

УТВЕРЖДАЮ

И.о. проректора по научной работе и
международной деятельности

ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет»,

кандидат технических наук, доцент
А. Ю. Алтухов



05 2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Ефременкова Ивана Дмитриевича на тему: «Метод построения турбокода системы остаточных классов, обеспечивающий повышение помехоустойчивости беспроводных систем стандарта LTE-R», представленную в диссертационный совет при ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Актуальность темы исследования для науки и практики.

Тема исследований, проведенных соискателем Ефременковым И.Д, имеет актуальную направленность для науки и практики. В настоящее время на железнодорожном транспорте для обеспечения помехоустойчивости беспроводных систем передачи (БСПД), поддерживающих стандарт LTE-R, используется сверточный турбокод (СТК). Преимуществом данного кода является высокая скорость обработки информации. Однако СТК не обеспечивают максимально возможную помехоустойчивость. Повысить помехоустойчивость БСПД можно за счет использования блочных турбокодов (БТК), но препятствием к их использованию в LTE-R являются значительные временные затраты на формирование и проверку кодовых комбинаций, что снижает общую скорость передачи данных в системе, как следствие, снижение таких качественных показателей управления, как оперативность и непрерывность. Для устранения указанного противоречия соискателем предложено использование научно-методологического аппарата системного анализа (НМАСА). С его помощью анализа была выполнена формализация предметной области исследования, а также определены альтернативные решения, обеспечивающие повышение помехоустойчивости БСПД. Проведенный их сравнительный анализ позволил определить

противоречие в теории и сформулировать научную задачу исследований – разработка метода построения блочного турбокода, обеспечивающего повышение помехоустойчивости БСПД, в котором за счет новых алгоритмов расширения кортежа остатков и коррекции ошибок в кодовых комбинациях системы остаточных классов (СОК) временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM будут соизмеримы с затратами при использовании СТК.

Анализ содержания диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, 3 глав основного текста, заключения, приложений, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 117 наименований, и изложена на 167 страницах машинописного текста.

Во **введении** обоснована актуальность работы, определены объект и предмет диссертационного исследования, четко сформулированы цель и задачи исследования, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов исследования, а также основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации исследованы инфокоммуникационные технологии, используемые в беспроводных сетях железнодорожной связи, и их модернизация. Объектом исследования выбраны БСПД, поддерживающие стандарт LTE-R. Проанализированы методы повышения помехоустойчивости радиосетей, которые используются в стандартах GSM-R и LTE-R. Определено противоречие на практике. Сформулирована цель исследований. Обосновано применение научно-методологического аппарата системного анализа для решения данной проблемы. Осуществлен выбор альтернативных методов повышения помехоустойчивости БСПД. На основе системного анализа этих методов определено противоречие в теории и выполнена постановка научной задачи исследования. Произведена математическая постановка задачи диссертационных исследований. Построено «дерево целей» и выполнена декомпозиция научной задачи диссертационных исследований на 4 частные задачи.

Во второй главе представлены решения первых двух частных задач. Рассмотрены принципы построения модулярных кодов СОК и преобразования из позиционного кода в код СОК и обратно. Для решения первой частной задачи проведены исследования алгоритмов поиска и коррекции ошибок в кодах СОК. На основе анализа их недостатков был разработан алгоритм коррекции ошибок, использующий изоморфизм на

основе Китайской теоремы об остатках (КТО). Рассмотрен пример реализации этого алгоритма, в котором были использованы три информационных и два контрольных основания. Результаты показали, что применение разработанного алгоритма позволило сократить временные затраты на 20%. Кроме того, в диссертации представлена структурная схема декодера ошибок в СОК, реализующего разработанный алгоритм.

Для второй задачи проанализированы алгоритмы расширения кортежа остатков в СОК. На основе их анализа был разработан алгоритм расширения, определяющий контрольные остатки по информационным. Он используется для формирования вертикальных кодовых комбинаций в ТКСОК и основан на алгоритме коррекции из первой задачи. Представлена структурная схема кодера СОК, реализующего разработанный алгоритм. Сравнительный анализ на примере показал, что при равных временных затратах разработанный алгоритм обеспечил в 65 раз больший диапазон разрешенных кодовых комбинаций (КК) СОК по сравнению с базовым алгоритмом. Кроме того, в диссертации представлена структурная схема кодера СОК, реализующего разработанный алгоритм.

В третьей главе представлены решения третьей и четвертой частных задач. На основе разработанных алгоритмов коррекции и расширения кортежа остатков была выполнена разработка метода построения турбокода системы остаточных классов (ТКСОК). Описана работа кодера и декодера, реализующих расширение и коррекцию в СОК. Рассмотренный в диссертации пример подтвердил, что разработанный метод построения ТКСОК обеспечивает, при равных корректирующих способностях, более высокую скорость кодирования $R=3/7$ по сравнению с $R=1/3$, которую имеет избыточный код СОК.

Результаты решения четвертой задачи, посвящённой разработке структурной схемы помехоустойчивой системы, поддерживающей стандарт LTE-R, использующей турбокод СОК, представлены в виде структурных схем передающей и приёмной сторон. Сравнительный анализ корректирующих способностей показал, что при отношении сигнал/шум равном 7 дБ вероятность битовой ошибки $BER=2 \cdot 10^{-5}$, обеспечиваемая применением сверточного турбокода стандарта LTE-R, снижается до $BER=6 \cdot 10^{-7}$ при использовании разработанного метода построения ТКСОК.

Анализ временных затрат, проведенный с использованием ПЛИС Kintex UltraScale xsku, показал, что при генерации и проверке сигнала OFDM, состоящего из 64 отсчетов по 8 бит, временные затраты на формирование и проверку сигнала ТКСОК составляют 763 нс, что соизмеримо с временными затратами сверточного турбокода стандарта LTE-

R, составляющими 690 нс, и, в тоже время, значительно меньше, чем у блочного турбокода на основе ЦК (15,11), которые составляют 4365 нс. Таким образом, применение разработанного метода построения турбокода СОК позволило достичь цель диссертационных исследований.

В заключении диссертации представлены основные результаты и выводы, которые были получены в процессе исследований.

Теоретическая и практическая значимость для соответствующей отрасли науки.

Научная новизна диссертационного исследования обоснована получением следующих результатов:

1. Разработан алгоритм коррекции ошибок в кодах системы остаточных классов, отличающийся от ранее известных использованием изоморфизма Китайской теоремы об остатках 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 использованием единой алгебраической системы при формировании кодового слова ТК СОК и обеспечивающий при одинаковых корректирующих способностях более высокую скорость кодирования по сравнению с классическими избыточными кодами СОК.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в развитии методов построения блочных турбокодов с использованием алгоритмов СОК для повышения помехоустойчивости БСПД, в которых 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.

Практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в разработке структурной схемы беспроводной системы, поддерживающей стандарт LTE-R, в которой применение турбокода СОК

позволяет обеспечить выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с турбокодами сверточного кода при соизмеримых временных затратах на формирование сигнала OFDM.

Степень обоснованности и достоверности результатов диссертационного исследования.

Достоверность и обоснованность полученных результатов 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.

Рекомендации по использованию результатов диссертационного исследования.

Разработанные в диссертационной работе метод построения блочного турбокода и структурная схема беспроводной системы, поддерживающей стандарт LTE-R, в которой применение турбокода СОК позволяет обеспечить выигрыш в помехоустойчивости по сравнению с турбокодами сверточного кода при соизмеримых временных затратах на формирование сигнала OFDM могут быть внедрены предприятиями ООО «1520 Сигнал» (г. Москва), ООО «ВЗ «Электроприбор» (г. Москва), АО «ИРЗ» (г. Ижевск), ООО «Лаборатория радиосвязи» (г. Москва), ОАО «Владимирский завод «Электроприбор» (г. Владимир), ОАО «Корпорация Новосибирский завод Электросигнал» (г. Новосибирск), ООО КБ «Пульсар-Телеком» (г. Пенза).

Внедрение результатов работы. Основные результаты диссертационного исследования внедрены филиалом ФГКВОУ ВО «Военная академия Ракетных войск стратегического назначения им. Петра Великого» в городе Серпухове при выполнении НИР «Радиосеть-23», обществом с ограниченной ответственностью «Инфоком-С» в проекте «Разработка программно-технического комплекса мониторинга инфраструктуры энергетических систем на основе технологий «интернета вещей», и в учебный процесс кафедры информационной безопасности автоматизированных систем ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный

университет» (г. Ставрополь), что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Публикация и апробация результатов исследования.

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.

Данные обстоятельства позволяют сделать вывод о качественном обсуждении и апробации результатов проведенного исследования.

Соответствие паспорту специальности. Полученные в работе результаты соответствуют пунктам 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 паспорта специальности 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Анализ автореферата диссертации.

Автореферат диссертации соответствует основным положениям работы и в достаточной мере отражает ее содержание.

Замечания по диссертации.

Анализ диссертации позволяет сформулировать следующие замечания:

1. При анализе альтернативных решений повышения помехоустойчивости в диссертации рассмотрен только турбокод СОК. Авторам необходимо было привести и другие примеры использования модулярных кодов для повышения помехоустойчивости БСПД.

2. В диссертации при описании алгоритмов коррекции ошибки и расширения кортежа остатков были использованы три информационных основания 63, 64 и 65. В диссертации отсутствует описание алгоритма

выбора этих оснований. Автору необходимо пояснить этот алгоритм, так как выбранный набор оснований может оказать существенное влияние на схемные затраты при реализации кодера и декодера ТКСОК.

3. В диссертации не проведен анализ схемных затрат, необходимых для реализации разработанных алгоритмов коррекции ошибок и расширения кортежа остатков.

4. В диссертации представлена разработанная структурная схема помехоустойчивой БСПД, использующей ТКСОК. При этом в работе отсутствует описание системы OFDM, функционирующей в СОК, которая была использована в качестве прототипа.

5. В 3 главе диссертации анализ временных затрат проведен с использованием ПЛИС Kintex UltraScale xsku, однако не приведены данные по загрузке логических ресурсов, использования памяти, энергопотреблению и т.п.

6. В диссертации присутствуют орфографические и стилистические ошибки.

Выводы.

Указанные замечания не снижают научную и практическую ценность диссертации и не влияют на общую положительную оценку проведенного исследования.

Диссертация Ефременкова Ивана Дмитриевича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований содержатся результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение задачи, имеющей существенное значение для повышения эффективности функционирования беспроводных систем стандарта LTE-R. Обращает на себя внимание глубокая проработка проблематики исследования, корректное использование методологии системного анализа при выявлении и устранении противоречия между производительностью и помехоустойчивостью кодов, используемых в рассматриваемых стандартах связи. Так же заслуживает внимание глубокая проработка всех аспектов практической реализации формулируемых научных положений.

Диссертационная работа соответствует требованиям п.п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Ефременков Иван Дмитриевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата

