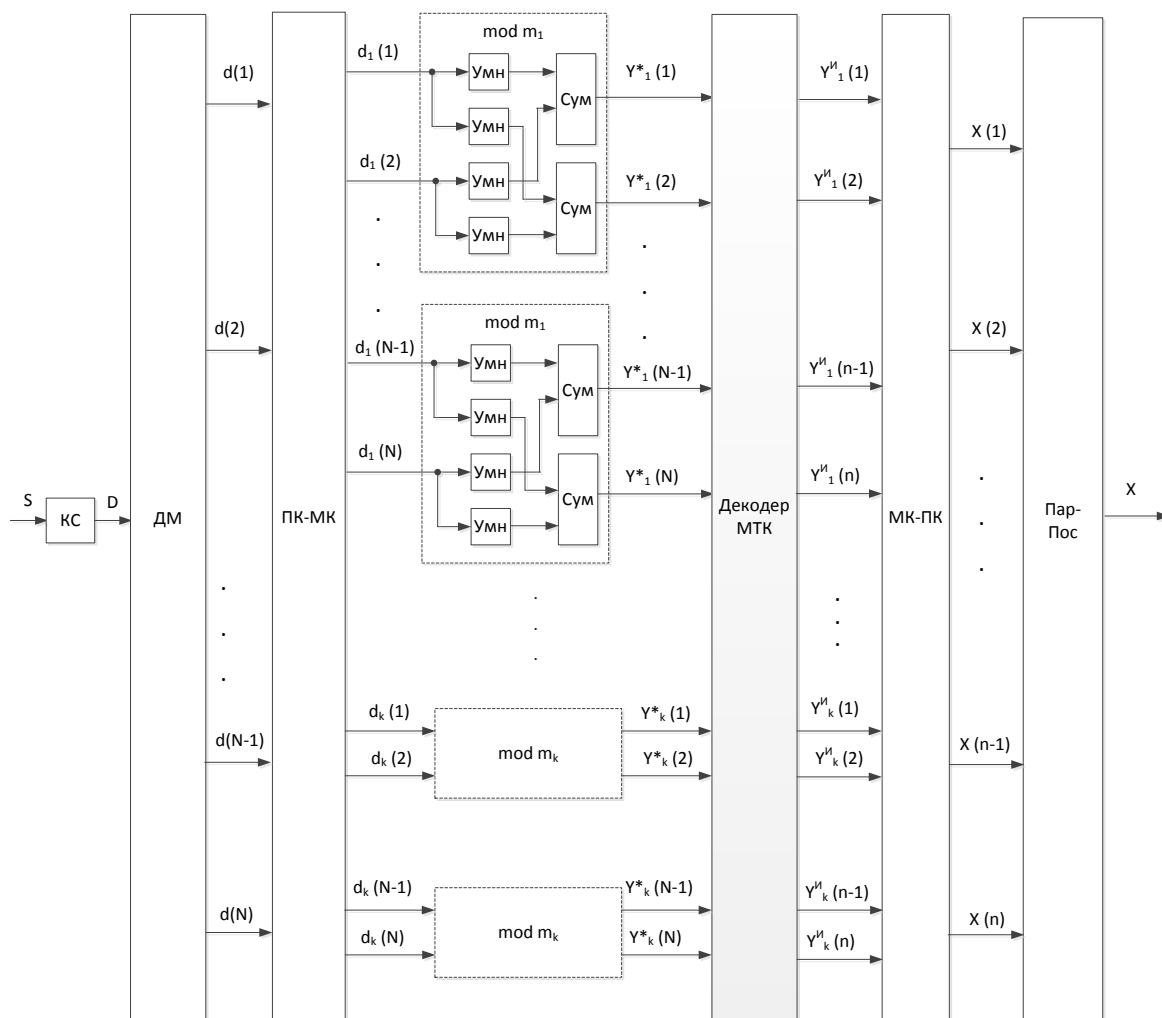


Рисунок 2 – Структурная схема приемника помехоустойчивой системы OFDM, использующей ТК СОК

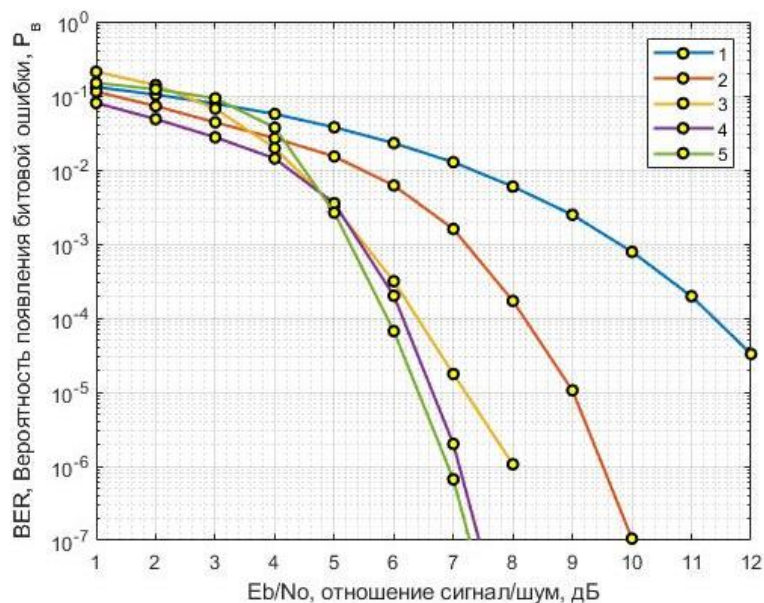


Рисунок 3 – Помехоустойчивость беспроводных систем OFDM:  
 1 – без помехоустойчивого кодирования; 2 – с использованием СК, используемого в стандарте GSM-R; 3 – с использованием СТК, используемого в стандарте LTE-R; 4 – с использованием блочного турбокода ЦК (15,11); 5 – с использованием турбокода СОК

Проведен сравнительный анализ временных затрат на генерацию и проверку сигналов OFDM с применением ПЛИС *KIntexUltraScalexcku0.25*, представленный на рисунке 4.

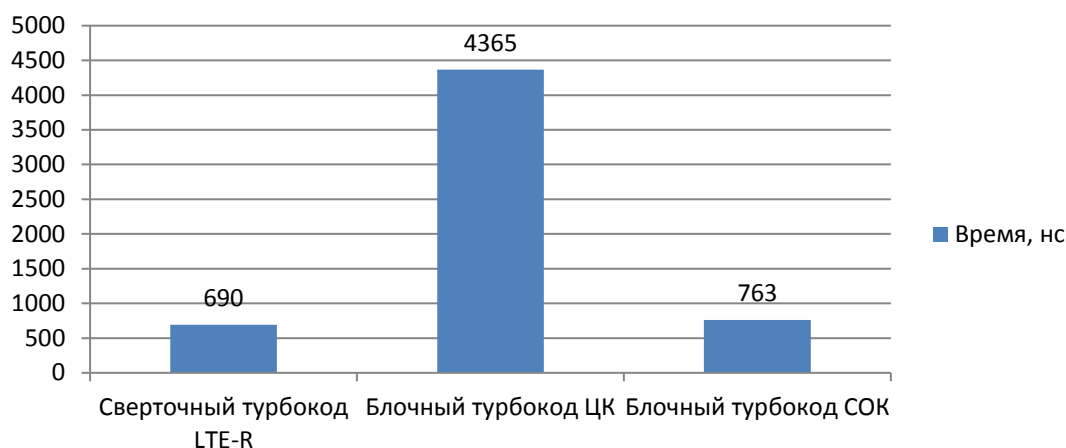


Рисунок 4 – Временные затраты на формирование и проверку сигналов OFDM

Так временные затраты на формирование и проверку сигнала OFDM, состоящего из 64 отсчетов разрядностью 8 бит, при использовании СТК стандарта LTE-R составили 690 нс. При использовании БТК на основе ЦК (15,11) временные затраты составляли 4365 нс. А при использовании разработанного метода построения турбокода СОК - 763 нс. Следовательно, применение разработанного метода построения турбокода СОК обеспечивает повышение помехоустойчивости БСПД стандарта LTE-R, в котором за счет кода СОК обеспечиваются соизмеримые временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM, использующего СТК.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе разработаны:

1. Алгоритм коррекции, который при вычислении ПХ интервал использует изоморфизм, порожденный КТО. Приведенный пример выполнения разработанного алгоритма показал, что временной интервал, в течение которого происходит поиск и коррекция ошибочных остатков, был сокращен на 20% по сравнению с алгоритмом (9).
2. Алгоритм расширения кортежа остатков кода системы остаточных классов, применение которого обеспечило при вычислении избыточных остатков в 65 раз больший диапазон разрешенных кодовых комбинаций СОК по сравнению с алгоритмом (11).
3. Метод построения турбокода СОК, применение которого обеспечило при равных корректирующих способностях более высокую скорость кодирования равную  $R = 3/7$  по сравнению с избыточным кодом СОК, у которого скорость кодирования равна  $R = 1/3$ .
4. Структурная схема системы, поддерживающей стандарт LTE-R, в которой применение турбокода СОК позволило обеспечить более высокий уровень

помехоустойчивости БСПД стандарта LTE-R. Так при обеспечении отношения сигнал/шум равного 7 дБ в БСПД с OFDM, в которой не используется помехоустойчивое кодирование, вероятность битовой ошибки  $BER=1\cdot 10^{-2}$ . Применение сверточного помехоустойчивого кода стандарта GSM-R позволяет снизить вероятность битовой ошибки до  $BER=2\cdot 10^{-3}$ . Дальнейшее снижение вероятности битовой ошибки до величины  $BER=2\cdot 10^{-5}$  обеспечивает сверточный турбокод стандарта LTE-R. Использование блочного турбокода, построенного на основе ЦК (15,11), позволяет снизить вероятность битовой ошибки до величины  $BER=2\cdot 10^{-6}$ . Применение разработанного метода построения блочного турбокода СОК уменьшает вероятность битовой ошибки до величины  $BER=6\cdot 10^{-7}$ .

Проведен сравнительный анализ временных затрат на генерацию и проверку сигналов OFDM с применением ПЛИС *KIntexUltraScalexcku0.25*. Так временные затраты на формирование и проверку сигнала OFDM, состоящего из 64 отсчетов разрядностью 8 бит, при использовании сверточного турбокода LTE составили 690 нс. При использовании блочного турбокода на основе циклического кода (15,11) временные затраты составляли 4365 нс. А при использовании разработанного метода построения турбокода СОК - 763 нс. Следовательно, применение разработанного метода построения ТБК СОК обеспечивает повышение помехоустойчивости БСПД стандарта LTE-R, в котором за счет кода СОК обеспечиваются соизмеримые временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM, использующего СТК.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России:**

1. Ефременков, И.Д. Исследование корректирующих способностей помехоустойчивого кода системы остаточных классов [Электронный ресурс] / И.Д. Ефременков, И.А. Калмыков // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 9 (105). – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8702](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2023/8702). – 1,00 п.л. / авт. вклад 0,5 п.л.

2. Ефременков, И.Д. Помехоустойчивый протокол опознавания низкоорбитального спутника-ретранслятора / И.Д. Ефременков, И.А. Калмыков, Д.В. Духовный // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2024. – № 5. – С. 271-282. – 0,75 п.л. / авт. вклад 0,3 п.л.

3. Ефременков, И.Д. Разработка метода построения модулярного композиционного кода для помехозащищенной системы аутентификации спутника / И.Д. Ефременков, И.А. Калмыков, Д.В. Юрданов, М.И. Калмыков, Е.А. Волошин, И.А. Проворнов // Современная наука и инновации. – 2021. – № 1 (33). – С. 35-41. – 0,43 п.л. / авт. вклад 0,2 п.л.

4. Ефременков, И.Д. Структурная модель помехоустойчивой системы с ортогональным частотным разделением каналов, использующей модулярные турбокоды системы остаточных классов [Электронный ресурс] / И.Д. Ефременков, И.А. Калмыков, Н.К. Чистоусов, Д.В. Духовный // Инженерный вестник Дона. – 2024. – № 8. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2024/9430](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2024/9430). – 2,75 п.л. / авт. вклад 1,5 п.л.

**Статьи в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus:**

5. Efremenkov, I.D. Application of noise-resistant modular codes to increase the fault tolerance of infocommunication systems with OFDM / I.D. Efremenkov, I.A. Kalmykov, I.A. Provornov, M.I. Kalmykov // Advances in intelligent systems research, volume 174. Proceedings of the 8th Scientific Conference on Information Technologies for Intelligent Decision Making Support (ITIDS 2020). – 2020. – P. 155-161. – 0,43 п.л. / авт. вклад 0,23 п.л.

6. Efremenkov, I.D. Application of modular turbo codes in authentication systems / I.D. Efremenkov, N.K. Chistousov, I.A. Kalmykov, D.V. Dukhovnyj, N.I. Kalmykova // AIP Conference Proceedings. – 2023. – 2700. – № 070006. – P. 1-6. – 0,37 п.л. / авт. вклад 0,19 п.л.

**Публикации в других научных изданиях:**

7. Ефременков, И.Д. Использование избыточных модулярных кодов при разработке отказоустойчивых запросно-ответных систем распознавания спутника / И.Д. Ефременков, М.И. Калмыков, Л.К. Бабенко, И.А. Калмыков // Фундаментальные исследования. – 2017. – № 12. – С. 292-296. – 0,3 п.л. / авт. вклад 0,08 п.л.

8. Ефременков, И.Д. Модификация алгоритма вычисления позиционно-интервальной характеристики модулярных кодов для коррекции ошибок / И.Д. Ефременков, Н.К. Чистоусов, А.Ф. Чипига, И.А. Калмыков, Н.И. Калмыкова // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 8. – С.137-142. – 0,37 п.л. / авт. вклад 0,12 п.л.

9. Ефременков, И.Д. Разработка алгоритма построения турбокодов на основе модулярных кодов / И.Д. Ефременков, И.А. Калмыков, Д.В. Юрданов, Е.А. Волошин, И.А. Проворнов // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 8. – С. 43-48. – 0,37 п.л. / авт. вклад 0,1 п.л.

10. Ефременков, И.Д. Реализация математической и структурной моделей кодопреобразования для системы аутентификации космического аппарата / И.Д. Ефременков, Е.П. Степанова, М.И. Калмыков, А.В. Ефимович, И.А. Калмыков, К.Т. Тынчеров // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 11. – С. 53-58. – 0,37 п.л. / авт. вклад 0,1 п.л.

**Объекты интеллектуальной собственности:**

11. Патент № 2711731 Российская Федерация. Устройство для вычисления сумм парных произведений: С1, МПК G06F 7/00 / Калмыков И.А., Ефременков И.Д., Чистоусов Н.К., Проворнов И.А., Калмыкова Н.И.; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет». – № 2019122909; заявл. 19.07.2019; опубл. 21.01.2020. – 15 с.;

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615863 Российская Федерация. Программа исследования свойств двоичных кодов системы остаточных классов в канале связи с группированием ошибок / Ефременков И.Д., Калмыков И.А.; правообладатели Ефременков И.Д., Калмыков И.А. – № 2024614758; заявл. 05.03.2024; опубл. 13.03.2024. – 1 с.