

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук, доцента, ИЩУКОВОЙ Евгении Александровны на диссертационную работу соискателя ученой степени кандидата технических наук Ефременкова Ивана Дмитриевича «Метод построения турбокода системы остаточных классов, обеспечивающий повышение помехоустойчивости беспроводных систем стандарта LTE-R» по специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

Актуальность диссертационного исследования

Очевидно, что проблема повышения помехоустойчивости беспроводных систем передачи данных (БСПД), под которой понимается способность БСПД правильно принимать информацию, несмотря на воздействие помех на нее в канале связи, является актуальной и еще не разрешена полностью. Для решения данной задачи в стандарте LTE-R был разработан сверточный турбокод (СТК), который характеризуется высокой скоростью кодирования и декодирования. Но сверточные турбокоды обладают меньшими корректирующими способностями по сравнению с блочными турбокодами (БТК). Однако в БТК при генерации кодового слова кодеры и декодеры работают последовательно, что приводит к большим временным затратам, снижающим скорость передачи в БСПД. Поэтому в стандарте LTE-R, несмотря на более высокую помехоустойчивость по сравнению с СТК, блочные турбокоды не используются. Для устранения данного противоречия на практике автором была сформулирована гипотеза – необходимо разработать такой метод построения блочного турбокода, который бы обеспечил более высокую помехоустойчивость по сравнению с СТК стандарта LTE-R, а временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM были соизмеримы с затратами при использовании СТК. Для реализации данной гипотезы было предложено использовать коды системы остаточных классов (СОК). Так как проблема повышения помехоустойчивости БСПД имеет множество альтернативных решений, то

для ее решения автор предложил использовать научно-методологический аппарат системного анализа (НМАСА). Применение НМАСА позволило соискателю определить альтернативные решения, обеспечивающие повышение помехоустойчивости, и провести их сравнительный анализ. В результате этого было выявлено противоречие в теории и осуществлена постановка научной задачи исследований.

Таким образом, очевидно, что разработка метода построения ТКСОК, обеспечивающего повышение помехоустойчивости, в котором за счет новых алгоритмов расширения кортежа остатков и коррекции ошибок временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM будут соизмеримы с затратами при использовании СТК, является актуальной.

Анализ содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Работа изложена на 167 страницах. Список литературы состоит из 117 наименований. Также в работе представлено 4 приложения.

Во **введении** диссертационной работы показана ее актуальность, определены объект и предмет научных исследований, а также цель и научная задача. Представлены научная новизна диссертационной работы, основные положения, выносимые на защиту, и практическая значимость результатов исследований. Приведено краткое описание и апробация работы. Показан личный вклад соискателя.

В первой главе диссертации проведен анализ инфокоммуникационных технологий, применяемых в беспроводных сетях, поддерживающих стандарты GSM-R и LTE-R. Рассмотрены помехоустойчивые коды, которые применяются в этих стандартах. Описаны их достоинства и недостатки, а также указана перспективность замены СТК на БТК, так как последние обладают более высокой помехоустойчивостью. Определены проблемы, которые сдерживают применение БТК в стандарте LTE-R. Описано противоречие на практике. Для решения этого противоречия была сформулирована гипотеза о необходимости разработки нового метода построения блочного турбокода, в котором временные затраты на

формирование помехоустойчивого сигнала OFDM были соизмеримы с затратами при использовании СТК. Обоснована перспективность использования научно-методологического аппарата системного анализа (НМАСА) для решения проблемы, связанной с повышением помехоустойчивости БСПД стандарта LTE-R. Так как выявленная проблема является слабоструктурированной, а гипотеза имеет множество решений, то был проведен сравнительный анализ методов повышения помехоустойчивости БСПД. Показана перспективность использования кода СОК для построения блочного турбокода. Сформулированы противоречие в теории и основная научная задача исследований. Представлена ее математическая постановка. Для осуществления декомпозиции общей научной задачи на частные задачи было построено дерево целей.

Во **второй главе** диссертации описано решение двух первых частных задач исследования. Так как первая частная задача связана с разработкой алгоритма коррекции ошибок в кодах СОК, обладающего минимальными временными затратами, то был проведен анализ алгоритмов обнаружения и исправления ошибок в модулярных кодах СОК. Показаны их достоинства и недостатки. На основе полученных результатов был разработан алгоритм коррекции ошибок, обладающий минимальными временными затратами. Для достижения поставленной цели был использован изоморфизм, порожденный Китайской теоремой об остатках (КТО). Показано, что применение КТО позволило уменьшить количество операций умножения, что привело к снижению временных затрат на коррекцию ошибки на 20% при использовании трех информационных и двух контрольных оснований. На основании этого алгоритма была разработана структурная схема декодера в кодах СОК.

Так как вторая частная задача связана с разработкой алгоритма расширения кортежа остатков в кодах СОК, то был проведен анализ алгоритмов расширения системы оснований в модулярных кодах СОК. Показаны их достоинства и недостатки. На основе полученных результатов был разработан алгоритм расширения кортежа остатков, который при

использовании трех оснований 63, 64 и 65 обеспечивает увеличение диапазона допустимых кодовых комбинаций в 65 раз в отличие от ранее известного алгоритма. В его основу был положен ранее разработанный алгоритм коррекции ошибки на основе изоморфизма КТО. В работе также представлена структурная схема кодера, реализующего разработанный алгоритм расширения кортежа остатков.

В **третьей главе** диссертации описаны решения третьей и четвертой частных задач диссертационного исследования. Третья частная задача связана с разработкой метода построения турбокода СОК. При выполнении этой частной задачи были использованы результаты, полученные ранее. В диссертации описаны принципы формирования и проверки кодового слова турбокода СОК. Проведен сравнительный анализ с традиционным избыточным кодом СОК. Результаты показали, что разработанный метод построения ТКСОК обеспечивает более высокую скорость кодирования при равных корректирующих способностях кодов.

При решении четвертой частной задачи, связанной с разработкой структурной схемы помехоустойчивой БСПД, поддерживающей стандарт LTE-R и использующей ТКСОК, были использованы результаты выполнения первых трех частных задач. В диссертации представлены функциональные схемы передающей и приемной частей помехоустойчивой БСПД, а также описана их работа. Результаты сравнительного анализа показали, что при уровне отношения сигнал/шум 7 дБ вероятность битовой ошибки (BER), равная $2 \cdot 10^{-5}$ при использовании сверточного турбокода стандарта LTE-R, может быть снижена до $6 \cdot 10^{-7}$ при применении предложенного ТКСОК, что свидетельствует о существенном приросте помехоустойчивости. Проведенный анализ временных затрат показал, что на формирование и проверку сигнала OFDM, состоящего из 64 отсчетов разрядностью 8 бит, при использовании СТК стандарта LTE-R потребовалось 690 нс. При использовании БТК на основе циклического кода (15,11) временные затраты составляли 4365 нс. А при использовании разработанного метода построения турбокода СОК потребовалось 763 нс. Полученные результаты показали, что

применение разработанного метода построения ТКСОК обеспечивает повышение помехоустойчивости БСПД стандарта LTE-R, в котором за счет кода СОК обеспечиваются соизмеримые временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM, использующего СТК.

В заключении диссертации описаны основные результаты и выводы проведенных диссертационных исследований.

Научная новизна диссертационной работы

Научную новизну диссертационной работы составляют следующие результаты:

1. Разработан алгоритм коррекции ошибок в кодах системы остаточных классов, отличающийся от ранее известных использованием изоморфизма 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 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 проведенных исследований:

Теоретическая значимость результатов заключается в развитии методов построения БТК на основе кодов СОК. Применение в ТКСОК новых алгоритмов расширения кортежа остатков и коррекции ошибок позволяет обеспечить временные затраты на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM соизмеримые с затратами при использовании сверточного турбокода.

Практическая значимость результатов диссертационной работы:

1. В ходе выполнения диссертационной работы автором была разработана структурная схема БСПД, поддерживающей стандарт LTE-R, в которой применение турбокода СОК позволяет обеспечить более высокий уровень помехоустойчивости по сравнению с СТК при соизмеримых временных затратах на формирование помехоустойчивого сигнала OFDM.

2. Технические решения исследований 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.

Степень обоснованности и достоверности результатов диссертационного исследования

Достоверность и обоснованность полученных результатов определяется строгостью проводимых математических доказательств, в получении которых были использованы методы системного анализа, алгоритмы построения корректирующих кодов СОК, а также методы построения турбокодов. Справедливость полученных в диссертации научных результатов подтверждается проведением сравнительного анализа разработанного метода построения турбокода СОК с известными ранее.

Внедрение результатов работы

Основные результаты исследований были использованы:

1. ФГКВОУ ВО «Военная академия РВСН им. Петра Великого» (г. Серпухов).
2. ООО «Инфоком-С» (г. Ставрополь).
3. В учебном процессе ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (г. Ставрополь).

Апробация и публикация результатов исследования

Основные результаты диссертационной работы отражены в 24 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 14 докладах на Международных и Всероссийских научно-практических конференциях. Кроме этого, в ходе исследований были получены 1 патент РФ на изобретение и 7 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Соответствие паспорту специальности.

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

Замечания по диссертационной работе

1. В диссертации в качестве альтернативных методов повышения помехоустойчивости БСПД были рассмотрены только БТК, использующие циклические коды Хемминга. При этом известно, что при построении БТК широко используются коды БЧХ и Рида-Соломона. Однако эти коды в диссертации не рассматривались.

2. Разработанный метод построения турбокода СОК использует метод жесткого декодирования. Однако в настоящее время используются методы мягкого декодирования. В диссертации автор не рассмотрел возможность использования мягких методов декодирования в СОК.

3. Известно, что коды СОК широко применяются для повышения отказоустойчивости вычислительных систем. Автору необходимо пояснить, как новая область применения модулярных кодов, связанная с

помехоустойчивостью, оказывает влияние на алгоритмы поиска и коррекции ошибок.

4. В диссертации при разработке метода построения ТКСОК предлагается использование структуры кодового слова блочного турбокода без контроля проверочных разрядов (рисунок 1.5а). Однако, возможность использования структуры кодового слова с контролем проверочных разрядов (рисунок 1.5б) не была рассмотрена.

5. Разработанный алгоритм расширения кортежа оснований позволяет обеспечить вычисление избыточных остатков без снижения величины рабочего диапазона по сравнению с алгоритмом (2.49). Автору необходимо пояснить влияния этого алгоритма на помехоустойчивость ТКСОК.

6. В диссертационной работе и автореферате присутствуют опечатки и стилистические неточности.

Однако, в целом, отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не наносят существенного ущерба значимости результатов диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне.

Выводы

1. Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение научной задачи применения научно-методологического аппарата системного анализа при разработке метода построения турбокода системы остаточных классов, способного обеспечить повышение помехоустойчивости беспроводных систем стандарта LTE-R, что имеет существенное значение для построения и развития беспроводных сетей связи на основе OFDM, являющихся перспективной основой информационной инфраструктуры России.

2. По актуальности тематики, глубине проведенных исследований и значимости полученных результатов диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям п.п. 9, 10, 11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», а ее автор, Ефременков Иван Дмитриевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности

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

Официальный оппонент

Доцент, кандидат технических наук по специальности 05.13.19 «Методы и системы защиты информации, информационная безопасность»,

Доцент кафедры безопасности информационных технологий

им. О.Б. Макаревича Института компьютерных

технологий и информационной безопасности

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,

г. Таганрог

23 мая 2025 г.

Е.А. Ищукова

347922, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, корпус «И», тел. +7 (863) 218-40-00, e-mail: info@sfnedu.ru, uaishukova@sfnedu.ru, сайт: <https://sfnedu.ru>.

Подпись официального оппонента Ищуковой Евгении Александровны, кандидата технических наук, доцента, доцента кафедры безопасности информационных технологий им. О.Б. Макаревича Института компьютерных технологий и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Таганрог «ЗАВЕРЯЮ»

Директор ИКЦИБ



Г.Е. Веселов

347922, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Чехова, 2, корпус «И», тел. +7 (863) 436-04-50, e-mail: info@sfnedu.ru, gev@sfnedu.ru, сайт: <https://sfnedu.ru>.