

На правах рукописи



**Дмитриева Татьяна Александровна**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ  
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ  
НА ОСНОВЕ МНОГОПороГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ  
ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.13.13 –

«Телекоммуникационные системы и компьютерные сети»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

**Рязань 2008**

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук  
**Золотарёв Валерий Владимирович**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
**Шлома Александр Михайлович**

кандидат технических наук, доцент  
**Бузыкканов Сергей Николаевич**

Ведущая организация: **Рязанское высшее военное командное училище связи (военный институт) им. Маршала Советского Союза М.В. Захарова**

Защита состоится **«06» ноября 2008 г. в 12 часов** на заседании диссертационного совета Д 212.211.02 в ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан «01» октября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук,  
доцент



И.А. Телков

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Начавшийся в конце прошлого тысячелетия интенсивный переход к системам обработки и передачи информации цифрового формата на сегодня становится все более масштабным и характеризуется весьма быстрым и значительным повышением требований к достоверности цифровых данных. Несомненно, ведущую роль в обеспечении высокого уровня надежности и качества передачи дискретной информации играют современные методы помехоустойчивого кодирования.

Применение помехоустойчивого кодирования в цифровых системах передачи данных позволяет получить энергетический выигрыш кодирования (ЭВК), каждый 1 дБ которого зарубежные специалисты более 20 лет назад оценивали в миллионы долларов. Сейчас ценность ЭВК возросла еще больше, поскольку появилась возможность уменьшать размеры очень дорогих антенн или повышать дальность связи, увеличивать скорость передачи или снижать необходимую мощность передатчика, улучшать другие важные свойства современных систем связи. Следует заметить, что их стоимость растет все быстрее и уже совершенно несопоставима с теми затратами, которые были необходимы несколько десятилетий назад. Кроме того, существенно возрастают взаимные помехи приему между различными системами, появляется все больше экологических ограничений на мощность передатчиков, растет потребность в резком увеличении скоростей обмена данными между сетями, а также в значительном росте достоверности данных.

Именно поэтому задача увеличения ЭВК на базе методов помехоустойчивого кодирования является чрезвычайно актуальной, а достоинства разработки простых и эффективных алгоритмов декодирования для решения этой задачи невозможно переоценить.

В области повышения помехоустойчивости передаваемой информации значительный вклад внесли такие отечественные и зарубежные ученые, как В.А. Котельников, К. Шеннон, Дж. Кларк, Дж. Кейн, У. Питерсон, Э. Уэлдон, Дж. Месси, Т. Кассама, Н. Токура, А.М. Шлома, В.В. Зяблов, В.В. Золотарёв, Р. Галлагер, Д. Форни, Э.Л. Блох, и др.

В настоящее время в теории кодирования известно всего несколько методов кодирования/декодирования, обеспечивающих работу вблизи пропускной способности канала. Среди них можно выделить активно развивающиеся за рубежом турбо и турбоподобные коды и низкоплотностные коды. Однако последнее десятилетие однозначно показало, что данные методы все еще обладают достаточно большой вычислительной сложностью, что затрудняет их практическое применение в высокоскоростных системах передачи данных. В связи с этим возникает задача поиска более простых и, соответственно, более надежных и дешевых при практической реализации методов кодирования/декодирования. Эта задача, учитывая постоянный рост скоростей обмена информацией, с каждым годом становится все актуальнее.

Наиболее полно указанным требованиям отвечает максимально простой и одновременно очень эффективный метод многопорогового декодирования (МПД). МПД алгоритмы являются итеративными процедурами, при этом

они обладают свойством строгого роста правдоподобия своих решений в течение всего процесса исправления ошибок в искаженном шумами сообщении. Около двухсот научных работ в области многопорогового декодирования позволяют считать, что МПД могут быть признаны основным методом декодирования для многих современных высокоскоростных систем передачи данных с предельно возможными уровнями энергетического выигрыша и очень высоким быстродействием.

Однако возможности этого простого и эффективного метода не использованы на все 100%, поскольку в соответствии с теорией кодирования для МПД возможно дополнительное увеличение ЭВК на несколько децибел. Из этого следует, что задача разработки модификаций многопорогового алгоритма декодирования, которые повысят эффективность его работы при максимально возможном сохранении простоты практической реализации, является очень актуальной. Кроме того, на данный момент не проводилось полное исследование характеристик МПД в условиях работы в каналах с неравномерной энергетикой. Исследование эффективности применения МПД в этих каналах может позволить улучшить характеристики систем передачи данных.

**Целью диссертационной работы** является разработка и исследование алгоритмов помехоустойчивого кодирования на основе многопорогового декодера, которые повысят эффективность его работы при максимально возможном сохранении простоты реализации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- исследовать наиболее известные и важные методы декодирования помехоустойчивых кодов для того, чтобы выбрать направление дальнейшего исследования;
- разработать и исследовать алгоритмы на основе МПД, обеспечивающие повышение достоверности передачи данных при минимально возможном увеличении сложности их реализации по сравнению с базовым многопороговым алгоритмом;
- провести исследование работы многопороговых декодеров в каналах с неравномерной энергетикой при использовании различных сигнальных конструкций;
- разработать методику повышения эффективности МПД в канале с неравномерной энергетикой;
- разработать программные средства моделирования модификаций многопорогового алгоритма коррекции ошибок для исследования их эффективности.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в том, что предложены и исследованы новые алгоритмы на базе многопорогового декодера, повышающие его эффективность при умеренном повышении сложности. Также впервые проведено исследование работы МПД в каналах с неравномерной энергетикой для различных сигнальных конструкций, предложена методика повышения эффективности МПД в таких каналах. Кроме того, впервые строго доказано, что при использовании известной каскадной схемы из МПД и кода с контролем четности каждое изменение декодируемых символов позво-

ляет перейти к более правдоподобию слову всего каскадного кода в целом. Ранее это свойство подразумевалось на интуитивном уровне.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- многоуровневый многопороговый алгоритм декодирования;
- алгоритм многопорогового декодирования с предварительной оценкой ошибочности проверок и его модификация;
- методика улучшения эффективности МПД для его использования в каналах с неравномерной энергетикой;
- доказательство основной теоремы МПД для случая применения многопорогового декодера в каскадной схеме с кодом контроля четности.

**Практическая ценность работы** состоит в следующем. Разработанный многоуровневый многопороговый алгоритм позволяет приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала более чем на 0,4 – 0,5 дБ. Предложенные алгоритмы многопорогового декодирования с предварительной оценкой ошибочности проверок позволяют получить дополнительный энергетический выигрыш от кодирования примерно равный 0,3 – 0,5 дБ. Разработанная методика улучшения эффективности МПД в каналах с неравномерной энергетикой при использовании различных систем сигналов позволяет приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала на 0,3 – 1 дБ.

**Внедрение результатов работы.** Полученный в результате работы сверточный код с кодовой скоростью  $R = 2/3$  для минимального кодового расстояния  $d = 9$  принят к использованию в системах специального цифрового телевидения в ведущем институте Министерства связи – Федеральном государственном унитарном предприятии “Научно-исследовательский институт радио” (ФГУП НИИР), также для этого кода начата процедура стандартизации. Разработанные программные средства моделирования работы многопорогового алгоритма декодирования и его модификаций используются в учебном процессе Рязанского государственного радиотехнического университета, что подтверждается актами о внедрении.

**Достоверность** полученных в диссертационной работе результатов подтверждается:

- корректным использованием методов, выводов и результатов теории кодирования, теории вероятностей и математической статистики;
- результатами компьютерных экспериментов, полученными при статистическом моделировании известных и новых алгоритмов кодирования и декодирования помехоустойчивых кодов, совпадающих с теоретическими оценками;
- имеющимися актами внедрения.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на следующих конференциях и семинарах.

1. Межвузовская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов “Новые информационные технологии в учебном процессе и производстве”. – 2004 г., Рязань.

2. 5-я межрегиональная научно-практическая конференция “Современные информационные технологии в образовании”. – 2004 г., Рязань.

3. Всероссийский научно-практический семинар “Сети и системы связи”. – 2005–2008 гг., Рязань.

4. 14-я и 15-я международные научно-технические конференции “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций”. – 2005, 2008 гг., Рязань.

5. 39-я и 41-я научно-технические конференции Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2006, 2008 гг., Рязань.

6. 40-я научно-методическая конференция Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2007 г., Рязань.

7. 8-я, 9-я и 10-я международные конференции-выставки “Цифровая обработка сигналов и ее применение”. – 2006–2008 гг., Москва.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 20 работ, из них 10 в соавторстве. В их числе 3 статьи в журналах, рецензируемых ВАК, 3 статьи в межвузовских сборниках научных трудов, 13 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях, 1 патент на полезную модель, зарегистрированный в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Содержит 132 страницы, 4 таблицы, 47 рисунков. Библиографический список состоит из 82 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, определены цели и задачи, рассматриваемые в диссертации. Перечислены новые научные результаты, полученные в данной работе, показаны ее практическая ценность и апробация, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены наиболее известные и важные методы кодирования/декодирования помехоустойчивых кодов, представлены их характеристики и сложность реализации, выбраны направления исследований.

В настоящее время в теории кодирования известно много кодов и методов их декодирования, различающихся длиной, корректирующей способностью, сложностью практической реализации и рядом других параметров. Проведено сравнение наиболее известных и используемых методов помехоустойчивого кодирования и соответствующих им алгоритмов декодирования. Рассмотрена одна из возможных классификаций кодов с исправлением ошибок и методов их декодирования. Все коды разделены на три группы – некаскадные блочные, некаскадные сверточные и каскадные коды.

Показано, что многопороговый декодер, являющийся развитием простейшего порогового декодера, обладает хорошими характеристиками при декодировании всех трех групп кодов. Огромное преимущество МПД перед всеми другими схемами декодирования по числу операций позволяет считать, что многопороговые алгоритмы могут быть признаны одним из основных методов кодирования/декодирования для многих современных высокоскоростных систем связи с предельно возможными уровнями энергетического выигрыша и очень высоким быстродействием.

Кодирование с исправлением ошибок можно рассматривать как инструмент, реализующий различные компромиссы системы связи. В настоящее время существуют мощные и высокоскоростные каналы связи со скоростью от нескольких десятков до нескольких сот Мбит. Многие из рассмотренных методов декодирования (даже методы с большой сложностью) могут быть легко реализованы в подобных каналах. Но при этом существуют и каналы со средней и низкой скоростью, при работе в которых также необходимо повышать эффективность от применения канального кодирования. Для более эффективного использования этих каналов необходимо более полно задействовать их дополнительные вычислительные ресурсы. Можно для этой цели использовать, например, алгоритм Витерби, увеличив длину используемых кодов. При этом рост эффективности в результате окажется небольшим и мощности более медленных каналов все равно не будут задействованы полностью.

Высокие характеристики, кроме МПД, могут обеспечить всего несколько методов. Но учет проблемы сложности при сопоставимых уровнях ЭВК показывает, что в этом случае алгоритмы на базе МПД сохраняют близость по своей сложности реализации к простейшему декодеру порогового типа и поэтому в большинстве случаев применения кодирования являются наиболее предпочтительными методами декодирования в приемлемых по стоимости высокоскоростных системах связи. Кроме того, модификации алгоритма МПД, сложность которых выше в несколько раз по сравнению со сложностью исходного МПД, но все еще существенно ниже сложности других эффективных методов помехоустойчивого кодирования, могут быть использованы и в медленных каналах связи (1–10 Мбит/с). Также следует учесть, что возможности многопорогового декодера в соответствии с теорией кодирования еще не использованы на 100%, поэтому для данного алгоритма возможно еще дополнительное увеличение ЭВК на несколько децибел. Таким образом, направлением для исследования было выбрано разработать модификации многопорогового алгоритма декодирования, которые повысят эффективность его работы при максимально возможном сохранении простоты практической реализации.

Кроме того, на данный момент еще не проводилось полное исследование характеристик многопороговых декодеров в условиях работы в каналах специального вида с неравномерной энергетикой. Необходимо исследовать эффективность применения МПД в таких каналах, что позволит улучшить эффективность данного алгоритма.

**Во второй главе** рассмотрены принципы работы многопорогового декодера, который, как показало исследование, проведенное в первой главе, является наиболее эффективным алгоритмом декодирования с точки зрения соотношения высоких характеристик и сложности реализации среди остальных методов помехоустойчивого кодирования/декодирования. Предложены две модификации алгоритма многопорогового декодирования.

Рассмотрим принцип работы многопорогового декодера. Обычно МПД используется для декодирования двоичных линейных систематических блоковых или сверточных самоортогональных кодов (СОК). Пример кодера блокового СОК представлен на рисунке 1. Данный код характеризуется пара-

метрами: длина кода  $n = 26$ , длина информационной последовательности  $k = 13$ , кодовая скорость  $R = 1/2$ , минимальное кодовое расстояние  $d = 5$ , образующий полином  $g(x) = 1 + x + x^4 + x^6$ . Пример схемы многопорогового декодера для рассматриваемого блочного кода изображен на рисунке 2.

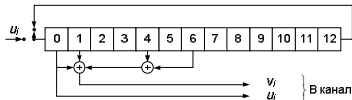


Рисунок 1 – Кодер блочного самоортogonalного кода

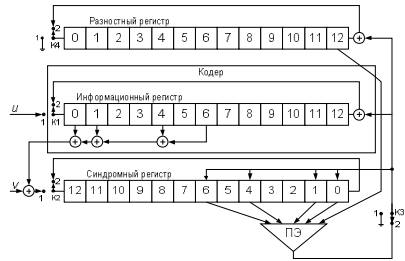


Рисунок 2 – Многопороговый декодер блочного СОК

В результате передачи по двоичному симметричному каналу декодер получает вместо кодового слова искаженное шумами сообщение длины  $n$ . Сначала, как и в обычном пороговом декодере, вычисляется синдром принятого сообщения, и для каждого информационного символа  $i_j$ ,  $1 \leq j \leq k$ , выделяется множество  $\{S_{j_k}\}$  элементов синдрома с номерами  $\{j_k\}$ , называемых проверками относительно символа  $u_j$  и содержащих в качестве слагаемого ошибку  $e_j$  в этом символе.

Основной шаг декодирования заключается в том, что для произвольно взятого символа  $u_j$  вычисляется функция правдоподобия  $L_j$ , зависящая от относящихся к нему проверок  $S_{j_k}$  и  $j$ -го элемента вектора  $\bar{D}$ :

$$L_j = \sum_{\{j_k\}} S_{j_k} + d_j . \quad (1)$$

Общее число слагаемых в приведенной формуле равно минимальному кодовому расстоянию  $d$ . Если  $L_j > T$ , где  $T \geq (d-1)/2$  – пороговое значение, то символ  $u_j$ , все проверки  $\{S_{j_k}\}$  и символ  $d_j$  инвертируются, после чего выбирается другой символ  $u_m$ ,  $m \neq j$ , для него снова вычисляется сумма  $L_m$  и т.д. Если же  $L_j \leq T$ , то сразу осуществляется переход к очередному символу  $u_m$ .

МПД, как и обычный пороговый декодер, легко модифицируется для суммирования проверок в (1) с некоторыми коэффициентами, в частности, при

работе с квантованными на несколько уровней решениями мягкого модема (т.е. при работе в канале с АБГШ), дополнительные выходные биты которого определяют надежность выносимого им решения. При этом выражение (1) для вычисления функции правдоподобия  $L_j$  принимает вид 
$$L_j = \sum_{\{j_k\}} S_{j_k} w_{j_k} + d_j w_j,$$

где  $w_{j_k}$  – коэффициент, отражающий надежность проверки  $S_{j_k}$ ,  $w_j$  – коэффициент, отражающий надежность принятого информационного символа  $u_j$ .

Рассмотрим теоретические предпосылки модификации МПД. Особенностью многопорогового алгоритма является то, что необходимо тщательно настраивать параметры декодера (такие, например, как величину порогов на разных итерациях, веса информационных символов). От данных настроек зависит вероятность ошибки на бит на выходе декодера. На основе проведенного исследования был сделан вывод о том, что декодеры с разными настройками ошибаются в разных битах. На основе данного свойства можно предложить следующий метод улучшения характеристик МПД. Для повышения надежности решений нужно выполнить "голосование по большинству" (если больше половины декодеров приняло решение, что бит равен нулю, то за результирующий бит берем 0, если 1 – то 1) для каждого бита среди решений всех декодеров с различными настройками.

Кроме того, если для полученной последовательности принять за надежность  $i$ -го бита среднюю квантованную надежность по всем  $i$ -м битам всех декодеров и попробовать еще раз декодировать полученную уточненную последовательность информационных битов дополнительным декодером, то эффективность должна еще повыситься.

Данный алгоритм назван многоуровневым многопороговым декодером, так как процедура декодирования в усовершенствованном многопороговом алгоритме выполняется теперь не один раз, а несколько.

Многоуровневый алгоритм может быть реализован как программно, так и аппаратно. Разработана структурная схема устройства многоуровневого многопорогового декодера для реализации предложенного алгоритма на аппаратном уровне. Проведены расчет увеличения сложности от применения данного метода и анализ влияния параметров на работу ММПД.

Следует заметить, что многоуровневый метод декодирования можно применять не только для многопороговых декодеров, но и для любых схем с мажоритарным решением относительно декодируемых символов.

Экспериментальные характеристики многоуровневого многопорогового декодера, полученные для кодов с различными минимальными кодовыми расстояниями  $d = 7 \div 13$  и кодовыми скоростями  $R = 1/2$ ,  $R = 1/3$  и  $R = 2/3$ , показывают получение дополнительного энергетического выигрыша от применения данного алгоритма, равного 0,4 – 0,5 дБ при использовании пяти составляющих ММПД многопороговых декодеров.

Другой предложенный алгоритм повышения эффективности многопороговых декодеров – алгоритм повышения эффективности работы многопорогового декодера за счет предварительной оценки ошибочности проверок.

Согласно выражению (1) функция правдоподобия для произвольно взятого символа  $u_j$  равна  $L_j = \sum_{\{j_k\}} S_{j_k} + d_j$ .

Каждый бит синдрома  $S_{j_k}$  из множества  $\{S_{j_k}\}$  равен:

$$S_{j_k} = \sum_{\{i_l\}} e_{u_{i_l}} + e_{v_{j_k}}, \quad (2)$$

где  $e_{u_{i_l}}$  – все ошибки в информационных битах, от которых зависит значение элемента синдрома  $S_{j_k}$ ;  $e_{v_{j_k}}$  – ошибка в соответствующем проверочном бите, полученная из канала.

Бит синдрома  $S_{j_k}$ , исходя из выражения (2), может быть изменен при декодировании информационных битов  $e_{u_{i_l}}$ , для каждого из которых можно записать выражение вычисления функции правдоподобия:

$$L_i = \sum_{\{i_l\}} S_{i_l} + d_i. \quad (3)$$

Предлагаемый алгоритм повышения эффективности заключается в следующем. При декодировании произвольно взятого информационного бита  $u_j$  в выражении (1) необходимо использовать уточненные значения битов  $S_{j_k}$ . Для этого по формуле (3) для каждого бита  $S_{j_k}$  необходимо вычислить значения соответствующих выражению (2) функций правдоподобия  $L_i$ , при этом исключив элемент синдрома, соответствующий декодируемому информационному символу. Уточненное значение битов  $S_{j_k}$  будет равно:

$$\hat{S}_{j_k} = \begin{cases} S_{j_k}, & \text{если } count(L_i > T) - \text{четное,} \\ \bar{S}_{j_k}, & \text{если } count(L_i > T) - \text{нечетное,} \end{cases} \quad (4)$$

где  $count(L_i > T)$  – функция, определяющая число раз выполнения условия  $L_i > T$ .

В заключение для декодирования информационного бита  $u_j$  необходимо определить новое значение функции правдоподобия по формуле:

$$L_j = \sum_{\{j_k\}} \hat{S}_{j_k} + d_j, \quad (5)$$

где значения битов синдрома  $\hat{S}_{j_k}$  вычислены по формуле (4).

Разработанный алгоритм, так же как и алгоритм исходного многополюсового декодера, можно легко модифицировать для работы с квантованными на несколько уровней решениями мягкого модема, дополнительные биты которого определяют надежность выносимого им решения. При этом выражение

примет вид, аналогичный выражению (2) для вычисления функции правдоподобия. Работа алгоритма останется неизменной, за исключением того, что в формулах (3) и (5) значения битов синдрома и разностный бит суммируются с соответствующими весами.

Результаты моделирования при различных минимальных кодовых расстояниях  $d = 7 \div 13$  при кодовой скорости  $R = 1/2$  свидетельствуют о дополнительном продвижении на несколько десятых децибел ( $\approx 0,5$  дБ) границы области эффективной работы многопорогового декодера в сторону увеличения шума до средних отношений  $E_b / N_0$ .

Сложность одной итерации многопорогового декодера примерно равна минимальному кодовому расстоянию  $d$ . Показано, что сложность алгоритма повышения эффективности многопорогового декодера можно оценить как  $\approx d^3$ .

Сложность исходного алгоритма сильно возрастает. Для ее уменьшения можно упростить алгоритм следующим образом. В разработанной модификации многопорогового декодера уточненные значения элементов синдрома вычисляются при каждом декодировании информационного бита. Именно с этим связано увеличение сложности алгоритма. Можно устранить этот недостаток, если сделать перед каждой итерацией декодирования дополнительную итерацию, на которой и будут вычисляться оценки уточненных значений синдромных битов. Сложность упрощенного алгоритма предварительной оценки проверок в МПД примерно равна  $\approx 2d$ , так как каждая итерация декодирования предваряется оценочной итерацией, сложность вычисления оценки на которой для каждого бита примерно равна  $d$ .

Результаты моделирования при различных минимальных кодовых расстояниях  $d$  при кодовой скорости  $R = 1/2$  свидетельствуют о дополнительном продвижении на несколько десятых децибел ( $\approx 0,3$  дБ) границы области эффективной работы многопорогового декодера в сторону увеличения шума до средних отношений  $E_b / N_0$ .

Характеристики эффективности упрощенного алгоритма хуже (на  $\approx 0,2$  дБ), чем характеристики исходной модификации многопорогового декодера. Связано это с тем, что при использовании первого способа предварительной оценки значений синдрома, более точные информационные биты сразу участвуют в последующем декодировании. То есть первый алгоритм работает на более точных значениях. Во втором случае уточненные значения вычисляются перед каждой итерацией, поэтому алгоритм работает на худших значениях, по сравнению с первым вариантом алгоритма. Преимуществом упрощенного многопорогового алгоритма с предварительной оценкой ошибочности проверок является то, что его сложность существенно ниже сложности первого варианта модификации МПД.

Несмотря на усложнение исходного многопорогового алгоритма, сложность разработанных модификаций МПД все равно ниже, чем у других алгоритмов помехоустойчивого кодирования.

**В третьей главе** рассмотрена работа многопороговых декодеров в каналах с неравномерной энергетикой.

Одним из возможных способов приближения области эффективной работы МПД к пропускной способности канала является его использование в каналах с неравномерной энергетикой, когда при передаче информационные символы и проверочные биты передаются с различной энергией. При этом общая энергия, требуемая для передачи данных, остается постоянной. Хотя данная модификация канала передачи данных предложена была еще в 1978 г., полное исследование работы многопороговых декодеров в таком канале еще не проводилось.

Многопороговый декодер обладает следующим свойством: ошибки при декодировании чаще всего происходят из-за ошибок в информационных битах, нежели в проверочных символах, поэтому очевидно, что в описанной системе из двух каналов по каналу с большей энергией нужно передавать информационные символы кода, а с меньшей – проверочные. Если закодированное сообщение передавать по такому каналу, то будет возникать меньше ошибок в информационной части сообщения, а значит и будет уменьшено количество ошибок при декодировании.

Были получены характеристики эффективности МПД в канале с НЭК при использовании сигнальной конструкции ФМ2 для различных минимальных кодовых расстояний  $d = 7 \div 13$  и кодовой скорости  $R = 1/2$  при использовании различных вариантов перераспределения энергии в канале между информационными и проверочными битами. Получен дополнительный энергетический выигрыш в размере от 0,3 до 1 дБ от применения МПД в каналах НЭК. Сделан вывод о том, что чем больше кодовое расстояние используемого кода, тем больше получаемый дополнительный энергетический выигрыш от кодирования.

Проанализировав все полученные зависимости вероятности ошибки декодирования МПД в канале с неравномерной энергетикой, можно заметить, что в НЭК-каналах граница эффективности применения МПД смещается в область больших уровней шума в канале, но при этом значительно понижается достоверность его решений.

Для устранения указанного недостатка предложена следующая методика улучшения работы МПД в НЭК-канале.

1. Выбрать соотношение между энергией для передачи битов с большей надежностью и передачей битов с меньшей надежностью. Общую энергию передачи данных оставить неизменной (равной энергии передачи в обычном канале).

2. Для выбранной системы модуляции так обеспечить передачу закодированного потока данных, чтобы в каналах информационные символы передавались с большей надежностью, что существенно уменьшит уровень разmultiplication ошибок, а это повысит эффективность работы МПД. При этом возникнет нежелательный эффект – повышение области насыщения вероятности ошибки.

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

Это может быть код с контролем четности, рассмотренный в данном параграфе, или код Хэмминга.

На рисунке 5 представлена работа МПД в НЭК-канале при использовании ККЧ для сигнальной конструкции ФМ2.

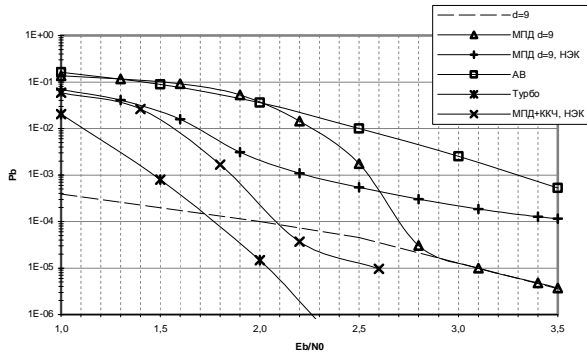


Рисунок 5 – Эффективность МПД в каналах с неравномерной энергетикой, мягкий модем

На рисунке 5 кривой “МПД  $d = 9$ ” показаны характеристики МПД блокового СОК с кодовой скоростью  $R = 4/8$ , кодовым расстоянием  $d = 9$  в канале с АБГШ. Кривая “МПД  $d = 9$ , НЭК” соответствует случаю расположения информационных битов в более надежных позициях символа, а проверочных – в менее надежных.

Характеристики каскадной схемы, состоящей из МПД и ККЧ длины 50, в случае расположения информационных битов в более надежных позициях символа для тех же условий показаны на рисунке 5 кривой “МПД+ККЧ, НЭК”. Из рисунка видно, что применение предложенного подхода позволило приблизить эффективность МПД к пропускной способности канала примерно на 0,7 дБ. В результате преимущество гораздо более сложного декодера турбо кода (кривая “Турбо”) перед МПД при вероятности ошибки порядка  $10^{-4}$  оказалось даже меньшим, чем 0,4 дБ.

Формы организации и конкретные методы реализации НЭК-каналов очень разнообразны и сильно зависят от системы сигналов, с которой МПД декодер должен взаимодействовать. Рассмотрим работу МПД в канале с НЭК при использовании ансамбля сигналов ФМ4 (рисунок 6).

Рассчитаем энергию, приходящуюся на информационную и проверочную части сигнала. Для этого примем энергию сигнала  $E_c$  (радиус окружности) равной единице. Из рисунка 6 следует, что энергия информационного бита равна  $x = E_c \cdot \cos(A) = \cos(A)$ , энергия проверочного бита равна

$y = E_c \cdot \sin(A) = \sin(A)$ . Для приведенного ансамбля сигналов эти энергии равны  $x = y$ .

Ансамбль сигналов ФМ4 для канала с неравномерной энергетикой представлен на рисунке 7.

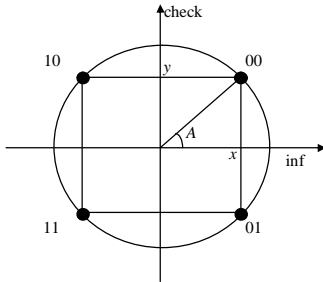


Рисунок 6 – Ансамбль сигналов ФМ4

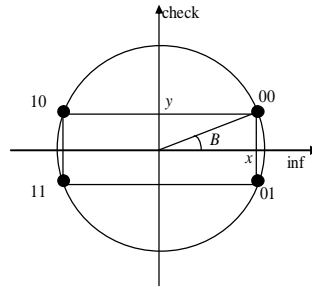


Рисунок 7 – Ансамбль сигналов ФМ4 для канала с неравномерной энергетикой

Из рисунка 7 видно, что энергия информационного бита, равная  $x = E_c \cdot \cos(B) = \cos(B)$ , стала больше энергии проверочного бита, которая равна  $y = E_c \cdot \sin(B) = \sin(B)$ . Пропорции между энергиями будут определяться значениями углов  $B$  и  $90^\circ - B$ . Например, для того, чтобы на информационный бит приходилось  $3/4$  энергии сигнала, а на проверочный бит оставалась  $1/4$  энергии, нужно задать  $B = 30^\circ$ . Также из рисунка 7 очевидно, что общая энергия сигнала  $E_c$  остается неизменной.

Зависимости вероятности ошибки МПД в канале с неравномерной энергетикой при использовании фазовой модуляции ФМ4 также показывают смещение в область больших уровней шума в канале от 0,3 дБ до 1 дБ для кодов с различными кодовыми расстояниями. Недостатком при этом является значительное понижение достоверности его решений. Для решения этой проблемы можно воспользоваться описанной выше методикой

Следует отметить, что получение дополнительного энергетического выигрыша в 0,3 - 1 дБ при работе МПД в канале с НЭК было выполнено без увеличения сложности, а только путем оптимизации всей сигнально-кодовой конструкции под особенности декодирования многопороговым алгоритмом.

Как уже было сказано, одним из способов улучшения характеристик многопорогового декодера является использование его в каскадных схемах кодирования, например, с кодом с контролем четности (ККЧ). Принцип работы простейшей каскадной схемы МПД с ККЧ для ДСК без памяти заключается в следующем. После каждой итерации в МПД хранятся все суммы проверок относительно всех декодированных символов  $L_j$ . Пусть наступила такая си-

туация, что МПД не декодирует никакие информационные символы (то есть сумма элементов на пороге не превышает значение  $T$ ). Тогда в случае обнаружения одиночной ошибки с помощью ККЧ исправляются символ, достоверность которого минимальна, разностный элемент и все проверки, относящиеся к нему. Если есть несколько символов с минимальной достоверностью, то изменения не производятся.

Согласно основной теореме многопорогового декодера каждое изменение декодируемых символов при обнаружении ошибки позволяет перейти к более правдоподобию кодовому слову. Для случая каскадирования МПД с кодом контроля четности ранее данное свойство подразумевалось на интуитивном уровне. В диссертационной работе строго доказано, что при использовании этой каскадной схемы каждое изменение декодируемых символов позволяет перейти к более правдоподобию кодовому слову всего каскадного кода в целом. Рассмотрим доказательство.

Пусть  $L_1$  – вес на пороговом элементе для самого ненадежного бита МПД;  $L_0$  – вес бита ККЧ на пороговом элементе (число единиц до обнаружения ошибки внешним кодом – кодом с контролем четности).

Рассмотрим первую ситуацию, когда информационный бит МПД остается без изменений, с учетом того, что бит ККЧ и его проверки необходимо инвертировать. В этом случае общий вес всего каскадного слова равен

$$(T - L_1) + (2T + 1 - T + L_0) = 2T + 1 - L_1 + L_0. \quad (6)$$

Во второй ситуации рассмотрим другое каскадное кодовое слово, с инвертированным битом МПД, причем бит ККЧ оставлен без изменений. При этом общий вес всего каскадного слова в целом (его расстояние до принятого вектора) в этом случае будет равен

$$(2T + 1 - T + L_1) + (T - L_0) = 2T + 1 + L_1 - L_0. \quad (7)$$

Необходимо доказать, что (6) > (7). Выясним, при каком условии будет соблюдено данное неравенство.

Вычитая (7) из (6), получим

$$\begin{aligned} 2T + 1 - L_1 + L_0 - 2T - 1 - L_1 + L_0 &= -2L_1 + 2L_0 > 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow L_0 - L_1 > 0 &\Rightarrow L_0 > L_1. \end{aligned}$$

Таким образом, для того, чтобы (6) было больше (7), необходимо, чтобы выполнялось условие  $L_0 > L_1$ , а это как раз соответствует тому, что надежность бита МПД согласно алгоритму должна самой маленькой, и быть, в том числе, меньше надежности бита ККЧ.

Это доказывает, что каждое изменение декодируемых символов позволяет перейти к более правдоподобию кодовому слову всего каскадного кода в целом. Тем самым основная теорема для МПД в случае каскадирования с кодом контроля четности доказана.

**В четвертой главе** рассмотрена структура программных средств моделирования многопороговых алгоритмов декодирования помехоустойчивых кодов. Программные средства состоят из модуля управления экспериментом,

который взаимодействует с модулем имитации канала передачи данных и модулем имитации устройства кодирования/декодирования.

Также рассмотрен вопрос обеспечения точности и достоверности результатов моделирования для используемых алгоритмов декодирования. Вычисленные минимальные значения числа ошибок на выходе декодера для обеспечения точности моделирования с заданной погрешностью.

Разработанные программные средства позволяют оценить возможность применения разработанных алгоритмов в сетях передачи данных, оценить уровень энергетической эффективности, скорость и надежность реализации, задержку принятия решения и другие критерии выбора систем повышения достоверности.

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты работы.

1. Рассмотрены наиболее известные и важные методы кодирования/декодирования помехоустойчивых кодов. Показано, что одними из наилучших с точки зрения соотношения эффективности и сложности реализации являются многопороговые декодеры самоортогональных кодов. Выбраны направления исследований

2. Предложена многоуровневая модификация многопорогового алгоритма. Показано, что использование разработанного алгоритма позволяет приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала примерно на 0,4 – 0,5 дБ при некотором повышении сложности его реализации. Разработан и зарегистрирован в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам патент на полезную модель структурной схемы многоуровневого многопорогового устройства.

3. Разработаны алгоритм многопорогового декодирования с предварительной оценкой ошибочности проверок и его модификация. Применение данных алгоритмов позволяет получить дополнительный энергетический выигрыш от применения кодирования равный 0,5 дБ для предложенного алгоритма и 0,3 дБ для его модификации.

4. Проведено исследование работы применения многопороговых методов декодирования в каналах с неравномерной энергетикой. Разработана методика улучшения эффективности МПД в таких каналах при использовании различных систем сигналов, которая позволяет приблизить область эффективной работы МПД к пропускной способности канала на 0,3 – 1 дБ.

5. Доказана основная теорема МПД для случая применения многопорогового декодера в каскадной схеме с кодом контроля четности. Строго показано, что при использовании этой каскадной схемы каждое изменение декодируемых символов позволяет перейти к более правдоподобному кодовому слову всего каскадного кода в целом.

6. Разработаны программные средства для моделирования работы многопорогового алгоритма и его модификаций в различных каналах связи. Данные программные средства позволяют оценить возможность применения разработанных алгоритмов в сетях передачи данных, оценить уровень энергетической эффективности, скорость, задержку принятия решения и другие критерии.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Овечкин Г.В., Овечкин П.В., Епишина Т.А. Имитатор цифрового спутникового канала / Материалы межвуз. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов “Новые информационные технологии в учебном процессе и производстве”. – Рязань: РИМГОУ, 2004.
2. Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Епишина Т.А. Программные средства моделирования цифрового спутникового канала связи / Материалы межвуз. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов “Новые информационные технологии в учебном процессе и производстве”. – Рязань: РИМГОУ, 2004.
3. Епишина Т.А. Разработка компьютерной учебной среды, моделирующей систему помехоустойчивого кодирования / Материалы 5-й Межрегиональной научно-практической конференции “Современные информационные технологии в образовании”. – Рязань: РИРО, 2004.
4. Епишина Т.А. Разработка демонстрационной программы, моделирующей систему помехоустойчивого кодирования / Межвуз. сб. науч. тр. “Математическое и программное обеспечение вычислительных систем”. – Рязань: РГРТА, 2005. – С. 128-130.
5. Епишина Т.А. Разработка демонстрационной программы, моделирующей работу многопорогового декодера / Материалы Всероссийского научно-практического семинара “Сети и системы связи”. – Рязань, РВВКУС, 2005.
6. Золотарёв В.В., Дмитриева Т.А. Разработка алгоритма декодирования на основе многопорогового декодера / Материалы 14-й международной науч.-тех. конференции “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций”. – Рязань: РГРТА, 2005. – С. 50-52.
7. Золотарёв В.В., Дмитриева Т.А. Разработка алгоритма декодирования на основе многопорогового декодера / 8-я Международная конференция-выставка “Цифровая обработка сигналов и ее применение”. – М.: Институт проблем управления РАН, 2006. – С. 57-59.
8. Золотарёв В.В., Дмитриева Т.А. Исследование работы многопорогового алгоритма декодирования при использовании канала с неравномерной энергетикой / Материалы Всероссийского научно-практического семинара “Сети и системы связи”. – Рязань, РВВКУС, 2006.
9. Дмитриева Т.А. Доказательство основной теоремы для многопорогового декодера каскадированного с кодами с контролем четности / Межвуз. сб. науч. тр. “Математическое и программное обеспечение вычислительных систем”. – М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – С. 76-79.
10. Зубарев Ю.Б., Золотарёв В.В., Овечкин Г.В., Дмитриева Т.А. Многопороговые алгоритмы для спутниковых сетей с оптимальными характеристиками / Электросвязь №10. 2006. – С. 9-11.
11. Дмитриева Т.А. Расчет перераспределения энергии между информационными и проверочными символами для канала с неравномерной энергетикой при использовании ансамбля сигналов ФМ4 / 9-я Международная конференция-выставка “Цифровая обработка сигналов и ее применение”. – М.: Институт проблем управления РАН, 2007. – С. 28-30.

12. Дмитриева Т.А. Обзор помехоустойчивых кодов и алгоритмов их декодирования / Межвуз. сб. науч. тр. “Математическое и программное обеспечение информационных систем”. – М: Горячая линия-Телеком, 2007. – С. 47-53.
13. Золотарёв В.В., Дмитриева Т.А. Исследование работы многопорогового декодера в канале с неравномерной энергетикой при использовании ансамбля сигналов ФМ4 / Материалы Всероссийского научно-практического семинара “Сети и системы связи”. – Рязань, РВВКУС, 2007.
14. Дмитриева Т.А. Разработка многоуровневого многопорогового устройства декодирования / Вестник РГРТУ, выпуск № 22. – Рязань, 2007. – С. 73-78.
15. Золотарёв В.В., Дмитриева Т.А. Патент на полезную модель № 73569 “Устройство многоуровневого мажоритарного декодирования линейных кодов” от 13.11.2007 г.
16. Дмитриева Т.А. Разработка методики повышения эффективности работы многопорогового алгоритма декодирования за счет предварительной оценки ошибочности проверок / 10-я Международная конференция-выставка “Цифровая обработка сигналов и ее применение”. – М.: Институт проблем управления РАН, 2008. – С. 41-43.
17. Дмитриева Т.А. Разработка алгоритма предварительной оценки ошибочности проверок многопорогового декодера / Материалы 15-й международной научн.-тех. конференции “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций”. – Рязань: РГРТУ, 2008. – С. 42-44.
18. Золотарёв В.В., Дмитриева Т.А. Разработка методики улучшения эффективности многопороговых декодеров при работе в канале с неравномерной энергетикой / Материалы 15-й международной научн.-тех. конференции “Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций”. – Рязань: РГРТУ, 2008. – С. 39-41.
19. Дмитриева Т.А. Алгоритм многопорогового декодера с оценкой ошибочности проверок / Материалы Всероссийского научно-практического семинара “Сети и системы связи”. – Рязань: РВВКУС, 2008. – С. 24-26.
20. Дмитриева Т.А., Золотарёв В.В. Разработка и исследование работы алгоритма многопорогового декодирования с предварительной оценкой ошибочности проверок / Вестник РГРТУ, выпуск № 24. – Рязань, 2008. – С. 7-11.

Дмитриева Татьяна Александровна  
**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ  
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДИРОВАНИЯ  
НА ОСНОВЕ МНОГОПороГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ  
ДЛЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 19.09.2008 г. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Усл. печ. л. 1. Уч. изд. л. 1. Тираж 100 экз.

Редакционно-издательский центр РГРТУ  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1