

*На правах рукописи*

*Toan*

КА О В А Н Т О А Н

**АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
МНОГОПороГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ САМООРТОГОНАЛЬНЫХ  
КОДОВ ДЛЯ РАДИОКАНАЛОВ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ  
ШУМА**

05.12.04 — Радиотехника, в том числе системы  
и устройства телевидения

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Рязань 2015

Работа выполнена на кафедре вычислительной и прикладной математики ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» (ФГБОУ ВПО «РГРТУ», РГРТУ).

Научный руководитель	Овечкин Геннадий Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной и прикладной математики ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань.
Официальные оппоненты:	Егоров Сергей Иванович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры вычислительной техники ФГБОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск. Важенин Николай Афанасьевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры 408 «Инфокоммуникации» ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва.
Ведущая организация	ФГБОУ ВО «Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники» (МИРЭА МГУПИ), г. Москва.

Защита состоится 25 июня 2015 года в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

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

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2015 года.

Учёный секретарь диссертационного совета  
д-р техн. наук, доцент



Г.В. Овечкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Для организации безошибочной передачи цифровых данных по каналам с шумами обычно применяется помехоустойчивое кодирование, позволяющее улучшить многие важные характеристики систем передачи данных, например, экономить мощность передатчика, увеличивать дальность связи, скорость передачи данных и другие. Поэтому повышение достоверности передачи, обработки и хранения информации является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы.** Основы помехоустойчивого кодирования информации были заложены в 1948 г. в работе К. Шеннона. Он показал, что если скорость передачи информации меньше некоторой величины, называемой пропускной способностью канала связи, то можно подобрать такой помехоустойчивый код и способ его декодирования, при котором может быть обеспечена сколь угодно малая вероятность ошибочного приема информации. Однако он не указал как построить такие помехоустойчивые коды, а лишь доказал их существование. После этой работы в теории помехоустойчивого кодирования начался бурный этап развития. Много ученых и инженеров во всем мире занялось поиском помехоустойчивых кодов и способов их кодирования и декодирования. Например, в этой области известны работы русских ученых, таких как Б.А. Котельников, В.Д. Колесник, Э.Л. Блох, Е.А. Крук, Л.Е. Назаров, В.В. Золотарёв, С.И. Егоров и др., а также многих выдающихся зарубежных специалистов: Дж. Месси, А. Витерби, Р. Галлагер, Р. Блейхут, К. Беру, Д. Маккай и др.

Помехоустойчивое кодирование сообщений или кодирование с прямым исправлением ошибок применяется в системах связи, в которых отсутствует или недоступен обратный канал для передачи запросов на повторную передачу, задержки в канале при запросах повторной передачи оказываются недопустимо большими или, наконец, уровень помех настолько велик, что количество повторных передач становится чрезвычайно большим. В настоящее время существуют множество кодов и алгоритмов их декодирования, например, блочные коды Боуза-Чоудхури-Хоквигема, коды Рида-Соломона, сверточные коды, коды с низкой плотностью проверок на четность (Low-Density Parity-Check, LDPC), каскадные коды и турбо коды. Новое и очень эффективное решение проблемы высокой сложности декодирования при одновременной реализации высоких энергетических характеристик систем кодирования на базе многопороговых декодеров (МПД) самоортогональных кодов (СОК) предлагается известными российскими специалистами В.В. Золотарёвым, Ю.Б. Зубаревым, Г.В. Овечкиным.

В настоящее время характеристики МПД широко исследованы для каналов с независимыми ошибками, в которых данные методы обеспечивают близкое по эффективности к оптимальному декодирование даже очень длинных кодов всего лишь с линейной от длины кода сложностью реализации. Для таких каналов известен ряд способов улучшения эффективности МПД. В результате, как аппаратные, так и программные версии МПД могут обеспечивать уровни энергетического выигрыша, сопоставимые с выигрышем лучших методов декодирования турбо и низкоплотностных кодов при в десятки раз более высоком быстродействии. Вместе с тем в соответствии с теорией кодирования, эффективность МПД в гауссовских каналах может быть еще несколько улучшена. Кроме того, перспективные сети связи будут работать в гораздо более сложных условиях, возникающих из-за многолучевого распространения сигналов, доплеровского сдвига и многих других причин. В результате возникающие в канале ошибки группируются в пакеты. В таких условиях эффект от применения кодирования оказывается много больше, чем в каналах с независимыми ошибками, поскольку здесь, в ряде случаев, только за счет повышения мощности передатчика вообще невозможно увеличить достоверность передаваемых данных.

Таким образом, разработка алгоритмов повышения эффективности многопороговых декодеров в гауссовских каналах, а также в каналах с группирующимися ошибками позволит повысить энергетический выигрыш от применения кодирования, который можно использовать для улучшения технических характеристик систем связи и значительно расширит область применения данного метода. При этом особенно важным является сохранение или лишь незначительное увеличение сложности реализации исходного многопорогового декодера, поскольку только самые простые методы коррекции ошибок смогут обеспечить уже требуемые в настоящее время скорости декодирования цифровых потоков, составляющие десятки Гбит/с.

**Цель и задачи исследования.** Разработка алгоритмов, позволяющих увеличить энергетический выигрыш кодирования многопороговых декодеров самоортогональных кодов при работе в радиоканалах с высоким уровнем шума, и обладающих приемлемой для практических приложений сложностью реализации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Провести анализ известных методов повышения достоверности передачи цифровых данных, основанных на применении помехоустойчивых кодов.

2. Исследовать эффективность многопороговых декодеров при различных значениях их параметров в каналах с гауссовским шумом и радиоканалах с группирующимися ошибками.

3. Выполнить анализ многоуровневого многопорогового декодера и разработать алгоритмы, позволяющие повысить его эффективность при сохранении невысокой сложности реализации.

4. Разработать и исследовать комбинированные алгоритмы декодирования самоортогональных кодов, позволяющие улучшить эффективность многопорогового алгоритма при увеличении сложности реализации не более чем в два-три раза.

5. Разработать программные средства для исследования эффективности известных и предложенных алгоритмов декодирования самоортогональных кодов.

**Методы исследований.** В диссертационной работе используются теория вероятностей, математической статистики, методы системного анализа, математического и имитационного моделирования, технологии модульного и объектно-ориентированного программирования.

**Научная новизна.** В рамках диссертационной работы были получены следующие новые результаты.

1. Проведен сравнительный анализ известных помехоустойчивых кодов и алгоритмов их декодирования с точки зрения обеспечиваемой помехоустойчивости и сложности реализации.

2. Получены новые самоортогональные коды, обладающие большей устойчивостью к размножению ошибок при итеративном декодировании, и получены результаты исследования эффективности их многопорогового декодирования.

3. Предложены новые алгоритмы получения решения для внешнего многопорогового декодера в схеме многоуровневого декодирования, позволяющие учитывать надежность решений внутренних многопороговых декодеров.

4. Синтезирована структурная схема устройства декодирования линейных кодов, реализующего предложенный многоуровневый декодер.

5. Обоснован новый комбинированный декодер самоортогональных кодов, в котором применяются алгоритмы декодирования низкоплотностных кодов и многопороговый декодер.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Теоретическая значимость заключается в разработке и исследовании новых алгоритмов коррекции ошибок, основанных на многопороговом декодере, разработке методик их применения для повышения достоверности передачи данных по цифровым радиоканалам с большим уровнем шума. Разработанные алгоритмы позволяют увеличить энергетический выиг-

рыш кодирования на 0,5...1,5 дБ в гауссовских каналах связи с высоким уровнем шума по сравнению с исходным многопороговым декодером. В каналах с замираниями этот выигрыш составляет 3 и более дБ. При этом сложность реализации декодера возрастает в несколько раз. Указанный энергетический выигрыш можно использовать для улучшения технических характеристик систем связи. Разработанные программы позволяют выполнять имитационное моделирование системы передачи данных с разработанными декодерами и выбирать наилучшие параметры декодеров.

***На защиту выносятся.***

1. Алгоритм работы многоуровневого многопорогового декодера, позволяющий получить дополнительный энергетический выигрыш кодирования в гауссовском канале порядка 0,3 дБ по сравнению с исходным многопороговым декодером при сохранении линейной сложности реализации.

2. Обоснован комбинированный декодер самоортогональных кодов, позволяющий при двукратном росте сложности получить на 0,5...1,3 дБ больший энергетический выигрыш кодирования в гауссовском канале по сравнению с многопороговым декодером.

3. Разработанные алгоритмы повышения эффективности многопорогового декодера в канале с коррелированными и некоррелированными релейскими замираниями позволяют увеличить энергетический выигрыш кодирования на 3 и более дБ.

***Внедрение научных результатов диссертационной работы*** проведено в учебный процесс РГРТУ, о чем получен акт внедрения.

***Апробация работы*** проведена в форме научных докладов по основным результатам диссертационной работы и дискуссий, которые проходили на следующих научных конференциях: XVIII всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании – НИТ - 2013» (г. Рязань, РГРТУ, 2013 г.); XIX всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании – НИТ - 2014» (г. Рязань, РГРТУ, 2014 г.); 17-я Международная Конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA – 2015» (г. Москва, ИПУ РАН, 2015 г.).

***Личный вклад автора.*** Все основные результаты диссертации получены автором лично.

***Публикации.*** По теме диссертации опубликовано 8 печатных научных работ, в том числе 2 статьи в изданиях, входящих в список ВАК РФ, 3 тезисов докладов на конференциях различного, в том числе меж-

дународного, уровня, 3 статьи в межвузовских сборниках.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Общий объем диссертационной работы с приложениями составляет 118 страниц, в том числе 114 страниц основного текста. Работа содержит 38 рисунков, 2 таблицы, список используемой литературы состоит из 102 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрена основная проблема помехоустойчивого кодирования и обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель диссертационной работы, решаемые задачи и методы исследований. Сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы и положения, выносимые на защиту. Представлены состав и краткое описание работы, приведены сведения об апробации работы и публикациях автора.

**Первая глава** посвящена постановке задачи, ее математической формализации и анализу известных способов повышения достоверности передачи цифровых данных.

В данной главе рассмотрены общие принципы работы систем передачи данных. Показано, что основную роль в повышении достоверности играют методы помехоустойчивого кодирования. Описаны как классические помехоустойчивые коды и алгоритмы их декодирования, так и современные, такие как турбо, низкоплотностные, самоортогональные коды и методы их декодирования. Эти методы в ряде случаев позволяют обеспечить работу системы связи при уровне шума, на 0,5..1,5 дБ меньшем пропускной способности канала. Но при этом сложность декодеров турбо и низкоплотностных кодов оказывается слишком большой для организации высокоскоростной передачи данных. В результате разработчики кодеков вынуждены или использовать чрезвычайно дорогие аппаратные средства, или идти на упрощение алгоритмов, что приводит к некоторому ухудшению характеристик. Многопороговые декодеры самоортогональных кодов, хотя и незначительно уступают турбо и низкоплотностным кодам по обеспечиваемому уровню энергетического выигрыша, оказываются очень простыми для практической реализации, что позволяет создавать недорогие коды МПД, работающие в высокоскоростных цифровых системах передачи данных. Кроме того, для МПД известен ряд способов увеличения эффективности, позволяющих получать больший энергетический выигрыш по сравнению с исходным МПД при сохранении преимуще-

ства по сложности по сравнению с другими методами коррекции ошибок. При этом теоретически эффективность МПД еще можно повысить, что позволит улучшить технические характеристики использующих его систем связи. Поэтому задача разработки алгоритмов повышения эффективности МПД, решаемая в следующих главах диссертационной работы, является актуальной.

**Во второй главе** подробно рассматриваются принципы работы и характеристики многопороговых декодеров. Представлены выражения для оценки размножения ошибок при итеративном декодировании самоортогональных кодов, использующие производящие функции вероятности. Исследована зависимость эффективности многопороговых декодеров от уровня шума в двоичном симметричном и гауссовском канале при изменении таких параметров кодов, как длина кода, кодовое расстояние и кодовая скорость. Также исследуется эффективность многопороговых декодеров в гауссовском канале при использовании различных способов вычисления надежности проверок. Оценивается эффективность многопороговых декодеров в канале связи с релейскими замираниями.

Многопороговые декодеры используются для декодирования блочных или сверточных самоортогональных кодов. Основные принципы работы МПД, используемого для декодирования блочного СОК с кодовой скоростью  $1/2$  и длиной 34 бита, заданного образующим полиномом  $g(x) = 1 + x^3 + x^7 + x^8$ , иллюстрируются схемой, представленной на рисунке 1. Отметим, что в состав МПД входят регистры, полусумматоры и пороговый элемент, суммирующий свои входы и сравнивающий полученную сумму с порогом. Это делает МПД простейшим для реализации устройством, способным обеспечить предельно возможные скорости декодирования.

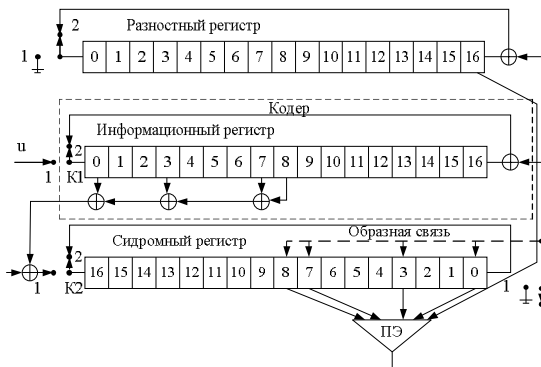


Рисунок 1 – Схема МПД блочного СОК



При работе МПД в двоичном симметричном канале на пороговом элементе для декодируемого символа  $u_j$  вычисляется функция правдоподобия  $L_j$ , содержащая элементы синдрома  $s_{jk}$  и соответствующий элемент разностного регистра  $d_j$ :

$$L_j = \sum_{s_{jk} \in \{S_j\}} s_{jk} + d_j \quad (1)$$

где  $\{S_j\}$  - множество проверок относительно ошибки  $e_j$  в декодируемом символе  $u_j$ . При превышении функцией правдоподобия некоторого порога осуществляется изменение декодируемого символа.

Эффективность МПД зависит от степени устойчивости кода к размножению ошибок. Основным параметром, характеризующим устойчивость к размножению ошибок, является условная вероятность ошибки декодирования в некотором символе при ошибке в первом:

$$P(e_i = 1 / e_0 = 1) = P(e_i = 1, e_0 = 1) / P(e_0 = 1) \quad (2)$$

Здесь  $P(e_i = 1, e_0 = 1)$  - вероятность двух ошибок в заданных символах;  $P(e_0 = 1)$  - вероятность первой ошибки декодирования. Вероятность  $P(e_i = 1, e_0 = 1)$  оценивается с помощью двумерных производящих функций вероятности, строящихся по известным правилам.

Например, для блочного СОК с кодовым расстоянием  $d=5$ , кодовой скоростью  $R=1/2$  и полиномом  $g(x) = 1 + x^3 + x^7 + x^8$  производящая функция вероятности для ошибок в нулевом и третьем символах записывается как:

$$\begin{aligned} A_{0,3}(x, y) = & (p_0x_0 + q_0) \times (p_0x_4 + q_0) \times (p_0y_3 + q_0) \times (p_0x_2y_0 + q_0) \times \\ & \times (p_0x_3y_4 + q_0) \times (p_0x_4 + q_0) \times (p_0y_2 + q_0) \times (p_0x_3y_3 + q_0) \times \\ & \times (p_0x_4y_4 + q_0) \times (p_0x_1 + q_0) \times (p_0x_1y_3 + q_0) \times (p_0y_4 + q_0) \times \\ & \times (p_0x_2y_1 + q_0) \times (p_0x_1 + q_0) \times (p_0y_2 + q_0) \times (p_0x_3y_2 + q_0) \times \\ & \times (p_0x_1 + q_0) \times (p_0x_2 + q_0y_1) \times (p_0x_3 + q_0) \times (p_0x_4 + q_0) \times \\ & \times (p_0y_2 + q_0) \times (p_0y_3 + q_0) \times (p_0y_4 + q_0) = \sum_{i,j=0}^5 a_{i,j} x^i y^j. \end{aligned}$$

После раскрытия скобок и приведения подобных для получения вероятности двух ошибок в выбранных символах суммируют коэффициенты  $a_{i,j}$  для индексов  $i$  и  $j$ , больших порога  $T$ , равного  $d/2$ :

$$P(e_0 = 1, e_1 = 1) = \sum_{i,j>T} a_{i,j}. \quad (3)$$

При  $p_0 \rightarrow 0$  получаем, что  $P(e_3 = 1, e_0 = 1) = 55p_0^3$  и  $P(e_3 = 1 / e_0 = 1) \approx 0.15$ . Для сверточного кода с такими же параметра-

ми получаем  $P(e_3 = 1, e_0 = 1) = 16p_0^3$  и  $P(e_3 = 1/e_0 = 1) \approx 0.19$ . Отметим, что для таких коротких СОК условная вероятность второй ошибки велика даже при малой вероятности  $p_0$  ошибки в канале, что приводит к существенному размножению ошибок при итеративном декодировании. Лучшей устойчивостью к размножению ошибок обладают более длинные коды, в которых присутствует несколько информационных и несколько проверочных ветвей. Для таких кодов в диссертации подобраны параметры, при которых вероятность второй ошибки декодирования пропорциональна квадрату вероятности ошибки в канале.

В работе проведено исследование зависимости эффективности многопороговых декодеров от уровня шума в двоичном симметричном канале при изменении длины кода, кодового расстояния и кодовой скорости, которое подтвердило, что:

- с помощью МПД можно обеспечить близкое к оптимальному декодирование правильно выбранных самоортогональных кодов;
- при большей длине кода и большем количестве информационных и проверочных ветвей можно обеспечить больший энергетический выигрыш;
- в области малого шума с помощью кодов с большим кодовым расстоянием обеспечивается меньшая вероятность ошибки, а в области большого шума лучшие результаты показывают коды с меньшим кодовым расстоянием.

При работе МПД в гауссовском канале для произвольно символа  $u_j$  вычисляется функция правдоподобия  $L_j$ . При этом проверки и элемент разностного регистра суммируются с некоторыми коэффициентами, отражающими их надежность:

$$L_j = \sum_{s_{jk} \in \{S_j\}} (2s_{jk} - 1)w_{jk} + (2d_j - 1)w_j \quad (4)$$

В диссертационной работе исследованы различные способы определения коэффициентов  $w_{jk}$ , отражающих надежности проверок, и представлены полученные с помощью разработанных программных средств характеристики. Полученные результаты показали, что совместное применение этих способов позволяет обеспечить наилучшую эффективность декодирования.

Результаты моделирования, полученные для канала с релейскими замираниями, показали, что для обеспечения сопоставимой с гауссовским каналом достоверности передачи данных требуется на 8 и более дБ большее отношение сигнал/шум. Кроме того, для такого канала даже при больших отношениях сигнал/шум сложно обеспечить малую вероятность ошибки декодирования.

**Третья глава** посвящена исследованию и улучшению эффективности многоуровневого многопорогового декодера.

Многоуровневый многопороговый декодер был предложен в работе Золотарёва В.В. и Дмитриевой Т.А. В основе его работы лежит идея декодирования применяемого кода с помощью нескольких многопороговых декодеров, обладающих разными настройками. В диссертации выполнено детальное исследование эффективности последовательного и параллельно-последовательного соединения МПД. Показано, что в гауссовском канале при использовании двоичной ФМ схема с последовательно-параллельным соединением дает выигрыш порядка 0,1 дБ по сравнению с МПД, а схема с последовательно-параллельным соединением позволяет увеличить выигрыш до 0,2 дБ. Полученные результаты оказываются на 0,3 дБ лучше результатов, представленных в исходной работе по многоуровневому МПД.

Отметим, что сложность многоуровневого МПД увеличивается пропорционально числу применяемых декодеров, а эффект от каждого дополнительного декодера с ростом числа МПД уменьшается. В диссертации показано, что после увеличения числа составляющих декодеров до пяти роста эффективности схемы декодирования практически не наблюдается. Следовательно, использование более пяти декодеров нецелесообразно.

В исходном многоуровневом МПД при определении значения информационного бита для внешнего МПД устройством выбора применялся мажоритарный подход, использующий решения относительно этого же бита всех внутренних МПД. При этом для произвольно взятого символа  $u_i$  вычисляется функция правдоподобия  $L_i$ , зависящая от символов  $u_{ik}$ , полученных от  $N$  внутренних декодеров

$$L_i = \sum_{k=1..N} (2u_{ik} - 1). \quad (5)$$

Если  $L_i > 0$ , то оценка символа  $u_i$ , подающаяся на внешний МПД, равна 1. В противном случае эта оценка равна 0.

В диссертации предложены другие алгоритмы определения такого решения, использующие, в том числе, информацию о надежности решений относительно декодированных символов от внутренних МПД.

Один из них заключается в выборе символа с максимальной надежностью:

$$u_i = u_{im}, \text{ где } m = \arg \max_{k=1..N} (|w_{ik}|), \quad (6)$$

где  $w_{ik}$  - значение надежности  $i$ -го информационного символа, полученное от  $k$ -го внутреннего МПД.

Второй предложенный алгоритм основан на мажоритарном выборе символа с учетом веса декодированного символа. При этом для каждого бита  $u_i$  устройство выбора вычисляет функцию правдоподобия

$$L_i = \sum_{k=1..N} (2u_{ik} - 1)w_{ik} . \quad (7)$$

Если  $L_i > 0$ , то оценка символа  $u_i$  принимает значение 1. В противном случае оценка равна 0.

Кроме этого, в исходном многоуровневом МПД внешний МПД работал в условиях отсутствия сведений об изменениях в информационных символах, сделанных внутренней параллельной схемой декодирования. Но тогда для внешнего МПД будут нарушены условия основной теоремы многопорогового декодирования, и он при каждом изменении декодируемого символа уже не стремится к решению оптимального декодера, что очень важно при организации итеративного декодирования. Поэтому в диссертационной работе предлагается получить вектор, в котором единицами отмечены позиции информационных символов, измененных внутренней параллельной схемой декодирования, и этим вектором инициализировать разностный регистр внешнего МПД. Тогда условия основной теоремы МПД будут выполнены, и при каждом изменении декодируемого символа решение внешнего МПД будет стремиться к решению оптимального декодера.

Пример характеристик многоуровневого МПД для пяти внутренних декодеров при различных алгоритмах выбора информационного бита представлен на рисунке 2. Здесь кривыми «Пар. жесткое», «Пар. макс» и «Пар. мягкое» представлены характеристики параллельной схемы соединения МПД при использовании алгоритма мажоритарного выбора, выбора по элементу с максимальной надежностью и мажоритарном выборе символа с учетом веса декодированного символа соответственно. Для сравнения на рисунке кривой «МПД» показаны характеристики обычного МПД, а кривой «Опт. МПД» – оценки для оптимального декодера используемого кода.

Аналогичные характеристики для последовательно-параллельной схемы представлены на рисунке 2 кривыми «Пос. жесткое», «Пос. макс» и «Пос. мягкое». Отметим, что использование предложенного алгоритма мажоритарного выбора символа с учетом веса декодированного символа позволяет улучшить эффективность многоуровневого МПД на 0,1 дБ практически без увеличения сложности исходного многоуровневого МПД. По сравнению с базовым МПД выигрыш составляет порядка 0,3 дБ.

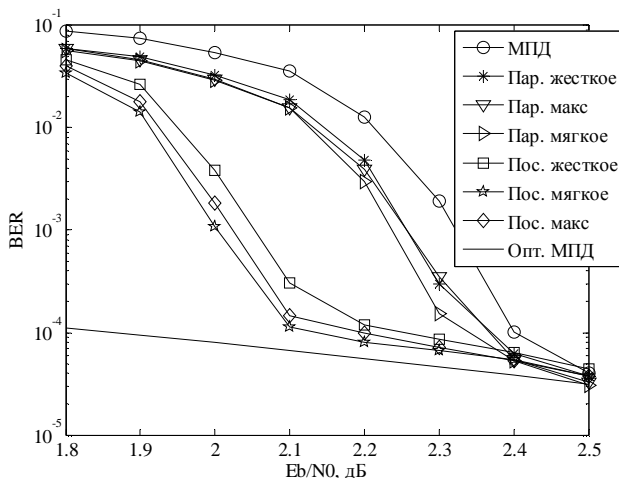


Рисунок 2 – Характеристики многоуровневого МПД для СОК с  $d = 9$  и  $n = 20480$

Для полученного многоуровневого декодера синтезировано новое устройство декодирования линейных кодов, структурная схема которого представлена на рисунке 3.

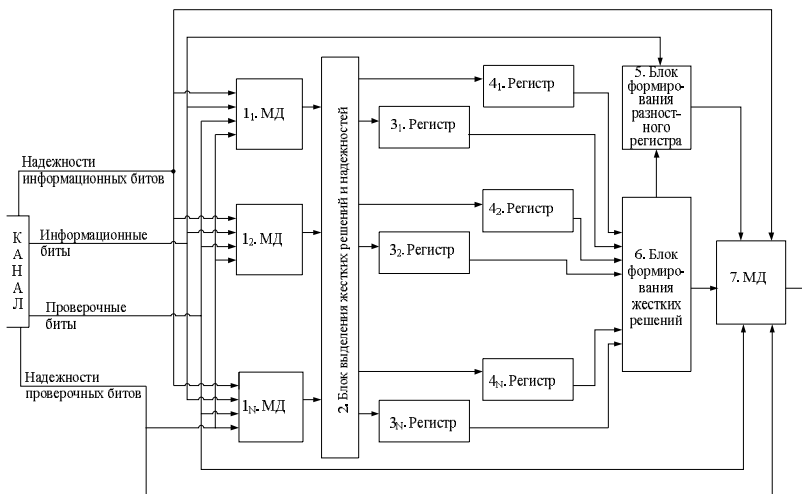


Рисунок 3 – Многоуровневый многопороговый декодер линейных кодов

**В четвертой главе** предлагается комбинированный декодер самоортогональных кодов, анализируется его эффективность и даются рекомендации по выбору наилучших параметров.

Результаты проведенных исследований показали, что многопороговые декодеры обеспечивают высокую эффективность декодирования при в десятки раз меньшей вычислительной сложности по сравнению с другими методами коррекции ошибок. Вместе с тем применяя более сложные методы для декодирования СОК можно получить больший энергетический выигрыш кодирования при уровне шума, близком к пропускной способности канала. Например, за счет применения для декодирования СОК известных алгоритмов декодирования кодов с низкой плотностью проверок на четность, в частности min-sum алгоритма, можно получить дополнительный энергетический выигрыш кодирования по сравнению с МПД порядка 1 дБ при увеличении вычислительной сложности в 6..10 раз. Но это не всегда является допустимым.

В диссертационной работе предлагается алгоритм декодирования СОК, позволяющий увеличить выигрыш по сравнению с МПД при меньшей сложности реализации по сравнению с min-sum алгоритмом. Данный алгоритм предполагает использование при декодировании СОК как min-sum, так и МПД алгоритмов. Причем на первых итерациях декодирования целесообразно использовать min-sum алгоритм, поскольку он позволяет работать при большем шуме в канале. После нескольких итераций min-sum алгоритма можно использовать МПД. При этом схема начинает эффективно декодировать применяемый код при большем уровне шума, чем при использовании МПД, но ее сложность по сравнению с МПД незначительно увеличивается, примерно в 2 раза. Структурная схема предлагаемого декодера, который мы назовем комбинированным декодером, представлена на рисунке 4. Безусловно, вместо min-sum алгоритма в данной схеме можно применять и другие алгоритмы декодирования, разработанные для LDPC кодов. Отметим, что на эффективность и сложность предложенной схемы влияние оказывают используемый СОК, число итераций min-sum алгоритма и число итераций МПД. В диссертации выполнено исследование характеристик данной схемы при изменении перечисленных параметров.

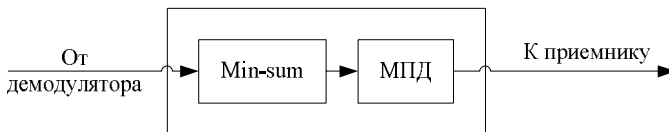


Рисунок 4 – Структурная схема комбинированного декодера

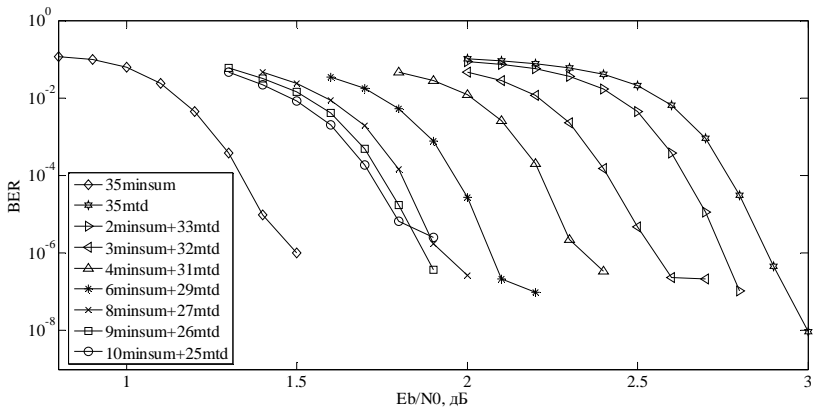


Рисунок 5 – Характеристики комбинированного декодера для СОК с  $d = 17$  и  $n = 31824$

Для примера на рисунке 5 показаны характеристики min-sum, МПД и комбинированного декодера для блочного СОК с кодовой скоростью  $R = 1/2$ , кодовым расстоянием  $d = 17$ , длиной кода  $n=31824$  при различном числе итераций min-sum декодирования. Эти графики получены для канала с аддитивным белым гауссовским шумом при использовании двоичной ФМ. В легенде указан тип применяемого декодера и число используемых итераций. Видно, что добавление к схеме многопорогового декодирования нескольких итераций декодирования по алгоритму min-sum позволяет приблизить область эффективной работы декодера к пропускной способности канала связи. При этом сложность комбинированной схемы линейно растет с ростом числа итераций min-sum декодирования. Отметим, что, например, при двукратном росте сложности схемы декодирования по сравнению с МПД удалось получить почти на 0,9 дБ больший энергетический выигрыш кодирования (кривые «6min-sum+29mtd» и «35mtd»).

Также в диссертации был проведен анализ зависимости увеличения вычислительной сложности комбинированного декодера и дополнительного энергетического выигрыша кодирования по сравнению с МПД при вероятности ошибки в канале  $10^{-5}$  от числа итераций min-sum алгоритма. Пример результатов исследования при использовании блочного СОК с длиной  $n = 31824$ , кодовой скоростью  $R=1/2$  и кодовым расстоянием  $d = 17$  при суммарном числе итераций декодирования, равном 35, представлен на рисунках 6а и 6б. Отметим, что с ростом числа итераций min-sum декодера дополнительный выигрыш от применения каждой новой итерации уменьшается и после использова-

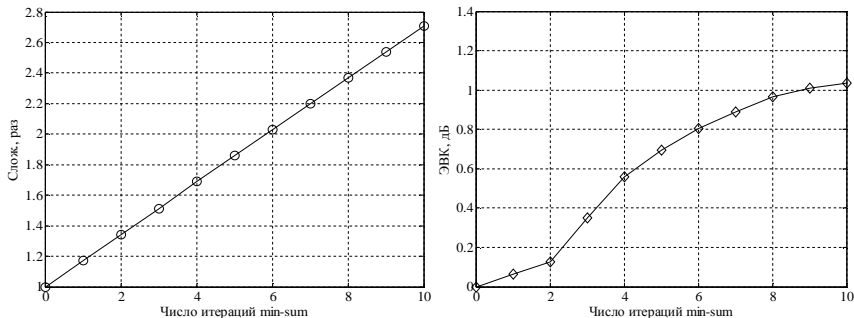


Рисунок 6 – Зависимость увеличения сложности декодера (а) и дополнительного энергетического выигрыша кодирования (б) по сравнению с МПД от числа итераций min-sum алгоритма

ния девяти итераций становится меньше 0,02 дБ. При этом сложность увеличивается почти на 10%.

Отметим, что эффективность комбинированного декодера была исследована и в каналах с релейскими замираниями. Пример характеристик МПД, min-sum и комбинированного декодера для СОК с кодовой скоростью  $R = 2/4$ , кодовым расстоянием  $d = 9$ , длиной кода  $n = 20748$  битов в канале с релейскими замираниями представлен на рисунке 7. Эти графики получены в релейском канале с доплеровской частотой 200 Гц при использовании двоичной ФМ и мягких решений демодулятора.

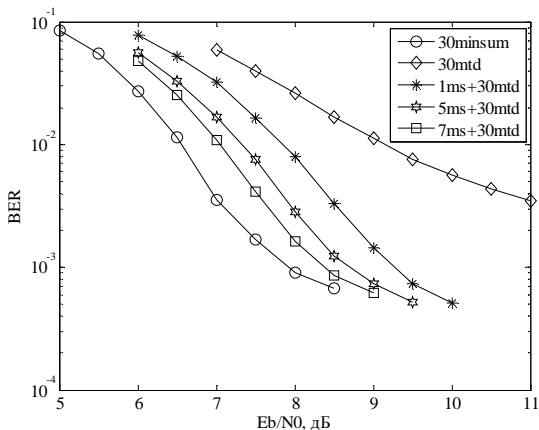


Рисунок 7 – Характеристики комбинированного декодера для СОК с  $d = 9$  и  $n = 20748$  в релейском канале



Из графиков видно, что если на первых итерациях декодирования перед работой МПД использовать min-sum алгоритм, то эффективность декодирования увеличивается по сравнению с МПД. И даже при использовании только одной итерации min-sum алгоритма (сложность комбинированной схемы на 20% больше сложности МПД) получается дополнительный энергетический выигрыш порядка 2 и более дБ. При увеличении числа итераций min-sum алгоритма эффективность декодирования еще немного увеличивается вместе с линейным увеличением сложности декодера. В результате в канале с релейскими замираниями при использовании комбинированного декодера получается выигрыш по сравнению с МПД, составляющий 3 и более дБ, при двукратном увеличении сложности декодирования.

**В заключении** приводятся основные выводы и результаты выполненной работы.

**В приложениях** представлены параметры некоторых полученных и использованных в работе самоортогональных кодов, а также представлен акт внедрения результатов диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате выполненного в диссертации комплекса исследований получено решение актуальной научно-технической задачи повышения эффективности исправления ошибок в каналах связи с шумами, основанное на применении разработанных алгоритмов декодирования самоортогональных кодов.

1. Выполнен анализ известных помехоустойчивых кодов и алгоритмов их декодирования. Показано, что существующие методы, обеспечивающие эффективное исправление ошибок при уровне шума, близком к пропускной способности канала, оказываются слишком сложными для использования в системах связи со скоростями в сотни Мбит/с и выше. Одними из лучших по соотношению эффективности и сложности являются многопороговые декодеры самоортогональных кодов. При этом теоретически существует возможность приближения области эффективной работы МПД к пропускной способности канала связи.

2. Выполнен анализ эффекта размножения ошибок, проявляющегося при итеративном декодировании самоортогональных кодов, и построены новые самоортогональные коды, обладающие лучшей устойчивостью к размножению ошибок, чем известные. Получены результаты исследования эффективности МПД для различных кодов в нескольких типичных моделях каналов связи.

3. Предложены новые алгоритмы работы многоуровневого многопорогового декодера, позволяющие за счет лучшего определения решения относительно информационных битов для внешнего декодера и использовании информации об измененных внутренними декодерами битов получить на 0,3 дБ больший энергетический выигрыш в гауссовском канале по сравнению с МПД.

4. Синтезирована структурная схема устройства декодирования линейных кодов, реализующего предложенный многоуровневый декодер.

5. Обосновано применение совместного декодирования самоортогональных кодов с помощью МПД и алгоритмов декодирования низкоплотностных кодов. Результаты исследования реализующего такой вид декодирования комбинированного декодера показали, что с его помощью в гауссовском канале область эффективной работы декодера приближается к пропускной способности канала на 0,75...1,3 дБ по сравнению с МПД при увеличении сложности реализации в 2...3 раза. В канале с замираниями при использовании комбинированного декодера дополнительный энергетический выигрыш по сравнению с МПД составляет 2 и более дБ при увеличении сложности декодирования на 20%.

6. Разработаны программы моделирования систем передачи данных, в которых для повышения достоверности используются как известные, так и предложенные коды и алгоритмы декодирования.

## **СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах из перечня ВАК**

1. Као В.Т., Овечкин Г.В. Повышение эффективности многоуровневого многопорогового декодера // Вестник РГРТУ. – № 3. – Выпуск 46. Рязань, 2014. С. 10 – 14.

2. Гринченко Н.Н., Као В.Т., Овечкин Г.В. Декодирование самоортогональных помехоустойчивых кодов с помощью многопорогового и min-sum алгоритмов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1; URL: [www.science-education.ru/121-17793](http://www.science-education.ru/121-17793).

### **Статьи в научных журналах и материалы конференций**

3. Као В.Т. Эффективность многопороговых декодеров при разном кодовом расстоянии и длине кода // Материалы 18-й Всероссийской научно-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании» – Рязань: РГРТУ, 2013. С. 82 – 83.

4. Гринченко Н.Н., Као В.Т., Овечкин Г.В. Повышение эффективности многопорогового декодера // Математическое и программное

обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2014. С. 60 – 64.

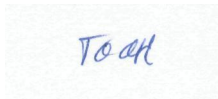
5. Гринченко Н.Н., Као В.Т., Овечкин Г.В. Эффективность схем соединения нескольких многопороговых декодеров при декодировании самоортогональных кодов / Информационные технологии : межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2014. С. 27 – 34.

6. Гринченко Н.Н., Као В.Т., Овечкин Г.В. Развитие многоуровневого многопорогового декодера / Методы и средства обработки и хранения информации: межвуз. сб. науч. тр. – Рязань: РГРТУ, 2014. С. 47–51.

7. Као В.Т. Многопороговые декодеры для гауссовских каналов // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании. Материалы 19-й Всероссийской научно-техн. конф. «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании» – Рязань: РГРТУ, 2014. С. 121–122.

8. Гринченко Н.Н., Као В.Т., Овечкин Г.В. Повышение эффективности многопорогового декодера // Материалы 17-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2015», г. Москва, 2015 г. С. 39–43.

Соискатель



В.Т. Као

Као Ван Тоан

**АЛГОРИТМЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
МНОГОПороГОВЫХ ДЕКОДЕРОВ САМООРТОГОНАЛЬНЫХ  
КОДОВ ДЛЯ РАДИОКАНАЛОВ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ  
ШУМА**

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_ .2015. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.