

## ОТЗЫВ

официального оппонента Ажмухамедова Искандара Маратовича на диссертационную работу Ефременкова Ивана Дмитриевича на тему: «Метод построения турбокода системы остаточных классов, обеспечивающий повышение помехоустойчивости беспроводных систем стандарта LTE-R», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

### **Актуальность темы исследований для науки и практики.**

Эффективность и безопасность функционирования железнодорожного транспорта во многом определяется использованием беспроводных телекоммуникационных технологий. Особое внимание при этом уделяется вопросам повышения их помехоустойчивости. Для решения этой задачи в стандарте LTE-R применяется сверточный турбокод (СТК), так как он обеспечивает минимальные временные затраты на кодирование и декодирование. Однако применение СТК в беспроводных системах передачи (БСПД) не позволяет обеспечить их максимально возможную помехоустойчивость. Решить эту задачу позволяют блочные турбокоды (БТК). Однако эти коды имеют существенный недостаток – низкую скорость кодирования и декодирования, что негативно влияет на скорость передачи БСПД с OFDM, поддерживающих стандарт LTE-R. Для решения выявленного противоречия на практике в диссертации было предложено воспользоваться методами системного анализа. Это позволило формализовать предметную область исследований, выявить и провести анализ альтернативных решений, позволяющих повысить помехоустойчивость БСПД. В результате проведенных исследований соискатель сформулировал противоречие в теории и научную задачу исследований. 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

соизмеримые с затратами при использовании СТК. Таким образом, очевидно, что тема исследований является актуальной для науки и практики.

### **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** диссертации соискатель показал актуальность проводимых исследований, обосновал объект, предмет научных исследований, а также определил цель и научную задачу. Представлены основные положения, выносимые на защиту, и практическая значимость работы, приведено её краткое описание. Показан личный вклад соискателя.

**В первой главе** диссертации проведен анализ инфокоммуникационных технологий, применяемых в беспроводных сетях железнодорожной связи, а также рассмотрены направления их модернизации. Увеличение требований к эффективности управления железнодорожным транспортом и обеспечению его безопасности стало стимулом перехода от технологии GSM-R к более современному стандарту LTE-R, в котором реализована OFDM-модуляция. Объектом исследования выбраны беспроводные системы передачи данных, поддерживающие стандарт LTE-R. Рассмотрены существующие подходы к повышению помехоустойчивости радиосетей на основе СТК и БТК. Несмотря на то, что БТК обладают более высокой помехоустойчивостью, их применение ограничено из-за последовательных алгоритмов кодирования и декодирования, снижающих общую пропускную способность БСПД с OFDM. В качестве альтернативы были исследованы модели OFDM-систем, использующие дискретные вейвлет-преобразования (ДВП) в кодах СОК. Благодаря параллельным вычислениям, такие БСПД с OFDM имеют минимальные временные затраты на ортогональную обработку сигналов. Это позволило выдвинуть гипотезу о возможности разработки метода построения турбокода СОК (ТКСОК), в котором время кодирования и декодирования сигнала OFDM можно будет компенсировать за счет повышения скорости вычисления ДВП в модулярных кодах. В работе обоснована необходимость разработки метода построения турбокодов СОК. Выявлено противоречие на практике, определена цель исследования, а также обосновано применение научно-методологического

аппарата системного анализа для решения поставленных задач. Проведён сравнительный анализ существующих методов повышения помехоустойчивости БСПД, определен критерий оценки качества решений, а также сформулирована основная научная задача и ее математическая постановка. В завершении главы построено дерево целей, выполнена декомпозиция общей научной задачи на четыре частные задачи, реализуемые в ходе диссертационного исследования.

**Вторая глава** диссертации посвящена решению двух первых частных задач исследования. Первая частная задача исследований посвящена разработке алгоритма коррекции ошибок в кодах СОК, обладающего минимальными временными затратами. Для этого были исследованы различные методы обнаружения и исправления ошибок в кодах СОК. На основе этих исследований был разработан алгоритм коррекции ошибок, использующий изоморфизм на основе Китайской теоремы об остатках (КТО). На примере показано, что применение данного алгоритма при использовании трех информационных и двух контрольных оснований позволило снизить временные затраты на обнаружение и исправление ошибочных остатков на 20%. Также в диссертации описана структурная схема декодера, реализующего разработанный алгоритм в кодах СОК.

Вторая частная задача исследований посвящена разработке алгоритма кодирования в кодах СОК. Для решения второй задачи был выполнен анализ существующих алгоритмов расширения кортежей остатков в СОК. На основе этого анализа был разработан алгоритм, позволяющий вычислить контрольные остатки на основе информационных вычетов. В основу данного алгоритма был положен ранее разработанный алгоритм коррекции ошибки на основе СОК. Данный алгоритм будет использован для построения вертикальных кодовых комбинаций в турбокоде СОК. Представлена структурная схема кодера, реализующего разработанный алгоритм расширения кортежа остатков. Результаты сравнительного анализа показали, что при равных временных затратах предложенный алгоритм обеспечивает увеличение диапазона допустимых кодовых комбинаций в 65 раз по сравнению с базовым вариантом, что подтверждает его высокую эффективность.

**В третьей главе** представлены результаты решения третьей и четвертой частных задач диссертационного исследования. Третья частная задача

посвящена разработке метода построения ТКСОК. На основе ранее разработанных алгоритмов коррекции ошибок и расширения кортежа остатков в системе остаточных классов был предложен метод построения модулярного турбокода. Подробно описаны принципы функционирования кодера и декодера, реализующих соответствующие процедуры расширения и коррекции. Приведенный в диссертации пример демонстрирует, что предложенный метод обеспечивает более высокую скорость кодирования по сравнению с традиционным избыточным кодом СОК при сохранении эквивалентной корректирующей способности.

Четвертая частная задача направлена на разработку структурной схемы помехоустойчивой беспроводной системы, поддерживающей стандарт LTE-R и использующей ТКСОК. Представлены функциональные схемы передающей и приемной частей этой системы. 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. Кроме того, в диссертации был проведен анализ временных затрат на реализацию системы кодирования и декодирования на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) Kintex UltraScale xsku. 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. Полученные результаты показали, что 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.

**В заключении** соискатель представил основные результаты и выводы проведенных диссертационных исследований.

Разделы диссертации изложены логично, на достаточно высоком научно-техническом и математическом уровне.

### **Анализ автореферата диссертации.**

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

### **Научная новизна результатов диссертационного исследования и их теоретическая значимость.**

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

**Теоретическая значимость** исследования 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.

### **Внедрение результатов работы.**

Основные результаты диссертационного исследования использованы ФГКВОУ ВО «Военная академия РВСН им. Петра Великого» (г. Серпухов), ООО «Инфоком-С» (г. Ставрополь), ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» (г. Ставрополь).

### **Апробация и публикация 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.

### **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.**

В качестве замечаний по работе можно отметить следующее:

1. При использовании методов системного анализа в синтезируемой новой системе должно появиться свойство эмерджентности. Однако автор не указал это в явном виде в диссертации.

2. В диссертации автор предлагает метод построения турбокода на основе кодов системы остаточных классов, которые реализуются в кольце целых чисел. При этом модулярные коды, реализуемые в кольце полиномом, в работе не были рассмотрены.

3. В диссертации автор не достаточно полно отразил использование модулярных кодов для повышения помехоустойчивости беспроводных систем передачи данных.

4. В разработанном алгоритме коррекции ошибочных остатков автор рассматривает значения ошибок, которые не превышают величину основания. Однако из-за помехи может появиться остаток, который будет больше основания. Данная ситуация в диссертации не была рассмотрена.

5. В тексте диссертации отсутствует описание методики выбора оснований кода системы остаточных классов для реализации ТКСОК.

Следует отметить, что данные замечания не снижают ценности проведенных научных исследований.

**Выводы.** Диссертационная работа Ефременкова Ивана Дмитриевича выполнена на достаточно высоком научном уровне и представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований, получены результаты, совокупность которых можно квалифицировать как решение задачи по повышению помехоустойчивости беспроводных систем передачи, поддерживающих стандарт LTE-R.

Диссертация выполнена на актуальную тему, соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» и автор заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки).

Официальный оппонент

Доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры информационной безопасности,  
ФГБОУ ВО «Астраханский государственный университет  
имени В.Н. Татищева» г. Астрахань

 И.М. Ажмухамедов

20 мая 2025 г.

Докторская диссертация защищена по специальностям  
05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации» и  
05.13.19 – «Методы и системы защиты информации, информационная  
безопасность»

414056, Южный федеральный округ, Астраханская область, г. Астрахань, ул.  
Татищева, 20а. Телефон: 8 (8512) 24-64-00; факс: 8 (8512) 24-68-64; e-mail:  
asu@asu-edu.ru, web-сайт: asu-edu.ru.

