

На правах рукописи

О В Е Ч К И Н Г е н н а д и й В л а д и м и р о в и ч

**ТЕОРИЯ КАСКАДНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ КОДОВ
ДЛЯ ЦИФРОВЫХ РАДИОКАНАЛОВ
НА ОСНОВЕ МНОГОПороГОВЫХ АЛГОРИТМОВ**

Специальность 05.12.04 –
Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Рязань – 2011

Работа выполнена на кафедре вычислительной и прикладной математики ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный консультант: доктор технических наук,
профессор Золотарёв Валерий Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Назаров Лев Евгеньевич
доктор технических наук,
профессор Саксонов Евгений Александрович
доктор технических наук,
профессор Клочко Владимир Константинович

Ведущая организация: ФГУП «Научно-исследовательский институт радио», г Москва

Защита состоится 17 июня 2011 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 при ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время происходит интенсивный переход от аналоговых систем передачи информации к цифровым. Разрабатываются и внедряются в практику связи новые стандарты передачи информации, в том числе беспроводные сети, цифровое широкополосное видео и др. Подобные системы используют для передачи беспроводные каналы, в которых на сигнал действуют помехи различной физической природы. Это приводит к тому, что принятые данные с большой вероятностью содержат ошибки, что для многих приложений недопустимо. Поэтому при разработке систем радиосвязи возникает проблема обеспечения высоконадежной передачи цифровой информации по каналам с шумами. Для ее решения обычно используются методы защиты данных от ошибок, основанные на применении теории и конкретных алгоритмов декодирования помехоустойчивых кодов. Большинство таких алгоритмов являются эвристическими. Помехоустойчивые коды позволяют получить энергетический выигрыш кодирования (ЭВК), который характеризует степень возможного снижения энергии передачи при кодировании по сравнению с отсутствием кодирования, если требования к достоверности передачи в обоих случаях одинаковы. Конкретное выражение огромного экономического эффекта от получаемого с помощью кодирования ЭВК состоит в значительном уменьшении мощности передатчика, экономии полосы частот, увеличении дальности связи и способности работать при очень высоких шумах канала, а также во множестве других полезных технологических преимуществ. Именно поэтому проблеме увеличения ЭВК во всем мире уделяется огромное внимание, а достоинства простых и эффективных алгоритмов декодирования невозможно переоценить.

О важности развития алгоритмов декодирования помехоустойчивых кодов свидетельствуют ежегодно появляющиеся тысячи публикаций, посвященных данной тематике. Основу современной теории кодирования составляют работы В.А. Котельникова и К.Е. Шеннона. В дальнейшем теория помехоустойчивого кодирования развивалась многими российскими и зарубежными исследователями, такими как В.В. Зяблов, Э.Л. Блох, Л.М. Финк, К.Ш. Зигангиров, В.В. Золотарёв, Л.Е. Назаров, С.И. Егоров, Е.А. Крук, А. Витерби, Дж. Месси, П. Элайс, Р. Галлагер, Д. Форни, А.Э. Нейфах, Дж. Возенкрафт, Е. Берлекэмп, С. Berrou, A. Glavieux, D.J.C. MacKay и многими другими.

Начало активному практическому применению кодирования положил алгоритм Витерби, который с 70-х годов стал долгосрочным лидером в системах спутниковой связи и др. Данный алгоритм является оптимальным по обеспечиваемой вероятности ошибки декодирования, однако он характеризуется экспоненциально растущей с длиной кода сложностью декодирования. Поэтому в декодерах Витерби можно применять только

короткие и, следовательно, малоэффективные коды. Это же является причиной того, что ЭВК алгоритма Витерби весьма далек от теоретических границ. Поэтому тысячи исследователей в десятках передовых технологических странах мира заняты решением проблемы построения новых кодов и, главное, способов их более простого и эффективного декодирования, позволяющих приблизить уровень ЭВК к теоретическим пределам.

В настоящее время усилиями многих специалистов в области кодирования ЭВК ряда кодовых систем уже значительно улучшен по сравнению с алгоритмом Витерби. Активно развиваемые за рубежом турбо и низкоплотностные коды способны обеспечить близкую к теоретическим границам эффективность. Однако декодеры этих кодовых конструкций являются относительно сложными устройствами или программами. Поэтому основная проблема помехоустойчивого кодирования остается пока еще весьма далекой от своего окончательного решения, так как быстродействие методов декодирования сильно отстает даже от текущих потребностей современных систем радиосвязи и, тем более, от требований к перспективным разработкам. При этом проблема сложности не может быть скомпенсирована увеличением быстродействия аппаратного обеспечения, поскольку одновременно очень быстро растут и скорости передачи данных, достигающие уже сотен Мбит/с и выше. Поэтому быстродействие алгоритмов декодирования наряду с ЭВК останется одним из главных критериев успешности разработок в области теории кодирования.

После появления алгоритма Витерби в нашей стране стали развиваться методы декодирования, построенные на принципиально новой итеративной основе, предложенной Золотарёвым В.В. в 1972 г. Они были названы многопороговыми декодерами (МПД) и положили начало совершенно новому направлению в теории и технологии реализации декодеров. Похожие по стилю итеративные методы декодирования турбо кодов на Западе появились только в 90-х годах прошлого века. Из результатов как теоретических, так и экспериментальных исследований следует, что при сопоставимом ЭВК методы МПД выполняют примерно на 2 и более десятичных порядка меньшее число операций при декодировании каждого информационного бита, чем декодеры турбо, низкоплотностных и многих других кодов. Высокую эффективность коррекции ошибок в символьных данных показывают недвоичные многопороговые декодеры (q МПД), также имеющие линейную сложность реализации, свойственную их двоичным прототипам.

Вместе с тем возможности МПД еще далеко не полностью реализованы. В частности, МПД на момент начала данного исследования могли обеспечить ЭВК, примерно на 2 дБ меньший теоретически возможного. Это означает, что к.п.д. использующих МПД каналов будет составлять около 60 %, т.е. теоретически по такому каналу связи можно передавать почти на 40 % больше информации. Поэтому чрезвычайно актуальными

являются задача развития теории многопорогового декодирования, поиск новых методов и алгоритмов, которые позволят повысить корректирующие возможности МПД, что, в свою очередь, приведет к существенному увеличению к.п.д. используемых каналов передачи данных.

Несомненно, что одним из наиболее мощных подходов к повышению ЭВК является применение МПД в составе каскадных кодовых конструкций, которые, как следует из теории кодирования и, в том числе, из результатов исследования предложенных за рубежом турбо кодов, позволяют значительно улучшить возможности алгоритмов коррекции ошибок по сравнению с базовыми некаскадными методами. При этом эффективность таких схем определяется корректирующей способностью декодеров составляющих кодов. Поэтому проблема разработки простых для реализации методов декодирования каскадных кодов, основанных на МПД, является в высшей степени актуальной. Решение данной проблемы, предлагаемое в диссертационной работе, позволит существенно увеличить достижимый уровень ЭВК и, следовательно, обеспечит улучшение характеристик применяющих МПД систем радиосвязи.

Цель и задачи исследования. Разработка и исследование каскадных методов и алгоритмов коррекции ошибок для передачи больших объемов цифровых данных, основанных на применении многопороговых декодеров помехоустойчивых кодов, позволяющих обеспечить большую корректирующую способность по сравнению с базовыми некаскадными методами при сохранении теоретически минимально возможной линейной сложности реализации.

Поставленная цель требует решения следующих основных *задач*:

- обоснование и исследование новых методов и алгоритмов декодирования двоичных каскадных кодов, составляющей частью которых является двоичный многопороговый декодер, обладающих лучшей корректирующей способностью по сравнению с базовым многопороговым декодером при сохранении линейной сложности реализации;

- разработка и исследование символьных каскадных методов и алгоритмов коррекции ошибок, основанных на недвоичных многопороговых декодерах, обеспечивающих существенно меньшую вероятность ошибки декодирования по сравнению с существующими алгоритмами при минимально возможной линейной сложности реализации;

- поиск новых подходов к декодированию самоортогональных кодов, обеспечивающих повышение эффективности коррекции ошибок по сравнению с многопороговым декодером при сохранении линейной сложности реализации;

- построение новых двоичных и недвоичных самоортогональных кодов, обладающих лучшей корректирующей способностью в условиях большого шума при их многопороговом декодировании по сравнению с ранее известными;

– создание программных средств для моделирования и исследования систем передачи данных, позволяющих выполнять анализ эффективности существующих и разработанных методов исправления ошибок;

– решение вопросов практической реализации многопороговых декодеров.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы теории помехоустойчивого кодирования, теории вероятностей и математической статистики, статистической радиотехники, системного анализа, численные методы и методы математического и компьютерного моделирования.

Научная новизна определяется результатами, полученными в диссертационной работе впервые, и заключается в следующем:

1. Предложены новые методы декодирования двоичных каскадных кодов, основанные на многопороговых алгоритмах декодирования самоортогональных кодов, в которых декодер внешнего кода использует информацию о надежности решений многопорогового декодера внутреннего кода и позволяет более эффективно использовать корректирующие возможности кода; получены математические соотношения для оценки их эффективности.

2. Разработаны новые каскадные методы коррекции ошибок, использующие недвоичные многопороговые декодеры символьных самоортогональных кодов во внутреннем каскаде и новые недвоичные обычные и расширенные коды Хэмминга во внешнем каскаде.

3. Предложен метод каскадирования внутреннего недвоичного самоортогонального кода, декодируемого с помощью q МПД, с внешним недвоичным самоортогональным кодом, для декодера которого сформулированы новые принципы работы, обеспечивающие приближение к решению оптимального декодера всего каскадного кода при каждом изменении декодируемого символа.

4. Впервые предложено для декодирования самоортогональных кодов использовать min-sum алгоритм, позволяющий повысить энергетический выигрыш кодирования по сравнению с МПД при большом уровне шума.

5. Разработан алгоритм поиска структуры двоичных и недвоичных самоортогональных кодов с параллельным каскадированием, отличающийся от известных применением метода покоординатного спуска для уменьшения объема вычислений.

6. Предложена методика повышения эффективности МПД при работе совместно с многопозиционными системами модуляции, позволяющая за счет согласования систем кодирования и модуляции улучшить энергетический выигрыш кодирования.

7. Разработан метод уменьшения задержки решения многопорогового декодера сверточных кодов, позволяющий за счет движения пороговых элементов навстречу потоку декодируемых символов уменьшить задержку декодирования.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что применение построенных кодов и разработанных методов и алгоритмов коррекции ошибок в аппаратуре передачи данных позволяет получить дополнительный энергетический выигрыш кодирования до 1,5 дБ при высоком уровне шума. При этом сложность декодирования остается линейной и оказывается в десятки раз меньше сложности сопоставимых по эффективности известных методов исправления ошибок. Указанный энергетический выигрыш можно использовать для снижения мощности передатчика, повышения скорости и дальности передачи, экономии полосы частот и улучшения многих других важных характеристик систем радиосвязи, дающих большой экономический эффект.

Выполненный сравнительный анализ помехоустойчивости и сложности реализации современных методов коррекции ошибок позволяет обоснованно выбирать средства исправления ошибок для существующих и проектируемых систем передачи данных в зависимости от требований к корректирующей способности, сложности реализации алгоритма и скорости декодирования информационного потока. Созданный набор программных средств для исследования помехоустойчивых кодов позволяет выполнять детальное экспериментальное исследование существующих и разрабатываемых методов коррекции ошибок и будет полезен специалистам, занимающимся проектированием систем радиосвязи.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается:

- корректным использованием методов теории помехоустойчивого кодирования, теории вероятностей и математической статистики;
- строгими математическими доказательствами и масштабной экспериментальной проверкой всех полученных научных результатов, соответствующих результатам других авторов, опубликованным в отечественной и зарубежной литературе;
- внедрением результатов диссертации в ряде организаций, подтверждаемым соответствующими актами.

Реализация результатов работы. Изложенные в диссертации результаты получены автором в рамках госбюджетных НИР (№15-03Г, №7-09Г, №2-10Г), выполненных в ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (РГРТУ), НИР Российского фонда фундаментальных исследований (№05-07-90024, №08-07-00078), выполненных в Учреждении Российской академии наук «Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН)». Результаты диссертационной работы были использованы в ФГУП «Научно-исследовательский институт радио», Учреждении Российской академии наук «Институт космических исследований РАН (ИКИ РАН)», ООО «Объединенные радиоэлектронные технологии», ООО НПП «Этра-Плюс», учебном процессе ГОУВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (РГРТУ), что подтверждается актами о внедрении.

Апробация работы. Основные положения диссертационного исследования регулярно докладывались и обсуждались на научных конференциях и семинарах, в том числе: 8...12-й международных конференциях и выставках «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (2006...2010 гг., Москва); Tenth International Symposium on Communication Theory and Application (ISCTA'09) (2009 г., United Kingdom, Ambleside); 54, 55, 59, 61 и 65-й научных сессиях, посвященных Дню радио (2000, 2004, 2006, 2010 г., Москва); 5-й международной научно-технической конференции «Современные телевизионные технологии. Состояние и направления развития» (2010 г., Москва); 9, 10, 11, 13, 14, 15 и 16-й международных научно-технических конференциях «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» (2000, 2001, 2002, 2004, 2005, 2008, 2010 г., Рязань); научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития» (2005 г., Одесса); всероссийских научно-технических конференциях «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании» (2003 г., 2005 г., 2006 г., Рязань); 5-й и 6-й конференциях молодых ученых, посвященных Дню космонавтики «Фундаментальные и прикладные космические исследования» (2008 г., 2009 г., Москва); 7-й и 8-й всероссийских открытых конференциях «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (2009 г., 2010 г., Москва).

Публикации. Основные положения диссертационной работы отражены в 67 публикациях. В их числе 14 статей в журналах, рецензируемых ВАК, 19 статей в научно-технических журналах и сборниках научных трудов, 27 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях, 1 справочник, 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель. Разработаны и зарегистрированы в Российском агентстве по патентам и товарным знакам 4 пакета программ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Содержит 300 страниц, в том числе 251 страницу основного текста, 5 таблиц, 103 рисунка. Библиографический список состоит из 207 наименований.

Личный вклад автора. Работа является результатом исследований автора в период с 2000 года по настоящее время. Постановка ряда задач выполнена совместно с научным консультантом Золотарёвым В.В. Часть результатов получена вместе с Гринченко Н.Н. и Овечкиным П.В. В работах, опубликованных в соавторстве, соискатель предложил методы решения задач, а также выполнил часть аналитических расчетов и экспериментальных исследований.

На защиту выносятся:

1. Теория каскадирования двоичных линейных кодов, декодируемых с помощью МПД, позволяющая повысить энергетический выигрыш кодирования в ряде случаев на 1 дБ по сравнению с базовым МПД, включающая:

- метод декодирования каскадного кода, состоящего из внутреннего двоичного самоортогонального кода, декодируемого с помощью МПД, и внешнего двоичного самоортогонального кода, декодируемого с помощью взвешенного МПД, позволяющий более эффективно использовать корректирующие возможности каскадного кода;

- метод декодирования каскадного кода, состоящего из внутреннего двоичного самоортогонального кода, декодируемого с помощью МПД, и внешнего кода Хэмминга, а также нижние оценки вероятности ошибки декодирования для данного метода;

- теоремы, доказывающие свойство приближения решения предложенных декодеров разработанных каскадных кодов к решению оптимального декодера всего каскадного кода при каждом изменении декодируемого бита и определяющие гарантированное число исправляемых при декодировании ошибок;

- метод декодирования каскадного кода, состоящего из внутреннего сверточного кода, декодируемого с помощью алгоритма Витерби, и внешнего двоичного/недвоичного самоортогонального кода, декодируемого двоичным/недвоичным МПД, и нижние оценки вероятности ошибки декодирования для предложенного метода.

2. Метод декодирования символьного каскадного кода, состоящего из внутреннего недвоичного самоортогонального кода, декодируемого с помощью q МПД, и предложенного внешнего недвоичного обычного/расширенного кода Хэмминга, позволяющий уменьшить вероятность ошибки декодирования на 5 и более порядков по сравнению с исходным q МПД, а также нижние оценки вероятности ошибки декодирования для данного метода.

3. Метод каскадирования внутреннего недвоичного самоортогонального кода, декодируемого с помощью q МПД, с внешним недвоичным самоортогональным кодом, способный работать при большем уровне шума в канале, чем базовый МПД, при линейной сложности реализации.

4. Алгоритм поиска структуры самоортогональных кодов с параллельным каскадированием, позволяющий найти коды, для которых МПД обеспечивает получение на 0,25...0,5 дБ большего энергетического выигрыша при работе вблизи пропускной способности канала, чем для ранее известных самоортогональных кодов.

5. Методика применения min-sum алгоритма для декодирования самоортогональных кодов, обеспечивающая повышение энергетического выигрыша на 1...1,5 дБ по сравнению с МПД при работе вблизи пропускной

способности гауссовского канала и открывающая новое направление в декодировании самоортогональных кодов.

6. Метод уменьшения задержки решения многопорогового декодера сверточных кодов, позволяющий за счет увеличения объема вычислений в 1,5...2 раза уменьшить задержку декодирования в 2...4 раза.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы проблемы, цель, задачи исследований и основные положения, выносимые на защиту, показаны научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе «Обзор и анализ методов помехоустойчивого кодирования» выполнен анализ состояния данной научно-технической области. Рассмотрены результаты, достигнутые другими авторами, даны термины и определения, намечены направления исследований, выполняемые в диссертационной работе.

Рассмотрены обобщенная модель и основные элементы системы передачи данных, описаны модели и характеристики каналов связи, используемые при исследовании методов коррекции ошибок, приведена классификация помехоустойчивых кодов.

Показано, что при сравнении методов декодирования целесообразно учитывать как обеспечиваемый энергетический выигрыш кодирования (ЭВК), так и сложность их реализации.

Проведенный анализ эффективности наиболее мощных методов коррекции ошибок в двоичных данных показал, что одними из лучших с точки зрения соотношения получаемого ЭВК и сложности реализации являются многопороговые декодеры (МПД), которые обеспечивают практически оптимальное декодирование даже очень длинных кодов с линейной, т.е. теоретически минимально возможной, зависимостью сложности реализации от длины кода. Реализованные на ПЛИС, МПД смогут выполнять декодирование со скоростью до нескольких Гбит/с, что позволит решить проблему эффективного кодирования в высокоскоростных каналах передачи данных с большим уровнем шума.

Для исправления ошибок в символьных данных в настоящее время практически везде используются коды Рида-Соломона, хотя их эффективность очень далека от теоретически возможной. Показано, что успешную конкуренцию этим кодам составляют только недвоичные многопороговые декодеры (q МПД), которые обеспечивают на много десятичных порядков меньшую вероятность ошибки при одновременно в десятки раз меньшем числе операций, выполняемых при декодировании. Это уникальная ситуация в цифровой обработке сигналов.

Из представленных результатов экспериментальных исследований и теоретических границ следует, что характеристики МПД и q МПД могут

быть еще существенно улучшены. Поэтому актуальными являются задача развития теории МПД, поиск новых методов и алгоритмов, которые позволят увеличить корректирующие возможности данных декодеров. Это обеспечит существенное повышение к.п.д. используемых каналов связи и улучшение других важных характеристик систем радиосвязи. Решению данной задачи посвящены следующие главы диссертации.

Во второй главе «Принципы организации многопорогового декодирования» выполнено исследование исходного многопорогового метода декодирования и используемых совместно с ним самоортогональных кодов, а также предложены базовые подходы к улучшению его корректирующей способности.

Многопороговые декодеры используются для декодирования блочных или сверточных самоортогональных кодов (СОК). Пример схем, реализующих операции кодирования и многопорогового декодирования блочного кода с кодовой скоростью $1/2$ и длиной 26 битов, показан на рис. 1 и 2.

Данные схемы включают только регистры сдвига, сумматоры по модулю 2 и пороговый элемент, принимающий решение об изменении декодируемого символа в том случае, если сумма его входов L_j больше порога:

$$L_j = \sum_{k \in \Theta_j} s_k + d_j, \quad (1)$$

где d_j – символ разностного регистра, относящийся к декодируемому символу u_j (равный 0 или 1); s_p – p -й элемент регистра синдрома, входящий во множество проверок относительно декодируемого символа u_j ; Θ_j – множество номеров проверок, контролирующих j -й информационный символ.

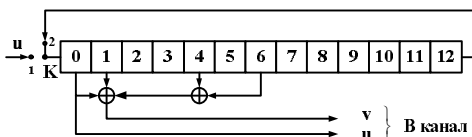


Рис. 1. Схема кодера блочного СОК

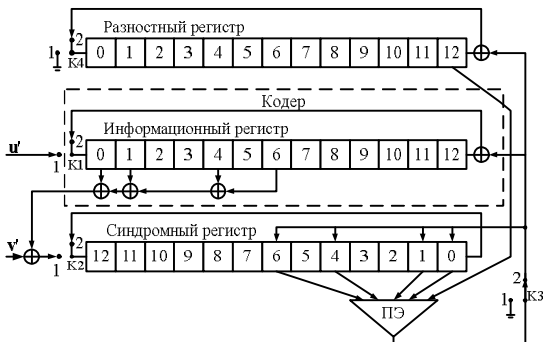


Рис. 2. Схема декодера МПД блочного кода

Таковыми же простыми для реализации являются МПД для сверточных СОК.

Для МПД известно, что при каждом изменении декодируемого символа их решение строго приближается к решению оптимального декодера. Однако для того, чтобы МПД был способен достигнуть решения оптимального декодера, требуется выбирать коды, в минимальной степени подверженные размножению ошибок (РО).

В диссертации изложена известная методика оценивания уровня РО и даны примеры ее применения для анализа ряда построенных СОК. Основная идея методики заключается в том, что с помощью многомерных производящих функций вероятности вычисляются оценки вероятности появления одиночных и пакетов ошибок на выходе обычного порогового декодера для СОК. Из полученных оценок можно сделать вывод об уровне РО для кода. Описанная методика использовалась в разработанных программных средствах построения новых СОК с заданным уровнем РО.

Из представленных в диссертационной работе результатов применения данной методики следует, что наименьшим РО обладают коды, для которых множества проверок, участвующих при декодировании информационных символов, пересекаются в минимальном количестве элементов. Таким свойством обладают только достаточно длинные СОК с кодовыми скоростями вида $R=mk/mn$, где m – небольшое целое число. Подобные коды имеют несколько информационных и несколько проверочных ветвей.

В работе предложено при анализе устойчивости кодов к РО дополнительно использовать его спектр. Под спектром кода понимается набор значений a_{ij} , определяющих число кодовых слов с полным весом j , информационный вес которых равен i . Показано, что минимальный вес кодовых слов с информационным весом n для лучших в плане устойчивости к РО кодов должен быть не меньше, чем $nd-2(n-1)$. Если же среди кодовых слов с информационным весом n есть кодовые слова меньшего веса, то это означает, что информационные символы имеют большее число общих проверок, чем минимально возможное, и, следовательно, размножение ошибок для таких кодов будет выше. Таким образом, определив спектр различных СОК, можно оценить РО для каждого из них и выбрать лучший.

В то же время задача получения спектра для длинных кодов, обладающих наименьшим РО, достаточно сложна для решения из-за огромного объема требуемых вычислений, пропорционального 2^K , где K – длина информационной части кода. Поэтому до настоящего времени спектр СОК длиной в сотни, тысячи и более битов был неизвестен.

В диссертации предложена и реализована в программных средствах методика получения спектра СОК. Данные программные средства использовались при выборе лучших СОК.

Для построенных в работе СОК с помощью компьютерного моделирования выполнен анализ эффективности МПД при использовании двоичного симметричного канала (ДСК) и канала с аддитивным белым гауссов-

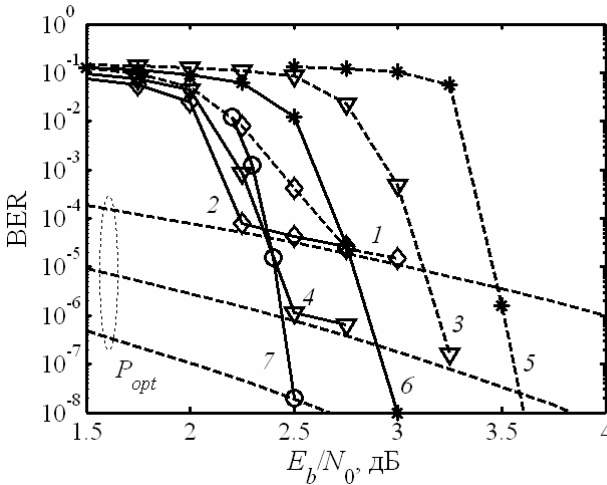


Рис. 3. Характеристики МПД в канале с АБГШ и ФМ2

ским шумом (АБГШ) при двоичной фазовой модуляции (ФМ2). Пример полученных характеристик для МПД с 20 итерациями декодирования представлен на рис. 3, на котором показана зависимость вероятности ошибки декодирования от отношения сигнал/шум для канала с АБГШ и модуляции типа ФМ2. Кривая 1 соответствует СОК с $R=2/4$, $d=9$, кривая 3 – СОК с $R=2/4$, $d=13$, кривая 5 – СОК с $R=8/16$, $d=17$. Здесь и далее относительная погрешность полученных результатов в нижних точках графиков с достоверностью 0,95 не превосходит 50 %. Пунктирные кривые P_{opt} отражают оценки вероятности ошибки оптимального декодирования для этих же кодов.

Отметим, что с ростом кодового расстояния используемых кодов вероятность ошибки декодирования снижается, но при этом область эффективной работы МПД, когда он обеспечивает почти оптимальное декодирование, сдвигается в область меньших шумов. Эта особенность МПД и СОК используется в основе построения известных СОК с параллельным каскадированием, в которых в коде с большим d выделяется составляющий код с малым кодовым расстоянием, используемый на первых итерациях декодирования. Это позволяет существенно улучшить эффективность работы МПД при большом уровне шума. На последующих итерациях в процессе декодирования участвует весь код, обеспечивая получение малой вероятности ошибки. Пример характеристик МПД для построенных кодов с параллельным каскадированием с кодовым расстоянием 9, 13 и 17, полученных с помощью компьютерного моделирования, представлен на рис. 3 кривыми 2, 4 и 6. Применение параллельного каскадирования позволило увеличить ЭВК примерно на 0,8 дБ.

В работе показано, что коды с параллельным каскадированием в общем случае имеют достаточно сложную структуру с числом вариантов кодов $m^{n_k \cdot n_r}$, где n_k – число информационных ветвей кода; n_r – число проверочных ветвей кода; m – количество возможных вариантов числа проверок для каждой пары информационная–проверочная ветвь. Для кода с $R=5/10$ и $m=3$ получается порядка 10^{12} вариантов кодов, из которых нужно выбрать лучший. Для решения данной задачи предложен алгоритм поиска структуры СОК, позволяющий получить коды, для которых МПД при работе вблизи пропускной способности канала обеспечивает наибольший ЭВК. Данный алгоритм, основанный на методе покоординатного спуска, позволяет уменьшить число перебираемых вариантов кодов до величины $m \cdot n_k \cdot n_r \cdot N$, где N – число итераций алгоритма.

Применение предложенного алгоритма позволило найти новые СОК, пример характеристик для одного из которых с кодовым расстоянием $d=17$ представлен на рис. 3 кривой 7. Результаты моделирования показали, что использование кодов, полученных с помощью данного алгоритма, позволило увеличить ЭВК на 0,25...0,5 дБ по сравнению с исходным МПД без увеличения сложности реализации декодера.

В диссертации выполнен анализ характеристик МПД в гауссовском канале связи при использовании многопозиционных систем сигналов (многопозиционная фазовая и квадратурно-амплитудная модуляция). Результаты моделирования показали, что при использовании как жестких, так и мягких решений демодулятора МПД позволяет обеспечить на 1...3 дБ больший ЭВК, чем декодер Витерби, примерно на 1...1,5 дБ меньший ЭВК, чем лучшие декодеры турбо кодов длиной 10000 битов, и на 1 дБ меньший ЭВК, чем декодеры DVB-S2 LDPC кодов длиной 64800 битов.

Для сигнально-кодowych конструкций, включающих СОК, декодируемые с помощью МПД, и многопозиционные системы модуляции, в работе предложена методика повышения эффективности за счет лучшего расположения информационных и проверочных битов в символах сигнального созвездия. Методика использует тот факт, что различные биты в символах сигнального созвездия, содержащего более четырех возможных сигналов, защищены от искажения по-разному. Методика заключается в следующем:

1. Все позиции битов сигнального пространства необходимо разбить на две группы: позиции битов с большей и меньшей вероятностью ошибки.

2. В процессе передачи закодированных с помощью СОК битов информационные биты следует располагать в позициях с меньшей вероятностью ошибки, а проверочные – с большей. Данный подход позволит приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала. При этом вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы станет больше примерно на порядок.

3. Для уменьшения вероятности ошибки в области эффективной работы МПД следует совместно с ним применить любой простой внешний код.

Это может быть код с контролем четности, код Хэмминга или самоортогональный код, принципы организации каскадирования с которыми рассматриваются в третьей главе.

Результаты моделирования МПД при использовании предложенной методики показали возможность получения на 0,8 дБ большего ЭВК по сравнению с исходным МПД, что позволило вплотную приблизиться к результатам, обеспечиваемым декодерами DVB-S2 LDPC кодов. Сложность декодера при этом увеличилась не более чем на 20 % по сравнению с базовым МПД.

В третьей главе «Разработка методов декодирования каскадных кодов на основе многопороговых декодеров» предложен ряд методов декодирования каскадных кодов, основанных на многопороговых алгоритмах.

Показано, что для дальнейшего повышения эффективности декодирования целесообразно применять каскадные методы коррекции ошибок, которые позволят как уменьшить вероятность ошибки в области эффективной работы МПД, так и приблизить эту область к пропускной способности канала. В основе предлагаемых методов лежит каскадирование СОК, декодируемых с помощью МПД, с другими достаточно просто декодируемыми кодами. При этом СОК могут применяться как во внутреннем, так и во внешнем каскаде кодовой конструкции.

Первый предложенный метод предназначен для декодирования каскадного кода, состоящего из внутреннего самоортогонального кода, декодируемого с помощью обычного МПД, и внешнего самоортогонального кода, декодируемого с помощью предложенного взвешенного МПД. Данный каскадный код представляет собой код-произведение, при кодировании которым исходные данные записываются в матрицу, после чего выполняется кодирование по столбцам внешним кодом, а затем по строкам внутренним кодом.

При декодировании принятого сообщения сначала обычный МПД выполняет декодирование внутреннего СОК (декодирование всех строк). Пусть данный МПД сохранил значения синдромного и разностного регистров, записав их в массивы $\mathbf{S}^{(1)}$ и $\mathbf{D}^{(1)}$, а также сформировал массив \mathbf{L} , в который занес значение суммы на пороговом элементе для каждого из своих информационных символов:

$$l_{ij} = \sum_{k \in \Theta_j} s_{ik}^{(1)} + d_{ij}^{(1)}, \quad (2)$$

где Θ_j – множество номеров проверок (элементов синдрома), участвующих при декодировании j -го символа внутреннего кода; $s_{ik}^{(1)}$ – элемент массива $\mathbf{S}^{(1)}$; $d_{ij}^{(1)}$ – элемент массива $\mathbf{D}^{(1)}$.

После этого в процесс декодирования включается предложенный МПД внешнего СОК, который в процессе работы сначала обычным образом вы-

числяет значение синдрома $\mathbf{S}^{(2)}$ и затем выполняет ряд итераций декодирования. При этом МПД внешнего кода принимает решение об изменении декодируемого символа u_{ij} в том случае, если сумма L_{ij} на пороговом элементе (ПЭ) будет больше нуля:

$$L_{ij} = (2d_{ij}^{(2)} - 1)\Delta_{ij} + \sum_{m \in \Omega_i} (2s_{mj}^{(2)} - 1)\Delta_{mj} > 0, \quad (3)$$

где весовые коэффициенты Δ_{ij} отражают надежность поступающих на пороговый элемент символов и определяются с помощью МПД внутреннего кода; $s_{mj}^{(2)}$ – элемент массива $\mathbf{S}^{(2)}$; $d_{ij}^{(2)}$ – элемент массива $\mathbf{D}^{(2)}$ внешнего кода, изначально заполненного нулями; Ω_i – множество номеров проверок, участвующих при декодировании i -го символа внешнего кода. МПД, принимающий решение об изменении декодируемого символа в соответствии с (3), будем называть взвешенным МПД.

Для описанного декодера каскадного кода и канала типа ДСК сформулированы и доказаны теоремы 1 и 2.

Теорема 1. Для канала типа ДСК при каждом изменении декодируемых символов на первой итерации взвешенного многопорогового декодера внешнего кода при весе символов внешнего кода $\Delta_{ij} = d_1 - 2l_{ij}$ происходит переход к более правдоподобному кодовому слову всего каскадного кода в целом по сравнению с предыдущим решением декодера.

Теорема 2. Для канала типа ДСК при каждом изменении декодируемых символов на второй и последующих итерациях взвешенного многопорогового декодера внешнего кода при весе символов внешнего кода $\Delta_{ij} = d_1 - 2l_{ij}$ происходит переход к более правдоподобному кодовому слову всего каскадного кода в целом по сравнению с предыдущим решением декодера.

Для доказательства данных теорем определяются расстояния между принятым из канала сообщением и решением декодера до и после изменения декодируемого символа и показывается, что расстояние при изменении декодируемого символа в соответствии с (3) только уменьшается.

При работе предложенного каскадного метода коррекции ошибок в канале с АБГШ и использовании двоичной ФМ справедлива теорема 3, доказываемая аналогично.

Теорема 3. Для канала с АБГШ и модуляции типа ФМ2 при каждом изменении декодируемых символов на произвольной итерации взвешенного многопорогового декодера внешнего кода при весе символов внешнего кода $\Delta_{ij} = -l_{ij}$ происходит переход к более правдоподобному кодовому слову всего каскадного кода в целом по сравнению с предыдущим решением декодера.

Доказанные теоремы показывают принципиальную возможность такого декодирования предложенного каскадного кода, при котором осуществляется строгое приближение решения декодера к принятому сообщению при каждом изменении декодируемого символа даже при большом числе итераций декодирования. Принципиально важно, что при этом сложность декодирования остается всего лишь линейной.

Для данного метода декодирования справедливо следствие 1.

Следствие 1. Взвешенный МПД внешнего кода предложенной каскадной схемы не изменит решения оптимального декодера.

Сформулированное следствие доказывает устойчивость решения предложенного декодера каскадного кода относительно решения оптимального декодера, т.е. если декодер каскадного кода достигнет решения оптимального декодера, то он больше его не изменит.

При разработанном варианте организации каскадирования предлагаемая каскадная схема позволяет исправлять существенно большее число ошибок, принятых из канала связи, чем при обычном каскадировании. Исправляемое число ошибок для ДСК определяется теоремой 4.

Теорема 4. Декодер каскадного кода, состоящего из внутреннего СОК с кодовым расстоянием d_1 и внешнего СОК с кодовым расстоянием d_2 , использующий взвешенный МПД для декодирования внешнего кода при весе символов $\Delta_{ij} = d_1 - 2l_{ij}$, позволяет исправлять любую конфигурацию из не более чем $(d_1 d_2 - 1)/2$ ошибок при работе в ДСК.

Определяемое данной теоремой число исправляемых ошибок предложенным декодером является максимально достижимым значением для кодов-произведения и примерно в два раза превосходит корректирующую способность обычно используемых декодеров кодов-произведения.

На рис. 4 кривой 2 показаны экспериментальные характеристики разработанного декодера каскадных кодов, состоящего из внутреннего СОК с кодовым расстоянием 7 при кодовой скорости $1/2$ и внешнего СОК с кодовым расстоянием 5 и кодовой скоростью $16/17$. Данные результаты соответствуют случаю работы предложенной каскадной схемы в канале с АБГШ при двоичной ФМ. Из сравнения представленных зависимостей с ранее описанными (кривые 1, 3, 5, 6 и 7 рис. 3 для удобства изображены на рис. 4) следует, что использование совместно с внутренним СОК внешнего СОК позволяет приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала на 1 дБ и более по сравнению с МПД для обычного СОК (кривая 1), способного обеспечить вероятность ошибки порядка 10^{-7} . При этом сложность декодирования остается на прежнем линейном уровне.

Второй предложенный метод используется для декодирования каскадного кода, состоящего из внутреннего СОК и внешнего расширенного кода Хэмминга. При работе кодера каскадного кода блок данных сначала коди-

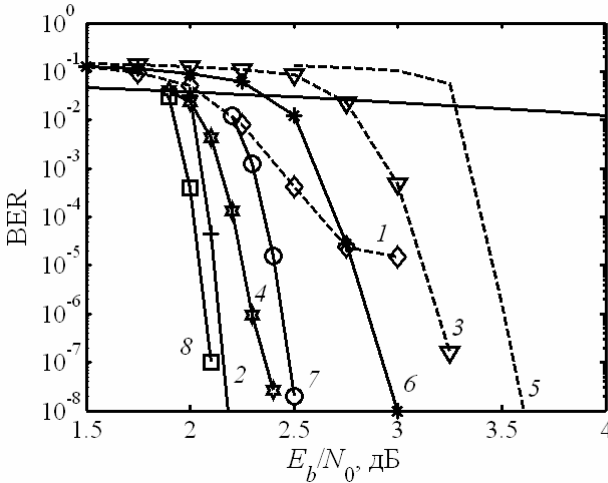


Рис. 4. Характеристики каскадных методов коррекции ошибок в канале с АБГШ и ФМ2 для кодов с $R=1/2$

руется внешним кодом (расширенным кодом Хэмминга), в результате чего получается несколько кодовых слов внешнего кода, которые затем кодируются внутренним кодом (СОК).

Для данной каскадной схемы сформулированы условия, при выполнении которых кодовое расстояние каскадного кода будет максимальным. Данные условия определяются утверждением 1.

Утверждение 1. Для того чтобы кодовое расстояние каскадного кода, состоящего из внешнего расширенного кода Хэмминга длиной N_2 и кодовым расстоянием $d_2=4$ и внутреннего самоортогонального кода с кодовым расстоянием d_1 , было равно d_1d_2 , достаточно, чтобы минимальная разность между степенями образующего полинома с ненулевыми коэффициентами для самоортогонального кода была больше, чем N_2 .

В процессе декодирования данного каскадного кода сначала выполняется декодирование внутреннего СОК с помощью МПД, который дополнительно оценивает надежность своих решений. После этого выполняют декодирование внешнего кода. Для этого можно использовать декодер, работающий в соответствии со следующим правилом:

$$C^0 = \arg \min_{C^i} \|R, C^i\| = \arg \min_{C^i} \sum_{j=1}^{N_2} \Delta_j(r_j \oplus c_j^i), \quad (4)$$

где R – принятое от МПД и, возможно, содержащее ошибки сообщение относительно кодового слова внешнего кода; C^i – возможное кодовое слово внешнего кода; операция $\|R, C^i\|$ определяет расстояние между принятым от МПД сообщением R и кодовым словом C^i ; C^0 – решение декодера

максимального правдоподобия, имеющее минимальное расстояние до принятого сообщения; N_2 – длина внешнего кода; r_j – жесткое решение МПД относительно j -го бита внешнего кода; c_j^i – значение j -го бита кодового слова C^i ; \oplus – операция «исключающее или».

Для данного метода декодирования справедлива теорема 5.

Теорема 5. Если декодер внешнего кода каскадной схемы кодирования/декодирования, состоящей из внутреннего СОК и внешнего расширенного кода Хэмминга, исправляет символы в принятом от МПД блоке в соответствии с (4) при надежности символов $\Delta_k = d_1 - 2l_k$, то происходит переход к более правдоподобию решению декодера.

Доказанная теорема определяет свойство приближения решения декодера предложенного каскадного кода к решению оптимального декодера при использовании декодера максимального правдоподобия для внешнего расширенного кода Хэмминга. Для уменьшения сложности декодера внешнего кода вместо декодера максимального правдоподобия можно использовать более простой для реализации декодер, например декодер Чейза типа 2, способный получать близкое к оптимальному решению.

Для данного метода декодирования при использовании алгоритма Чейза получена нижняя граница вероятности ошибки декодирования. При получении границы были выявлены наиболее частые события, приводящие к ошибкам декодера Чейза с выбранными параметрами, и оценены их вероятности.

1. В блоке кода Хэмминга присутствуют три ошибки. Вероятность данного события можно оценить как

$$P_1 = C_{N_2}^3 P_{\text{МПД}}^3 (1 - P_{\text{МПД}})^{N_2 - 3}. \quad (5)$$

Здесь $P_{\text{МПД}}$ – вероятность ошибки МПД внутреннего СОК. Для ДСК

$$P_{\text{МПД}} \approx \sum_{i=\frac{d_1+1}{2}}^{d_1} C_{d_1}^i p_0^i (1 - p_0)^{d_1 - i}, \quad (6)$$

где p_0 – вероятность ошибки в ДСК; d_1 – кодовое расстояние СОК.

Для канала с АБГШ и ФМ2

$$P_{\text{МПД}} \approx Q\left(\sqrt{2Rd_1 \frac{E_b}{N_0}}\right), \quad (7)$$

где $Q(x)$ – интеграл ошибок; R – кодовая скорость каскадного кода.

2. В блоке кода Хэмминга присутствуют две ошибки и среди правильных битов есть такие два, суммарная надежность которых меньше надежности двух ошибочных битов. Вероятность такого события оценивается как

$$P_2 = C_n^2 P_{\text{МПД}}^2 (1 - P_{\text{МПД}})^{n-2} \sum_{i_1=T}^J \sum_{i_2=T}^J [C_J^{i_1} C_J^{i_2} p_0^{i_1+i_2} (1 - p_0)^{2J-i_1-i_2} P_{2x}(i_1 + i_2)], \quad (8)$$

где $J=d_1-1$ – число проверок внутреннего кода относительно информационного бита; $T=(d_1+1)/2$ – значение порога на ПЭ МПД; $P_{2x}(k)$ – вероят-

ность того, что в проверочных битах для двух правильных информационных битов ошибок больше, чем $2d_1 - k$, определяемая как

$$P_{2x}(k) = C_{N_2-2}^2 \sum_{i_3=0}^{T-1} \sum_{i_4=0}^{T-1} f(i_3, i_4, k), \quad (9)$$

где функция f задана следующим образом:

$$f(i_3, i_4, k) = \begin{cases} 0, & \text{если } i_3 + i_4 \leq 2d_1 - k; \\ C_j^{i_3} C_j^{i_4} p_0^{i_3+i_4} (1-p_0)^{2d_1-i_3-i_4} & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (10)$$

Остальными событиями в силу малой величины вероятности ошибки $P_{\text{МПД}}$ в области эффективной работы МПД можно пренебречь. В результате возникновения перечисленных событий в блоке кода Хэмминга из N_2 битов появятся 4 ошибки. Тогда нижняя оценка вероятности ошибки декодирования всей каскадной схемы определяется как

$$P_b^{(L)} = 4 \frac{P_1 + P_2}{N}. \quad (11)$$

Сравнение результатов компьютерного моделирования для предложенного метода декодирования и рассчитанных оценок вероятности ошибки показало достаточную точность последних. Это позволяет использовать их для предварительного оценивания эффективности каскадной схемы. Из полученных оценок вероятности ошибки и результатов моделирования следует, что использование совместно с СОК расширенного кода Хэмминга позволяет на два или даже три порядка уменьшить вероятность ошибки декодирования по сравнению с базовым некаскадным МПД в области его эффективной работы, а также на несколько десятых децибела приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала. Пример характеристик декодера каскадного кода, состоящего из СОК с кодовым расстоянием $d_1=9$ и кодовой скоростью $1/2$, и расширенного кода Хэмминга длиной 128 битов показан на рис. 4 кривой 4.

Третий метод каскадирования основан на применении совместно с внешним СОК, декодируемым с помощью МПД, короткого внутреннего сверточного кода, декодируемого алгоритмом Витерби. Для данного метода получена нижняя оценка вероятности ошибки, использующая аддитивную границу вероятности ошибки для декодера Витерби, которая затем подставляется в выражение (6) в качестве вероятности ошибки в канале. Результаты моделирования показали, что предложенный метод позволяет только уменьшить вероятность ошибки декодирования в области эффективной работы МПД на два и более порядков.

Четвертый метод каскадирования основан на применении совместно с коротким внутренним сверточным кодом, декодируемым алгоритмом Витерби, внешнего недвоичного СОК, декодируемого с помощью q МПД. При синтезе предложенной схемы учитывался тот факт, что ошибки деко-

дера Витерби группируются в пакеты, которые будут искажать только небольшое число символов внешнего кода.

Для данного метода коррекции ошибок получены нижние оценки вероятности ошибки и результаты компьютерного моделирования. Показано, что за счет использования недвоичного СОК получается дополнительный ЭВК порядка 0,5 дБ. Пример характеристик декодера каскадного кода, состоящего из однобайтового q СОК с кодовым расстоянием $d_1=7$ и короткого сверточного кода с $K=11$, показан на рис. 4 кривой 8.

В четвертой главе «Метод декодирования двоичных самоортогональных кодов» предложено для декодирования самоортогональных кодов использовать методы декодирования низкоплотностных кодов.

Для СОК показано, что их проверочная матрица имеет разреженную структуру, свойственную низкоплотностным кодам, и для них можно построить граф Таннера, имеющий небольшое количество ребер.

Например, проверочная матрица для блочного СОК длиной 26 битов, заданного образующим полиномом $g(x)=1+x+x^4+x^6$, имеет вид

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix}
 1100101000 & 0001000000 & 000000 \\
 0110010100 & 0000100000 & 000000 \\
 0011001010 & 0000010000 & 000000 \\
 0001100101 & 0000001000 & 000000 \\
 0000110010 & 1000000100 & 000000 \\
 0000011001 & 0100000010 & 000000 \\
 0000001100 & 1010000001 & 000000 \\
 1000000110 & 0100000000 & 100000 \\
 0100000011 & 0010000000 & 010000 \\
 1010000001 & 1000000000 & 001000 \\
 0101000000 & 1100000000 & 000100 \\
 0010100000 & 0110000000 & 000010 \\
 1001010000 & 0010000000 & 000001
 \end{bmatrix} = [\mathbf{P} : \mathbf{I}]. \quad (12)$$

Граф Таннера для данного кода показан на рис. 5.

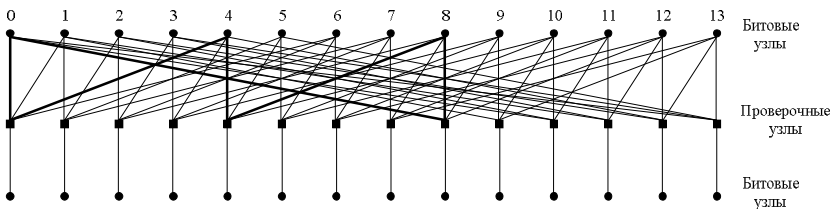


Рис. 5. Граф Таннера для СОК

Поэтому для декодирования СОК возможно применение методов декодирования низкоплотностных кодов. Среди подобных методов из-за невысокой сложности реализации и хорошей эффективности в работе был выбран и исследован min-sum алгоритм.

Результаты компьютерного моделирования показали, что применение min-sum декодера обеспечивает повышение ЭВК по сравнению с МПД на 0,5...1 дБ. При этом лучшие результаты демонстрируют полученные для МПД коды с лучшей устойчивостью к РО. Анализ графа Таннера для таких кодов показал, что они имеют меньшее число коротких циклов, оказывающих существенное влияние на эффективность метода декодирования при большом уровне шума в канале. Для примера в табл. 1 приведено число циклов длины 6, 8, 10 и 12 для СОК с различной устойчивостью к РО. Пример цикла длиной 6 выделен на рис. 5 жирными линиями.

Таблица 1. Число циклов различной длины для некоторых СОК

Код	Длина цикла			
	6	8	10	12
$R=1/2, d=9, n=1350$	204	4255	139089	1310707
$R=2/4, d=9, n=1200$	104	5318	135548	136798
$R=2/4, d=9, n=7600$	28	965	40273	904535
$R=4/8, d=9, n=9700$	0	815	36065	833902

Из анализа полученных результатов моделирования следует, что при декодировании различных кодов min-sum алгоритм и МПД ведут себя одинаково. Это позволило сделать вывод о том, что разработанные ранее подходы для повышения эффективности базового МПД могут применяться для улучшения эффективности min-sum декодера.

Некоторые характеристики min-sum декодера для СОК с кодовой скоростью $1/2$ в канале с АБГШ и модуляции ФМ2, полученные в работе, представлены на рис. 6. При декодировании выполнялось до 100 итераций работы min-sum алгоритма. Кривые 1, 3 и 5 соответствуют min-sum декодеру для обычных СОК с кодовым расстоянием 9, 13 и 17 соответственно. Кривые 2, 4 и 6 получены для СОК с параллельным каскадированием с таким же кодовым расстоянием. Кривая 7 соответствует min-sum декодеру для СОК, найденного в работе с помощью предложенного алгоритма поиска структуры кода. При добавлении к данному коду внешнего кода с контролем четности длиной 128 битов достигаются характеристики, представленные на рис. 6 кривой 8. Отметим, что применение подходов улучшения эффективности МПД позволило обеспечить близкое к оптимальному декодирование самоортогональных кодов при уровне шума, всего на 1,1 дБ превышающем пропускную способность канала. Данный результат недостижим для большинства известных практически реализуемых методов коррекции ошибок.

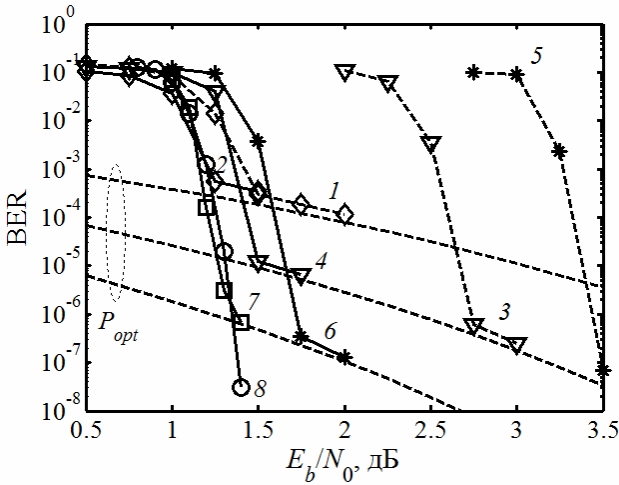


Рис. 6. Результаты моделирования min-sum декодера СОК с $R=1/2$ в канале с АБГШ и ФМ2

Сравнение сложности реализации min-sum декодера и МПД при выполнении 50 итераций декодирования СОК для некоторых типичных значений кодового расстояния выполнено в табл. 2. Разница в сложности для рабочих значений d составляет от 5 до 7 раз.

Таблица 2. Сложность декодирования одного информационного бита

d	Число операций МПД	Число операций min-sum алгоритма
7	506	2506
9	608	3308
13	812	4912
17	1016	6516

Отметим, что изложенные в главе результаты открывают совершенно новое направление в развитии теории декодирования СОК, которое, как показывают представленные результаты исследований, может обеспечить существенно более высокий уровень помехоустойчивости, чем доступный ранее.

В пятой главе «Методы повышения эффективности недвоичных многопороговых декодеров» анализируются возможности недвоичных многопороговых декодеров и предлагаются каскадные методы для повышения их эффективности.

Рассмотрены недвоичные МПД (q МПД), позволяющие с линейной сложностью декодировать даже очень длинные недвоичные СОК (q СОК). Для q МПД справедлива основная теорема декодирования недвоичных кодов, которая утверждает, что при каждом изменении декодируемых с по-

мощью q МПД символов происходит переход к более правдоподобному кодовому слову по сравнению с предыдущими состояниями декодера.

Показано, что q МПД при применении найденных с помощью предложенного во второй главе алгоритма кодов в некоторых случаях (при высокой кодовой скорости) обеспечивает эффективное декодирование при на 25 % большем уровне шума в канале, чем для известных q СОК. Для примера на рис. 7 кривой 1 показаны характеристики q МПД для известного q СОК с параллельным каскадированием с $d=17$, $q=256$, $R=1/2$, а кривой 2 – характеристики q МПД для кода с такими же параметрами с найденной при использовании разработанного алгоритма структурой. Отметим, что с помощью кода-произведения с кодовой скоростью $1/2$, состоящего из двух кодов Рида-Соломона при $q=256$, даже при нескольких десятках итераций декодирования можно обеспечить сопоставимую вероятность ошибки при вероятности ошибки в канале всего 0,18.

Дополнительное повышение корректирующей способности q МПД обеспечивается при использовании предложенных в данной главе методов.

Первый метод используется для декодирования каскадного кода, состоящего из внутреннего недвоичного самоортогонального кода и предложенных внешних недвоичных кодов Хэмминга (обычных и расширенных).

Известные недвоичные коды Хэмминга обладают рядом недостатков:

- имеют большую длину $N_2=(q^m-1)/(q-1)$;
- операции выполняются в расширенных полях Галуа;
- могут исправлять только одну ошибку в кодовом блоке.

Перечисленные недостатки не допускают применения известных недвоичных кодов Хэмминга в данной каскадной схеме. Вместо них предложено использовать модифицированные недвоичные коды Хэмминга, основанные

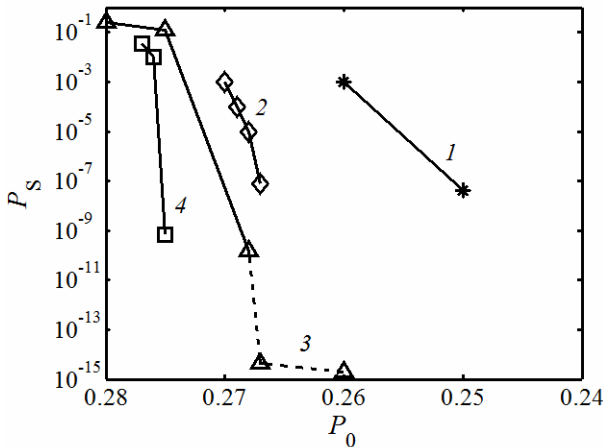


Рис. 7. Характеристики q МПД в q СК для различных кодов с $R \approx 1/2$ и $q=256$

на обычных двоичных. Данные коды имеют длину $2^m - 1$, не зависящую от размера символа, при кодировании/декодировании используется арифметика по модулю q , которая позволяет легко работать с символами практически любой размерности, и с помощью предложенных кодов в большинстве случаев возможно исправление двух ошибок в кодовом блоке.

Проверочная матрица данных кодов совпадает с проверочной матрицей двоичных кодов Хэмминга $\mathbf{H}_h = [\mathbf{C}_h : \mathbf{I}]$. Порождающая матрица будет иметь вид $\mathbf{G}_h = [\mathbf{I} : -\mathbf{C}_h^T]$. Опишем принципы декодирования данного кода.

Сначала вычисляется синдром принятого сообщения \mathbf{y} :

$$\mathbf{s}_h = \mathbf{y} \cdot \mathbf{H}_h^T. \quad (13)$$

Если в принятом сообщении присутствует только одна ошибка со значением e_j на позиции j , то сформированный в соответствии с (13) синдром может быть записан в виде

$$\mathbf{s}_h = \mathbf{s}_2^j e_j, \quad (14)$$

где \mathbf{s}_2^j – синдром двоичного кода Хэмминга при наличии единственной ошибки на j -й позиции. Следовательно, при таком синдроме на значение e_j корректируется символ принятого из канала сообщения, для которого столбец проверочной матрицы \mathbf{H}_h совпадает с синдромом \mathbf{s}_2^j .

Если в принятом сообщении присутствуют две ошибки e_i и e_j на позициях i и j , то синдром может быть представлен в виде

$$\mathbf{s}_h = \mathbf{s}_2^i e_i + \mathbf{s}_2^j e_j. \quad (15)$$

Такой синдром содержит только значения 0, e_i , e_j и $e_i + e_j$. Следовательно, при таком синдроме на значение e_i корректируется символ принятого из канала сообщения, для которого столбец матрицы \mathbf{H}_h совпадает с вектором \mathbf{s}_2^j , и на значение e_j корректируется символ принятого из канала сообщения, для которого столбец матрицы \mathbf{H}_h совпадает с вектором \mathbf{s}_2^i .

Предложенный декодер недвоичного кода Хэмминга будет исправлять две ошибки только в том случае, если их позиции в двоичном представлении имеют вид, показанный на рис. 8. В k -м бите позиции имеют общую единицу; в i -м бите позиция первой ошибки имеет единицу, а позиция второй – ноль; в t -м бите позиция первой ошибки имеет ноль, а позиция вто-

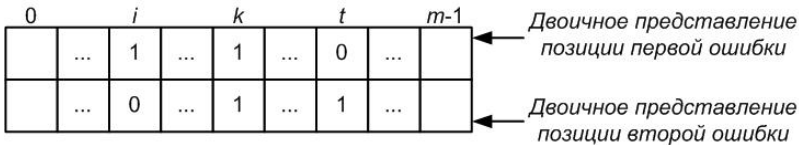


Рис. 8. Двоичное представление позиций двух ошибок, исправляемых декодером недвоичного кода Хэмминга

рой – единицу. В результате для $q=256$ исправляется порядка 71 % блоков с двумя ошибками.

Большой корректирующей способностью будут обладать модифицированные недвоичные расширенные коды Хэмминга, имеющие дополнительно одну общую проверку по модулю q . Две ошибки в блоке такого кода не исправляются только в том случае, если значения ошибок в двух символах совпадают между собой или их сумма равна q . Например, для $q=256$ исправляется порядка 99,2 % блоков с двумя ошибками.

Для метода декодирования каскадного кода, использующего как обычные, так и расширенные недвоичные коды Хэмминга, получены нижние оценки вероятности ошибки декодирования. При получении оценок выявлены наиболее часто встречающиеся события, приводящие к ошибкам. Например, для случая расширенных недвоичных кодов Хэмминга имеем следующие события:

1. В блоке из N_2 символов есть два ошибочных символа, остальные символы правильные. Значения ошибок двух символов совпадают между собой или их сумма равна q . В этом случае после декодирования в блоке останется две ошибки. Вероятность ошибки на выходе декодера равна:

$$P_{h1} = \frac{2 \cdot (1 - P_s)^{N_2 - 2} P_s^2 (N_2 - 1)}{q}, \quad (16)$$

где P_s – оценка вероятности символьной ошибки после q МПД; N_2 – длина недвоичного кода Хэмминга; q – размер алфавита.

2. В блоке из N_2 символов есть три ошибочных символа, остальные символы правильные. В этом случае после декодирования в блоке останется три ошибки. Вероятность ошибки на выходе декодера:

$$P_{h2} = \frac{(1 - P_s)^{N_2 - 3} P_s^3 (N_2 - 1)(N_2 - 2)}{2}. \quad (17)$$

Вероятности других типов событий несущественно влияют на результирующую вероятность ошибки.

Получаем нижнюю оценку вероятности символьной ошибки декодирования каскадной схемы с недвоичным расширенным кодом Хэмминга:

$$P_{err} = P_{n1} + P_{n2}. \quad (18)$$

Сравнение результатов компьютерного моделирования данных схем и нижних оценок вероятности ошибки показало достаточно хорошую точность последних. Из результатов моделирования также следует возможность уменьшения с помощью предложенных методов каскадирования вероятности ошибки декодирования на 5 и более порядков по сравнению с исходным q МПД при сохранении линейной сложности реализации. Пример характеристик каскадной схемы, состоящей из q СОК с $R=8/16$, $q=256$, $d=17$ и предложенного недвоичного расширенного кода Хэмминга с длиной $N_2=128$, показан на рис. 7 кривой 3. Часть кривой, представленная пунктиром, получена при использовании нижней оценки вероятности ошибки. При этом слож-

ность декодирования из-за добавления декодера недвоичного расширенного кода Хэмминга увеличивается не более чем на 35 %.

Следующий метод используется для декодирования каскадного кода, состоящего из внутреннего q СОК и внешнего q СОК. Данные коды образуют обычный код-произведение. При декодировании каскадного кода сначала выполняется декодирование внутреннего q СОК с помощью обычного q МПД, после чего в соответствии со сформулированными правилами выполняется декодирование внешнего q СОК.

Показано, что если при декодировании внешнего кода используется предложенное правило декодирования, то при каждом изменении декодируемого символа осуществляется приближение решения декодера всего каскадного кода к принятому из канала сообщению.

Данное правило заключается в том, что если среди всех проверок и элементов разностного регистра, связанных с декодируемым символом u_{ij} , выбрать ненулевое значение проверки h , для которого сумма

$$n_{ij}^{(h)} + \sum_{m \in \Omega_i} n_{mj}^{(s_{mj}^{(2)} - h)} \text{ максимальна и удовлетворяет условию} \\ n_{ij}^{(0)} + \sum_{m \in \Omega_i} n_{mj}^{(s_{mj}^{(2)})} < n_{ij}^{(h)} + \sum_{m \in \Omega_i} n_{mj}^{(s_{mj}^{(2)} - h)}, \quad (19)$$

то при изменении символа u_{ij} на значение h расстояние между принятым сообщением и кодовым словом полного каскадного кода уменьшится и, следовательно, произойдет переход к более правдоподобию решению.

Здесь $n_{ij}^{(x)}$ – число элементов синдромного и разностного регистров внутреннего q СОК, соответствующих информационному символу u_{ij} , значение которых равно x ; Ω_i – множество номеров проверок, участвующих при декодировании i -го символа внешнего кода; $s_{mj}^{(2)}$ – элемент массива синдрома $S^{(2)}$ декодера внешнего q СОК.

Следует заметить, что данный подход при большом числе проверок, связанных с декодируемым символом, оказывается сложным для реализации. При незначительных потерях в эффективности можно организовать декодирование внешнего кода с помощью обычного q МПД, который при работе не будет использовать информацию, полученную от q МПД внутреннего кода.

Пример характеристик данного метода каскадирования представлен на рис. 7 кривой 4, которая соответствует эффективности работы декодера каскадного кода, состоящего из внутреннего q СОК с кодовым расстоянием $d=5$ и кодовой скоростью $R=8/16$ и внешнего q СОК с кодовым расстоянием $d=7$ и кодовой скоростью $R=19/20$. При этом q МПД внешнего кода работал без учета дополнительной информации от декодера внутреннего кода. Отметим, что предложенный метод декодирования способен эффективно работать даже при 27,5 % байтовых ошибок в q -ичном симметричном канале.

В шестой главе «Вопросы реализации многопороговых декодеров» рассматриваются некоторые вопросы практической реализации МПД.

Представлены макеты МПД сверточных кодов, реализованные на современной элементной базе с участием соискателя. Первый макет (рис. 9,а) был создан в ФГУП НИИР в 2004 г. При реализации использовалась ПЛИС семейства Spartan-II типа XS2S200-PQ208 с эквивалентной емкостью 200000 системных вентилей. Информационная скорость до 200 Мбит/с, кодовая скорость 1/2, задержка декодирования 10000 битов. Обеспечивает вероятность ошибки декодирования $P_b=10^{-5}$ при $E_b/N_0=2,9$ дБ. При этом достигается ЭВК более 6,5 дБ.

Следующий макет (рис. 9,б) выполнен в ИКИ РАН в 2007 г. Кодек МПД создан на базе ПЛИС Altera Stratix EP1S20. Позволяет декодировать потоки данных с информационной скоростью свыше 1 Гбит/с. При этом выполняются до 40 итераций декодирования. Обеспечивает вероятность ошибки декодирования $P_b=10^{-5}$ при $E_b/N_0=1,9$ дБ. При этом достигается ЭВК более 7,5 дБ.

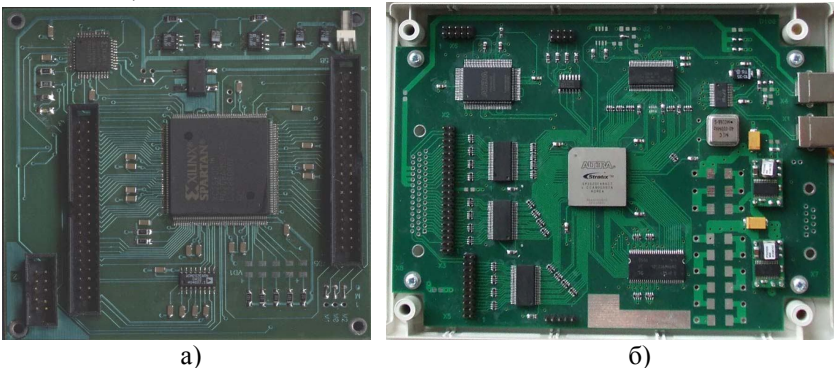


Рис. 9. Фото ПЛИС МПД сверточных кодов, реализованных в ФГУП НИИР (слева) и в ИКИ РАН (справа)

Предложен метод установления и контроля ветвевой синхронизации для МПД сверточного кода с несколькими информационными и проверочными ветвями. Метод основан на оценивании вероятности невыполнения проверок в регистрах синдрома МПД для используемого СОК.

Разработан метод уменьшения задержки декодирования МПД сверточного кода и описано реализующее его устройство. Показано, что данный метод позволяет уменьшить задержку декодирования в 2...4 раза за счет увеличения объема вычислений в 1,5...2 раза. Описано запатентованное устройство декодирования линейных кодов, в котором применяется данный метод уменьшения задержки декодирования.

Предложено и запатентовано устройство многопорогового декодирования самоортогонального кода для гауссовских каналов, использующее

три различных способа вычисления веса проверок. Показано, что поочередное применение данных способов определения веса позволяет примерно на 0,5 дБ улучшить ЭВК для МПД в гауссовских каналах по сравнению с определением веса только на основании веса проверочного символа.

В заключении сформулированы основные теоретические и практические результаты работы, даны рекомендации по их использованию.

В приложениях представлены спектры некоторых самоортогональных кодов, полученные с применением предложенной методики, и описаны разработанные программные средства моделирования систем передачи данных с применением современных методов помехоустойчивого кодирования, приведены копии актов внедрения результатов работы, а также копии патентов на изобретения, полезные модели и копии свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена теория каскадирования двоичных линейных кодов, декодируемых с помощью МПД, позволяющая повысить энергетический выигрыш кодирования в ряде случаев на 1 дБ по сравнению с базовым МПД при сохранении линейной сложности реализации, включающая:

– методы декодирования ряда каскадных кодов, составляющим элементом которых является двоичный СОК, декодируемый с помощью МПД;

– совокупность теорем, доказывающих свойство приближения решения предложенных декодеров разработанных каскадных кодов к решению оптимального декодера всего каскадного кода при каждом изменении декодируемого бита и определяющих гарантированное число исправляемых при декодировании ошибок;

– нижние оценки вероятности ошибки декодирования для предложенных методов.

2. Разработаны методы декодирования символьных каскадных кодов, включающих недвоичные самоортогональные коды, декодируемые с помощью q МПД, а также нижние оценки вероятности ошибки декодирования для данных методов.

3. Впервые предложено применить методы декодирования низкоплотностных кодов к самоортогональным кодам. Данный подход открывает новое направление в декодировании самоортогональных кодов.

4. Предложены методики и алгоритмы, позволяющие получать новые самоортогональные коды с минимальным уровнем размножения ошибок при многопороговом декодировании.

5. Разработана методика повышения эффективности МПД при использовании многопозиционных систем модуляции, позволяющая за счет согласования систем кодирования и модуляции улучшить ЭВК в ряде случаев на 0,8 дБ.

6. Результаты работы доведены до уровня макетов, реализованных на ПЛИС. По ряду решений получены патенты на изобретения и полезные модели.

7. Создан набор программных средств для исследования помехоустойчивых кодов, который позволяет выполнять детальное экспериментальное исследование существующих и только разрабатываемых методов коррекции ошибок и будет полезен специалистам, занимающимся проектированием систем радиосвязи.

Таким образом, в представленной диссертационной работе была решена крупная научная проблема, заключающаяся в разработке эффективных и простых для практической реализации методов исправления ошибок, возникающих при передаче цифровых данных по каналам с шумами. Данная проблема имеет важное хозяйственное значение, поскольку развитие современных систем радиосвязи невозможно без использования алгоритмов цифровой обработки сигналов, реализующих быстродействующие методы кодирования и декодирования с высокой корректирующей способностью.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Справочник

1. Овечкин, Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: справочник [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004.

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

2. Овечкин, Г.В. Использование многопорогового декодера в каскадных схемах [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Вестник РГРТА. – Рязань, 2003. – Вып. 11. – С.112–115.

3. Овечкин, Г.В. Эффективные алгоритмы помехоустойчивого кодирования для цифровых систем связи [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Электросвязь. – М., 2003. – №9. – С.34–37.

4. Овечкин, Г.В. Методы улучшения эффективности многопорогового декодера самоортогональных кодов [Текст] / Г.В. Овечкин // Вестник РГРТА. – Рязань, 2004. – Вып. 14. – С.54–58.

5. Овечкин, Г.В. Многопороговые декодеры для высокоскоростных спутниковых каналов связи: новые перспективы [Текст] / Г.В. Овечкин, С.Е. Жуков, В.В. Золотарев, Ю.Б. Зубарев, В.В. Строков // Электросвязь. – М., 2005. – №2. – С.10–12.

6. Овечкин, Г.В. Многопороговые декодеры для каналов с предельно высоким уровнем шума [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Телекоммуникации. – М., 2005. – №9. – С.29–34.

7. Овечкин, Г.В. Многопороговые алгоритмы для спутниковых сетей с оптимальными характеристиками [Текст] / Г.В. Овечкин, Ю.Б. Зубарев, В.В. Золотарев, Т.А. Дмитриева // Электросвязь. – М., 2006. – №10. – С.9–11.

8. Овечкин, Г.В. Помехоустойчивое кодирование для цифровых систем связи [Текст] / Г.В. Овечкин, Н.Н. Гринченко // Известия ТРТУ. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – №15(70). – С.5–10.

9. Овечкин, Г.В. Многопороговое декодирование в каналах с многопозиционной модуляцией [Текст] / Г.В. Овечкин, Н.Н. Гринченко, В.В. Золотарев, П.В. Овечкин // Вестник РГРТУ. – Рязань: РГРТУ, 2006. – Вып. 19. – С.179–182.

10. Овечкин, Г.В. Вопросы применения многопороговых декодеров в каналах связи с многопозиционными системами сигналов [Текст] / Г.В. Овечкин, Н.Н. Гринченко // Цифровая обработка сигналов. – М., 2006. – №4. – С.29–33.

11. Овечкин, Г.В. Обзор методов помехоустойчивого кодирования с использованием многопороговых алгоритмов [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев, Ю.Б. Зубарев // Цифровая обработка сигналов. – М., 2008. – №1. – С.2–11.

12. Овечкин, Г.В. Помехоустойчивое кодирование в цифровых системах передачи данных [Текст] / Г.В. Овечкин, Ю.Б. Зубарев // Электросвязь. – М., 2008. – №12 – С.58–61.

13. Овечкин, Г.В. Использование недвоичного многопорогового декодера в каскадных схемах коррекции ошибок [Текст] / Г.В. Овечкин, П.В. Овечкин // Вестник РГРТУ. – Рязань: РГРТУ, 2009. – Вып. 30. – №4. – С.7–12.

14. Овечкин, Г.В. Эффективное многопороговое декодирование недвоичных кодов [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Радиотехника и электроника. – М., 2010. – Т.55. – №3. – С.324–329.

15. Овечкин, Г.В. Недвоичные многопороговые декодеры и другие методы коррекции ошибок в символьной информации [Текст] / Г.В. Овечкин, Н.А. Кузнецов, В.В. Золотарев, П.В. Овечкин // Радиотехника. – М., 2010. – №6. – Вып. 141. – С.4–9.

Патенты на изобретения и полезные модели

16. Овечкин, Г.В. Устройство для декодирования линейных кодов [Текст] / Г.В. Овечкин, А.Н. Гаврилов, В.В. Золотарев, А.Н. Пылькин // Патент Российской Федерации на изобретение №2212766 от 20.11.03.

17. Овечкин, Г.В. Устройство многопорогового декодирования линейных кодов для гауссовских каналов [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Патент Российской Федерации на полезную модель №44215 по заявке №2004130722 от 28.10.2004.

Свидетельства об официальной регистрации программы

18. Овечкин, Г.В. Моделирование многопорогового алгоритма декодирования (MPDSim) [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Свидетельство РОСПАТЕНТ №2002610806 о регистрации программы для ЭВМ от 27.05.02.

19. Овечкин, Г.В. Моделирование работы декодера турбо кода (turboSim) [Текст] / Г.В. Овечкин // Свидетельство РОСПАТЕНТ №2002610807 о регистрации программы для ЭВМ от 27.05.02.

20. Овечкин, Г.В. Имитатор цифрового канала передачи данных (ChannelSim) [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Свидетельство РОСПАТЕНТ №2005611304 о регистрации программы для ЭВМ от 31.05.05.

21. Овечкин, Г.В. Файловый кодек на базе многопорогового декодера (MTDProtect) [Текст] / Г.В. Овечкин, М.Д. Бубнов, В.В. Золотарев, П.В. Овечкин // Свидетельство РОСПАТЕНТ №2009612632 о регистрации программы для ЭВМ от 25.05.09.

Статьи в научно-технических журналах

22. Овечкин, Г.В. Алгоритмы многопорогового декодирования для гауссовских каналов [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Информационные процессы. – М., 2008. – Т.8. – №1 – С.68–83.
23. Овечкин, Г.В. Многопороговые методы декодирования помехоустойчивых кодов [Текст] / Г.В. Овечкин // Труды НИИР. – М., 2008. – №3. – С.43–49.
24. Овечкин, Г.В. Архитектура и реализация декодера LDPC кодов для демодулятора DVB-S2 [Текст] / Г.В. Овечкин, А.В. Чикин // Труды НИИР. – М., 2008. – №3. – С.58–66.
25. Овечкин, Г.В. Оптимизация структуры недвоичных самоортогональных кодов для схем параллельного кодирования [Текст] / Г.В. Овечкин, П.В. Овечкин // Труды НИИР. – М., 2009. – №2. – С.34–38.
26. Овечкин, Г.В. Алгоритмы МПД [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев, И.В. Чулков, Р.Р. Назиров // Российский космос. – М., 2009. – №1. – С.60–63.

Статьи в сборниках научных трудов

27. Овечкин, Г.В. Борьба с пакетами ошибок на выходе многопорогового алгоритма декодирования [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТА, 2002. – С.88–90.
28. Овечкин, Г.В. Каскадирование многопорогового алгоритма декодирования с кодами с контролем четности [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Новые информационные технологии: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТА, 2002. – С.113–115.
29. Овечкин, Г.В. Эффективность каскадной схемы кодирования на базе многопорогового декодера и кодов Хэмминга [Текст] / Г.В. Овечкин, П.В. Овечкин // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТА, 2004. – С.79–82.
30. Овечкин, Г.В. Эффективность каскадных схем кодирования на базе многопорогового декодера [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев, П.В. Овечкин // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТА, 2005. – С.119–123.
31. Овечкин, Г.В. Выбор метода коррекции ошибок для высокоскоростной линии связи [Текст] / Г.В. Овечкин // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – С.43–47.
32. Овечкин, Г.В. Многопороговые декодеры для систем передачи и хранения больших объемов данных [Текст] / Г.В. Овечкин // Задачи системного анализа, управления и обработки информации: межвуз. сб. науч. тр. – М.: МГУП, 2010. – Вып. 3 – С.100–105.
33. Овечкин, Г.В. Высокоскоростной многопороговый декодер для систем передачи больших объемов данных [Текст] / Г.В. Овечкин, Ю.Б. Зубарев, В.В. Золотарев // Научно-технический сборник «Техника средств связи», серия «Техника телевидения», юбилейный выпуск. – М.: МНИТИ, 2010. – С.41–43.
34. Овечкин, Г.В. Применение min-sum алгоритма для декодирования блоковых самоортогональных кодов [Текст] / Г.В. Овечкин // Математическое и про-

граммное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – С.99–105.

35. Овечкин, Г.В. Эффективное недвоичное многопороговое декодирование помехоустойчивых кодов для систем дистанционного зондирования земли [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарёв, Р.Р. Назиров, П.В. Овечкин, И.В. Чулков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сборник статей. – М.: ИКИ РАН, 2010. – Т.7. – №2. – С.269–274.

36. Овечкин, Г.В. Программные средства моделирования систем передачи данных [Текст] / Г.В. Овечкин, Н.Н. Гринченко, В.Ю. Шароватов // Информационные технологии в научных исследованиях: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2010. – С.47–52.

Доклады в трудах зарубежных конференций

37. Ovechkin ,G.V. Algorithm of multithreshold decoding for self-orthogonal codes over Gaussian channels [Текст] / G.V. Ovechkin, S.V. Averin, V.V. Zolotarev // 10-th International Symposium on Communication Theory and Application, ISCTA'09, July, UK, Ambleside. 2009.

38. Ovechkin ,G.V. Non-binary multithreshold decoders of symbolic self-orthogonal codes for q-ary symmetric channels [Текст] / G.V. Ovechkin, V.V. Zolotarev // 10-th International Symposium on Communication Theory and Application, ISCTA'09, July, UK, Ambleside. 2009.

Доклады на международных и всероссийских конференциях

39. Овечкин, Г.В. Реальный энергетический выигрыш кодирования для спутниковых каналов [Текст] / Г.В. Овечкин // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: IX-я междунауч.-техн. конф. – Рязань: РИРО, 2000. – С.92–95.

40. Овечкин, Г.В. Сложность реализации эффективных методов декодирования помехоустойчивых кодов [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // 6-я междунауч. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М., 2004. – Т.1. – С.220–221.

41. Овечкин, Г.В. Применение многопорогового декодера в схемах с параллельным каскадированием [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Труды 59-й науч. сессии, посв. Дню радио. – М., 2004. – Т.2. – С.121–123.

42. Овечкин, Г.В. Применение многопорогового декодера в системах передачи данных с многопозиционными системами модуляции [Текст] / Г.В. Овечкин, П.В. Овечкин, М.А. Денисова // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: 13-я междунауч.-техн. конф. – Рязань: РГРТА, 2004. – С.58–59.

43. Овечкин, Г.В. Вопросы применения многопороговых декодеров в каскадных схемах кодирования [Текст] / Г.В. Овечкин, А.Н. Пылькин, В.В. Золотарев // Всеросс. науч.-техн. конф. «Информационно-телекоммуникационные технологии». – М.: МЭИ, 2004. – С.234–236.

44. Овечкин, Г.В. Аппаратная реализация многопороговых декодеров [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // 7-я междунауч. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М., 2005. – Т.2. – С.451–454.

45. Овечкин, Г.В. Построение самоортогональных кодов, устойчивых к эффекту размножения ошибок [Текст] / Г.В. Овечкин, П.В. Овечкин // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: 14-я междунауч.-техн. конф. – Рязань: РГРТА, 2005. – С.70–71.
46. Овечкин, Г.В. Разработка каскадных схем коррекции ошибок на основе многопороговых декодеров [Текст] / Г.В. Овечкин, Н.Н. Гринченко, П.В. Овечкин // 8-я междунауч. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М., 2006. – Т.1. – С.60–63.
47. Овечкин, Г.В. Эффективность многопороговых декодеров при использовании многопозиционных ФМ и КАМ [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев, П.В. Овечкин // 9-я междунауч. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М., 2007. – Т.1. – С.24–28.
48. Овечкин, Г.В. Перспективные методы помехоустойчивого кодирования для высокоскоростных спутниковых каналов связи [Текст] / Г.В. Овечкин // 5-я междунауч.-техн. конф. «К.Э. Циолковский – 150 лет со дня рождения. Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика». – Рязань: РГРТУ, 2007. – С.181–184.
49. Овечкин, Г.В. Помехоустойчивость приемника спутниковых сигналов DVB-S2 [Текст] / Г.В. Овечкин, А.В. Чикин // 11-я междунауч. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М., 2009. – С.578–580.
50. Овечкин, Г.В. Новые алгоритмы декодирования для высокоскоростных спутниковых каналов [Текст] / Г.В. Овечкин, Ю.Б. Зубарев, В.В. Золотарев // 11-я междунауч. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Пленарный доклад. – М., 2009. – С.6–9.
51. Овечкин, Г.В. Высокоскоростной многопороговый декодер для систем передачи больших объемов данных [Текст] / Г.В. Овечкин, Ю.Б. Зубарев, В.В. Золотарев // 12-я междунауч. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». Пленарный доклад. – М., 2010. – С.10–13.
52. Овечкин, Г.В. Эффективное многопороговое декодирование недвоичных самоортогональных кодов [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев, П.В. Овечкин // 12-я междунауч. конф. и выст. «Цифровая обработка сигналов и ее применение». – М., 2010. – С.21–24.
53. Овечкин, Г.В. Исследование недвоичных многопороговых декодеров в каналах связи с пакетирующимися ошибками [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев, П.В. Овечкин // 65-я научная сессия, посвященная Дню радио: тезисы докладов. – М.: РНТОРЭС, 2010 – С.376–378.
54. Овечкин, Г.В. Недвоичное многопороговое декодирование для перспективных систем цифрового телевидения [Текст] / Г.В. Овечкин, Ю.Б. Зубарев, П.В. Овечкин // 5-я междунауч. конф. «Современные телевизионные технологии. Состояние и направления развития». – М.: МНИТИ, 2010. – С.33–34.
55. Овечкин, Г.В. Применение многопорогового декодирования для повышения достоверности передачи данных [Текст] / Г.В. Овечкин, В.В. Золотарев // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: 16-я междунауч.-техн. конф. – Рязань: РГРТУ, 2010. – С.3–5.

ОВЕЧКИН Геннадий Владимирович

**ТЕОРИЯ КАСКАДНОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ КОДОВ
ДЛЯ ЦИФРОВЫХ РАДИОКАНАЛОВ
НА ОСНОВЕ МНОГОПороГОВЫХ АЛГОРИТМОВ**

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Подписано в печать 04.03.2011. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,0.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.