

На правах рукописи



Сидоренко Александр Анатольевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННЫХ
ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ КОДОВ**

Специальность: 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Владимир – 2024

Работа выполнена на кафедре радиотехники и радиосистем ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» - (ВлГУ).

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Самойлов Александр Георгиевич

Официальные оппоненты: **Гладких Анатолий Афанасьевич**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Радиотехника, телекоммуникации и защита информации», ФГБОУ ВО Ульяновский государственный технический университет, г. Ульяновск.

Кошелев Виталий Иванович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехнические системы» ФГБОУ ВО Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина, г. Рязань.

Приоров Андрей Леонидович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Цифровые технологии и машинное обучение» ФГБОУ ВО Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, г. Ярославль.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева», г. Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится «28» мая 2024 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.281.01, при ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» по адресу: г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, корпус 3, ауд. 301.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ВлГУ и на сайте университета <https://diss.vlsu.ru/index.php?id=387>

Автореферат разослан «19» февраля 2024 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



А. Г. Самойлов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Для систем цифровой связи характерно постоянное стремление к достижению высоких показателей скорости передачи и достоверности передачи информации. Такое стремление содержит в себе противоречие, разрешаемое путем решения одной из двух проблем. Суть первой проблемы заключается в том, чтобы обеспечить как можно более высокую достоверность приема сообщений при заданной скорости передачи информации по каналу связи. Вторая проблема состоит в том, чтобы передать по системе с заданной достоверностью наибольшее количество информации наиболее экономным способом. Решение этих проблем может быть осуществлено путем применения помехоустойчивого кодирования передаваемой информации.

Клод Шеннон указал путь надежной передачи сообщений за счет введения избыточности при их кодировании до передачи в канал или записи на носитель информации. С тех пор зародилась и стала быстро развиваться теория помехоустойчивого кодирования, обеспечившая развитие надежных систем передачи и обработки информации.

Теория помехоустойчивого кодирования развивалась многими российскими и зарубежными исследователями, такими как Э.Р. Берлекэмп, Э.Л. Блох, Р.Ч. Боуз, А. Витерби, Дж. Возенкрафт, Р. Галлагер, М.Д. Голей, С.И. Егоров, К.Ш. Зигангиров, В.В. Золотарев, Ю.Б. Зубарев, В.В. Зяблов, Е.А. Крук, Дж. Месси, Л.Е. Назаров, А.Э. Нейфах, К.А. Нордстром, Г.В. Овечкин, Д.К. Омура, Д.К. Рей-Чоудхури, И.С. Рид, Д.М. Робинсон, Г.М. Соломон, Р.М. Фано, Л.М. Финк, Г.Д. Форни, Р.У. Хемминг, А.М. Хоквингем, П. Элайс и многими другими. Однако проблема однозначного выбора вида кодирования для конкретного канала передачи информации пока не решена.

История корректирующих кодов началась с изобретения кодов Хемминга, которое произошло практически одновременно с появлением теории информации. Чуть позднее были разработаны коды Голея. Со временем для

улучшения корректирующей способности помехоустойчивые коды начали соединять в разнообразные комбинации. Было выяснено, что даже для варианта соединения двух относительно простых кодов в комбинацию можно получить код с весьма высокой корректирующей способностью. В 1993 году, как дальнейшее развитие методов комбинированного кодирования, были представлены турбокоды. Турбокоды показали лучшие результаты корректирующей способности в каналах связи с относительно высокой вероятностью появления ошибки. Такие каналы характерны в первую очередь для радиосвязи, в том числе – военной связи.

За последние десять лет по направлению повышения помехоустойчивости цифровых систем связи, в том числе с применением помехоустойчивого кодирования, завершены диссертационные исследования А.И. Акмалходжаева, Д.С. Демидова, В.А. Карболина, Е.А. Лихобабина, Д.В. Сеницина, Г.М. Тамразяна, П.В. Трифонова, М.Ю. Чилихина и др.

В настоящее время существует значительное количество вариантов построения и методов декодирования помехоустойчивых кодов, способных исправлять как одиночные, так и групповые ошибки. Вместе с тем характеристики практических реализаций помехоустойчивых кодов значительно отстают от теоретических пределов. Возникают существенные сложности в удовлетворении требований к эффективности кодов с целью достижения постоянно растущих требований к системам передачи и хранения данных.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются комбинированные помехоустойчивые коды. Предметом исследования являются методы разработки комбинированных помехоустойчивых кодов.

Цель и задачи исследования. Цель работы – повышение эффективности комбинированных помехоустойчивых кодов.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Определить основные критерии эффективности помехоустойчивого кодирования.
2. Выполнить анализ современных подходов к повышению эффективности помехоустойчивых кодов.

3. Повысить адаптивные возможности последовательных каскадных кодов.

4. Выполнить анализ возможности построения турбокода на основе блочного кода при декодировании в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности.

5. Выполнить анализ возможности создания комбинированных кодов путем реализации декодирования блочных и сверточных кодов с применением декодера турбокода.

6. Выполнить анализ возможности создания комбинированного кода на основе турбокода с дополнительным кодированием информационных бит.

7. Повысить эффективность декодера каскадного кода, использующего для декодирования внешнего кода метод максимального правдоподобия.

8. Повысить эффективность декодера турбокода, использующего метод декодирования в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности.

9. Разработать программные имитаторы работы кодеков комбинированных кодов с целью проведения количественной оценки повышения эффективности.

Научная новизна.

В диссертационном исследовании получены следующие основные результаты, содержащие элементы научной новизны:

1. Решена научная задача, отличающаяся от известных тем, что предложен модифицированный метод последовательного кодирования путем реализации избирательного кодирования кодовых бит внутренним кодом. Модификация заключается в кодировании внутренним кодом определенной части кодовой последовательности на выходе кодера внешнего кода. В результате обеспечивается повышение эффективности кодирования путем реализации возможности гибкой адаптации корректирующей способности кода. Таким образом происходит минимизация избыточности кода для достижения требуемого значения вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении.

2. Для решения задачи построения турбокода на основе блочного кода при

декодировании в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности предложен модифицированный метод декодирования, позволяющий производить декодирование с использованием нерегулярной синдромной решетки блочного кода. Осуществлен вывод формулы для расчета вероятности ошибочного бита в декодированном информационном сообщении для такого варианта построения турбокода. Для предложенного варианта построения турбокода без изменения алгоритма декодирования стали возможны гибкая адаптация параметров и декодирование мягкого решения детектора.

3. Для решения научной задачи повышения эффективности блочных и сверточных кодов предложено добавлять к кодовому слову еще один или несколько блоков информационных бит. При этом становится возможным декодирование такого комбинированного кода модифицированным декодером турбокода, реализующим декодирование по максимуму апостериорной вероятности. Предложена модификация метода декодирования и структуры декодера.

4. Предложен новый вариант построения комбинированного кода на основе турбокода с дополнительным кодированием информационных бит. Идея создания комбинированного кода основана на необходимости реализации мер по снижению чувствительности декодера турбокода к ошибкам, возникающим в информационных битах кодового слова турбокода путем дополнительного избирательного кодирования. Кроме повышения корректирующей способности кода положительным эффектом стала возможность гибкой адаптации корректирующей способности кода путем изменения числа дополнительно кодированных информационных бит кодового слова турбокода. Произведен расчет энергетического выигрыша от дополнительного кодирования.

5. Впервые предложена модификация методов декодирования по максимуму правдоподобия и максимизации апостериорной вероятности путем применения к значениям декодируемых символов коэффициентов, пропорциональных их достоверности. Модификация методов декодирования

позволила повысить корректирующую способность без роста избыточности кода и без существенного усложнения алгоритма декодирования.

6. Впервые предложена модификация метода декодирования согласно принципу максимизации апостериорной вероятности путем применения понижающих коэффициентов к значениям символов, достоверность которых оказывает большее влияние на результат декодирования. Модификация метода декодирования позволила повысить корректирующую способность без роста избыточности кода и без существенного усложнения алгоритма декодирования.

7. Разработаны программные имитаторы, моделирующие работу упоминаемых в диссертационном исследовании кодеков при прохождении канала с аддитивным белым гауссовским шумом.

Теоретическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается, в первую очередь, в разработке и исследовании новых предложений по модификации методов и алгоритмов декодирования комбинированных помехоустойчивых кодов, создании новых кодовых конструкций. Ряд предложенных нововведений обеспечивает возможность гибкой адаптации корректирующей способности помехоустойчивого кода. Иные модификации повышают корректирующую способность кода без роста избыточности кода и существенного усложнения алгоритмов декодирования.

Практическая ценность результатов. Практическая ценность результатов работы состоит в создании новых кодовых конструкций, научно обоснованных методов и рекомендаций по повышению эффективности систем цифровой связи. Достигаемое повышение эффективности помехоустойчивых каскадных кодов может быть конвертировано как в увеличение скорости передачи данных, так и в снижение необходимой мощности передатчика.

Реализация результатов работы. Проведенные исследования, разработанные методы и полученные результаты использованы:

– ООО «Рубеж-Техно» (г. Краснодар) в научно-исследовательской и производственной деятельности, в частности, при построении радиоканалов передачи данных между компонентами охранных и сигнализационных систем;

– ООО «Аргун-Софт» (г. Санкт-Петербург) при проектировании и разработке каналов связи автоматизированных систем управления, в том числе, в рамках ОКР «Магистраль-МПСН/АС»;

– АО «МВП «СВЕМЕЛ» (г. Москва) при разработке протоколов передачи данных автоматизированной системы в защищенном исполнении в ходе ОКР «Рубеж-Арктика»;

– ООО «СТИЛСОФТ» (г. Ставрополь) при построении каналов управления беспилотными летательными аппаратами;

– ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (г. Владимир) в учебном процессе в рамках дисциплины «Проектирование и эксплуатация устройств генерирования и обработки сигналов».

Все результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

В ходе работы над диссертационным исследованием разработаны многочисленные программные продукты. Оформлено 7 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Методы исследования. В работе использованы положения теории информации и теории помехоустойчивого кодирования, методы теории графов, теории вероятности и математической статистики.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Модифицированный метод последовательного кодирования путем избирательного кодирования кодовых бит внутренним кодом, который обеспечивает повышение эффективности кодирования за счет реализации возможности гибкой адаптации корректирующей способности кода к изменениям характеристик канала передачи данных. При этом доказана возможность плавного роста скорости передачи данных до 48 %.

2. Комбинированный код, построенный на основе блочного или сверточного кода путем повторной передачи информационных бит кодового слова с декодированием в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности. Предложенный вариант построения позволяет адаптировать

характеристики кода к ухудшению состояния канала передачи данных. Для случая построения комбинированного кода на основе сверточного кода снижение вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении составило 27 раз с $4,0 \cdot 10^{-5}$ до $1,5 \cdot 10^{-6}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 10^{-3}$).

3. Модифицированный метод декодирования в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности, который позволяет осуществлять декодирование турбокода, построенного на основе систематического блочного кода, и без усложнения алгоритма выполнять декодирование мягкого решения детектора и декодирование перфорированного кода. При декодировании жесткого решения детектора изменение кодовой скорости возможно от 0,3 до 0,5, то есть на 67 %. При декодировании мягкого решения детектора изменение кодовой скорости возможно от 0,3 до 0,6, то есть на 100 %.

Выведены формулы для расчета вероятности битовой ошибки при декодировании согласно максимуму апостериорной вероятности для турбокодов на основе систематического сверточного кода и на основе блочного кода Хемминга.

4. Комбинированный код на основе турбокода с дополнительным выборочным кодированием информационных бит. При дополнительном кодировании лишь одного информационного бита зафиксировано снижение вероятности появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении в 2,18 раза при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 10^{-3}$. При дополнительном кодировании трех информационных бит, вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении снизилась в 212 раз. Энергетический выигрыш от применения дополнительного кодирования информационных бит кодового слова турбокода составил 0,28 дБ – при дополнительном кодировании одного бита, 0,78 дБ – при дополнительном кодировании двух бит, 0,8 дБ – при дополнительном кодировании трех бит.

5. Модификация методов декодирования по максимуму правдоподобия и максимизации апостериорной вероятности путем применения к значениям

декодируемых бит коэффициентов, пропорциональных их достоверности. Применение модификации метода для декодера, функционирующего согласно принципу максимального правдоподобия при исследовании корректирующей способности последовательного каскадного кода с избирательным кодированием внутренним кодом, привело к снижению вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении в 920 раз: с $1,1 \cdot 10^{-10}$ до $1,2 \cdot 10^{-13}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$). Применение модификации метода для декодера, функционирующего согласно принципу максимизации апостериорной вероятности при исследовании корректирующей способности турбокода, с дополнительным избирательным кодированием информационных бит кодового слова, привело к снижению вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении в 5,3 раза: с $4,0 \cdot 10^{-9}$ по $7,6 \cdot 10^{-10}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$).

6. Модифицированный метод декодирования, согласно принципу максимизации апостериорной вероятности, путем применения понижающих коэффициентов к значениям символов, достоверность которых оказывает большее влияние на результат декодирования.

При применении модифицированного метода декодирования турбокода, построенного на основе систематического сверточного кода, зафиксировано снижение вероятности битовой ошибки в 14 раз: с $8,5 \cdot 10^{-7}$ до $6,1 \cdot 10^{-8}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$).

Использование модифицированного метода декодирования комбинированного кода, полученного из сверточного кода путем повторной передачи информационных бит, привело к снижению вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении в 208 раз: с $2,5 \cdot 10^{-4}$ до $1,2 \cdot 10^{-6}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$).

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обусловлена корректным применением теории информации, теории помехоустойчивого кодирования, теории вероятности и математической

статистики, подтверждением теоретических результатов экспериментально полученными данными, внедрением результатов предприятиями промышленности, работающими на рынке информационных технологий.

Основные результаты диссертационного исследования обсуждались на следующих международных научных конференциях:

– «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2017» (Владимир-Суздаль, 5-7 июля 2017 г.);

– «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2019» (Владимир, 3-5 июля 2019 г.);

– «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ-2021» (Владимир, 6-7 октября 2021 г.);

– International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering (Apitech - 2019) (Красноярск, 25-27 сентября 2019 г.);

– III International Scientific Conference «MIP: Engineering-III-2021: Modernization, Innovations, Progress: Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering» (Красноярск, 29-30 апреля 2021 г.);

– III International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering (Apitech-III-2021) (Красноярск, 24 сентября – 3 октября 2021 г.);

– IV International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering (Apitech-IV 2022) on October 6-8, 2022, Bukhara, Uzbekistan (два доклада);

– V International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering (Apitech-V-2023) on October 26-28, 2023, Bukhara, Uzbekistan (два доклада).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 39 опубликованных работах, в том числе в 16 работах, опубликованных в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации; 7 работах в изданиях, включенных в международные базы цитирования; 7 результатах интеллектуальной деятельности; 9 работах в других

научных изданиях и материалах конференций. 2 работы опубликованы в соавторстве.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 1, 2, 3, 15.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из пяти глав, введения, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения.

Личный вклад автора. Все основные результаты и экспериментальные исследования диссертационной работы получены автором самостоятельно.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследования, объект и предмет, методическая база, научная новизна и практическое значение.

В первой главе описаны основные причины возникновения в переданных сообщениях одиночных и групповых ошибок. Повышение помехоустойчивости – это достаточно сложная задача, решение которой, как правило, требует значительных затрат. В последнее время эта задача все чаще решается с использованием помехоустойчивых кодов.

Основываясь на результатах анализа современной учебной и научной литературы, исходя из противоречия, возникаемого при стремлении к достижению высоких показателей скорости и достоверности передачи данных, основными критериями эффективности помехоустойчивого кодирования следует считать:

- степень приближения характеристик кода к пределу К. Шеннона;
- достижение требуемой величины вероятности битовой ошибки;
- достижение требуемого значения кодовой скорости;

- снижение величины вероятности битовой ошибки при заданной избыточности кода;

- снижение избыточности кода при заданной допустимой вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении;

- снижение энергетических и временных затрат на кодирование-декодирование.

Рассмотрены современные подходы к повышению эффективности помехоустойчивых кодов, в частности: комбинирование кодов, декодирование мягкого решения детектора, перемежение кодовых бит, адаптация параметров кода к характеристикам канала передачи данных.

С целью придания помехоустойчивым кодам нужных характеристик применяют разнообразные сочетания из конструкций кодов, методов кодирования-декодирования и модуляции. К комбинированным кодам относятся турбокоды, каскадные коды, коды произведения, гибридные коды, сигнально-кодовые конструкции.

Во второй главе рассмотрены вопросы повышения эффективности последовательных каскадных кодов, построенных на основе внешнего сверточного кода. В начале главы разобран вариант построения сверточного кода, наиболее часто упоминаемого в диссертационном исследовании. Введены термины и обозначения, принятые при рассмотрении процессов кодирования и декодирования сверточных кодов в соответствии с алгоритмом Витерби, использующим принцип максимизации правдоподобия.

В ходе диссертационного исследования рассматриваются результаты работы программных комплексов, созданных на языке программирования Python и C++, моделирующих работу разнообразных кодеров-декодеров. Необходимыми компонентами всех таких программ являются генераторы массивов информации, массивов ошибок и формирователи мягкого или жесткого решения детектора. В главе дано описание программных реализаций перечисленных компонентов. Формирование жесткого решения детектора может быть реализовано путем введения ошибок (инверсии бит) в массив

кодовых бит с вероятностью, равной вероятности появления ошибочного бита в канале передачи данных. Формирование мягкого решения детектора – процесс более сложный. Примем допущение, что из-за наличия шума в канале передачи данных, прошедший детектор сигнал r является непрерывной стохастической переменной с плотностями условных вероятностей, равными $f(r/0)$ и $f(r/1)$:

$$f(r/0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(r+r_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

$$f(r/1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(r-r_0)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (2)$$

В ходе моделирования мягкого выхода детектора, имея сформированную кодовую последовательность, необходимо заменить каждый ее бит с определенной вероятностью символом, которому соответствует группа из $\log_2 N$ бит, где N – число уровней квантования. Для этого формируется вспомогательный массив уровней качества принятых значений бит. Вероятность появления того или иного значения символа в массиве рассчитывается из числа уровней квантования с применением интегральной функции Лапласа. Далее массив кодовых бит поэлементно складывается с массивом уровней качества в соответствии с особым правилом сложения, описанным в диссертационном исследовании. В результате образуется массив, моделирующий последовательность символов на выходе детектора.

В главе проведено исследование влияния перфорации на корректирующую способность сверточных кодов. Перфорация как правило вводится в соответствии со специальными матрицами. Анализ результатов исследований показал, что применение различных матриц перфорации позволяет в широких пределах изменять избыточность и корректирующую способность помехоустойчивого кода.

Далее в главе рассмотрена реализация последовательного каскадного кодирования на основе внешнего сверточного кода. Отрицательной стороной такого соединения кодов является значительный рост избыточности. Предложено регулировать избыточность и корректирующую способность последовательного каскадного кода, изменяя долю кодовых бит внешнего кода,

кодируемых внутренним кодом. Такой код назван гибким последовательным каскадным кодом (далее – ГПКК). Применение ГПКК позволяет плавно изменять скорость передачи информации в зависимости от состояния канала передачи данных, повышая таким образом эффективность кодирования. Структурная схема канала связи с применением ГПКК изображена на рисунке 1.

Примем допущение, что ошибки, имеющиеся в символах на выходе декодера внутреннего кода, после прохождения обратного перемежителя (рисунок 1) стали независимыми. Тогда, зная значение вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении для того или иного внутреннего кода p_V , можно моделировать его работу, сгенерировав появление ошибок с вероятностью p_V на входе декодера внешнего кода. Для остальных символов, поступающих на вход декодера внешнего кода, минуя декодер внутреннего кода, генерация ошибок осуществляется в соответствии с вероятностью появления ошибочного бита в канале передачи данных p_B . В качестве внешнего кода будем рассматривать сверточный код, декодирование которого осуществляется в соответствии с алгоритмом Витерби. В качестве внутреннего кода использовался поочередно один из трех хорошо известных кодов: Хемминга, Голея и Рида-Соломона.

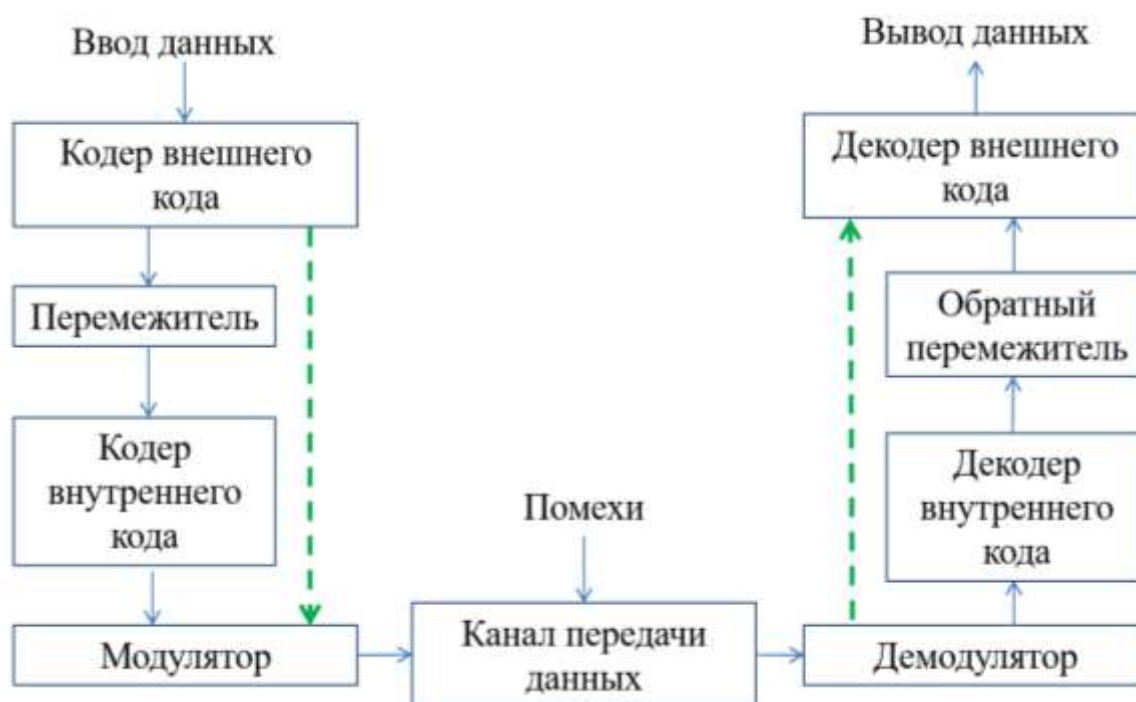


Рисунок 1. Структурная схема канала связи с применением ГПКК

С целью исследований корректирующей способности ГПКК создан программный комплекс, моделирующий работу ГПКК с учетом принятых допущений. Программный комплекс содержит в своем составе следующие основные компоненты: генератор информационной последовательности, кодер внешнего кода, блок моделирования выхода детектора приемника с заданной вероятностью появления ошибочного бита p_B , блок моделирования выхода декодера внутреннего кода с вероятностью появления ошибочного бита p_V , декодер внешнего кода.

В ходе исследований выборка бит для кодирования внутренним кодом осуществлялась для каждого десятого, восьмого, шестого, четвертого и второго бита из последовательности, закодированной с использованием внешнего кода. Обозначим период кодирования внутренним кодом как T_N . Тогда, например, при $T_N = 2$ кодируется внутренним кодом каждый второй бит (через одного).

Результаты исследования ГПКК, для случая использования кода Голя в качестве внутреннего кода, приведены на рисунке 2 пунктирными линиями. Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о возможности изменения в широких пределах корректирующей способности ГПКК, осуществляя кодирование внутренним кодом только определенной части бит. Диапазон таких изменений увеличивается при снижении вероятности появления ошибочного бита в декодируемой внешним кодом последовательности. Изменение скорости передачи информации, в зависимости от состояния канала, возможно до 48 % при применении кода Голя в качестве внутреннего кода, что соответствует энергетическому выигрышу до 1,7 дБ. При использовании кода Хемминга и кода Рида-Соломона в качестве внутреннего кода, характер полученных зависимостей аналогичен.

В случае, когда на вход декодера внешнего кода в некотором количестве поступают символы с выхода декодера внутреннего кода, значения таких символов являются более достоверными, чем значения остальных символов, которые не подвергались кодированию-декодированию внутренним кодом. Сделано предположение, что корректирующая способность ГПКК повысится

при умножении значений закодированных внутренним кодом бит на повышающий коэффициент $K > 1$. Аналогично можно умножать на понижающий коэффициент $K < 1$ значения остальных символов, которые не подвергались кодированию-декодированию внутренним кодом. Например, если первый и последний бит последовательности 1; -1; -1; 1 поступили с выхода внутреннего кода, то на входе декодера внешнего кода последовательность будет иметь вид 2; -1; -1; 2 или 1; -0,5; -0,5; 1. Сделанное предположение о росте корректирующей способности подтверждено в работе по итогам рассмотрения процесса декодирования различных последовательностей.

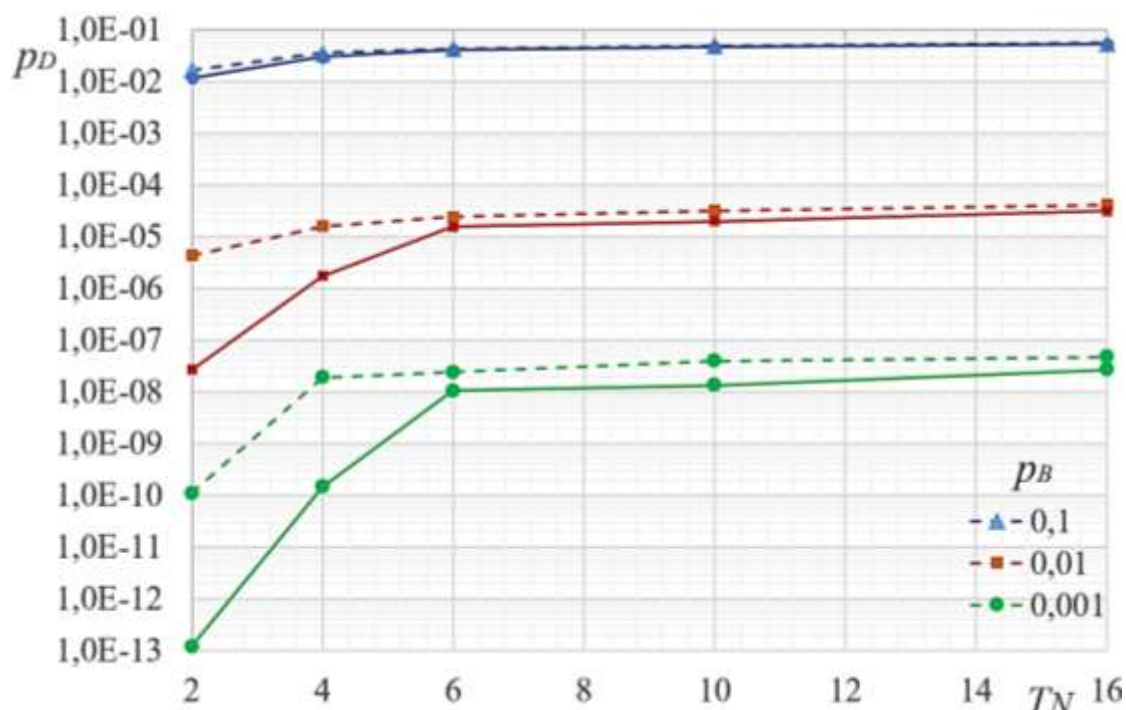


Рисунок 2. Вероятность появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении p_D при использовании внутреннего кода Голя

В алгоритм декодирования внесены изменения с целью реализации возможности умножения на коэффициент $K > 1$ значений символов, поступающих с декодера внутреннего кода. Соответствующие изменения внесены в программный имитатор работы кодека ГПКК. Результаты исследования ГПКК, для случая использования кода Голя в качестве внутреннего кода, приведены на рисунке 2 сплошными линиями.

Проанализировав результаты, можно сделать вывод, что применение описанной модификации декодирования привело к росту корректирующей способности. При кодировании каждого второго бита внутренним кодом Голя вероятность битовой ошибки снизилась в 920 раз – с $1,1 \cdot 10^{-10}$ до $1,2 \cdot 10^{-13}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 10^{-3}$). Эффект от применения коэффициентов увеличивается при снижении вероятности ошибочного бита в декодируемой последовательности, а также при увеличении разницы между значениями p_B и p_V .

В третьей главе рассмотрены вопросы повышения эффективности последовательных каскадных кодов, построенных на основе внешнего блочного кода. В начале главы проведен краткий обзор ряда известных двоичных блочных кодов, а также недвоичного кода Рида-Соломона. Для рассмотренных кодов осуществлен вывод формул для вычисления вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении. Рассмотрим вывод формулы, выбрав в качестве примера код Хемминга с параметрами $k = 4$, $n = 7$.

Пусть PK_i – вероятность наличия в принятом кодовом сообщении i ошибок, а PE_i – вероятность ошибочного декодирования сообщения при наличии в нем i ошибок. Тогда для кодового слова, состоящего из n кодовых бит, вероятность его ошибочного декодирования P_{BK} будет равна

$$P_{BK} = PK_1 \cdot PE_1 + PK_2 \cdot PE_2 + PK_3 \cdot PE_3 + \dots + PK_n \cdot PE_n = \sum_{i=1}^n PK_i \cdot PE_i. \quad (3)$$

С учетом способности кода гарантированно исправлять t ошибочных бит формула будет иметь вид

$$P_{BK} = \sum_{i=t+1}^n PK_i \cdot PE_i. \quad (4)$$

Пусть K_E – среднее количество ошибочных бит, возникающих при ошибочном декодировании одного кодового слова, тогда вероятность появления ошибочного бита при декодировании кодового слова равна

$$P_{B1} = P_{BK} \cdot K_E. \quad (5)$$

С учетом того, что в одном кодовом слове присутствует k информационных бит, вероятность появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении p_D будет равна

$$p_D = P_{B1} : k . \quad (6)$$

Обозначим вероятность наличия двух ошибочных бит из n как $P_{2изn}$. По формуле Бернулли она равна

$$P_{2изn} = \frac{n!}{2!(n-2)!} p_B^2 (1 - p_B)^{n-2} . \quad (7)$$

При декодировании кодового слова кода Хемминга ошибка декодирования кодового слова возникает при количестве ошибочных бит ≥ 2 . Вероятность наличия двух ошибочных бит из семи равна

$$P_{2из7} = \frac{7!}{2!5!} p_B^2 (1 - p_B)^{7-2} = 21 p^2 (1 - p_B)^5 . \quad (8)$$

Вероятность наличия в слове двух ошибочных бит значительно превышает вероятность наличия трех и более ошибок. В дальнейших расчетах будет рассматриваться только случай наличия в кодовом слове двух ошибочных бит. В таком случае формула (4) будет иметь следующий вид

$$P_{BK} \approx P E_2 . \quad (9)$$

Возникновение двух ошибок в кодовом слове всегда приводит к ошибочному декодированию. Тогда

$$P E_2 = P_{2из7} . \quad (10)$$

При наличии в кодовом слове двух ошибок декодированное слово будет отличаться от переданного в трех битах. В среднем, в информационной части слова будет содержаться $3 \cdot (k/n)$ ошибочных бит

$$K_E = 3 \cdot (k/n) = 3 \cdot (4/7) = 1,71 . \quad (11)$$

Подставим в формулу (6) формулы (5), (9), (10) и (11), тогда формула для вычисления вероятности появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении будет иметь вид

$$p_D = (P_{2изn} \cdot 3 \cdot (k/n)) : k = P_{2из7} \cdot (3/7) = 9 p_B^2 (1 - p_B)^5 . \quad (12)$$

Аналогично осуществлен вывод формулы для вычисления вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении для кода БЧХ ($n = 31, k = 11, t = 5$) и кода Голея.

Для кода БЧХ

$$p_D = 237510 \cdot p_B^6 \cdot (1 - p_B)^{25}. \quad (13)$$

Для кода Голея

$$p_D = 2310 \cdot p_B^4 \cdot (1 - p_B)^{19}. \quad (14)$$

Показаны особенности вывода формулы для расчета вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении для недвоичного кода Рида-Соломона. Для исследований выбран код Рида-Соломона с параметрами $n = 9, k = 5, t = 2$ и размером символа, равным одному байту. Кодовое слово содержит пять информационных символов и четыре проверочных символа. Такой код способен исправить два любых ошибочных символа. Наличие трех ошибочных символов приводит к ошибке декодирования слова, за исключением случая, когда все три ошибочных символа находятся в проверочной части слова. Вероятность ошибки декодирования кодового слова приблизительно равна вероятности появления трех ошибочных бит в кодовом слове при условии, что все три ошибочных бита расположены в разных байтах сообщения и хотя бы один из них находится в информационной части слова. Вероятность данного события P_{PC} равна сумме вероятностей следующих трех событий:

- 1) в проверочной части два «ошибочных» байта, в информационной – один;
- 2) в проверочной части один «ошибочный» байт, в информационной – два;
- 3) в проверочной части нет «ошибочных» байт, в информационной – три.

$$\begin{aligned} P_{PC} &= P_4(2)P_5(1) + P_4(1)P_5(2) + P_4(0)P_5(3) = C_4^2 q^2 (1-q)^{4-2} \cdot C_5^1 q (1-q)^{5-1} + C_4^1 q (1-q)^{4-1} \cdot \\ &C_5^2 q^2 (1-q)^{5-2} + C_4^0 q^0 (1-q)^{4-0} \cdot C_5^3 q^3 (1-q)^{5-3} = \frac{4!}{2!2!1!4!} q^3 (1-q)^6 + \frac{4!}{1!3!2!3!} q^3 (1-q)^6 + \\ &+ \frac{5!}{2!3!} q^3 (1-q)^6 = 30q^3 (1-q)^6 + 40q^3 (1-q)^6 + 10q^3 (1-q)^6 = 80q^3 (1-q)^6, \end{aligned} \quad (15)$$

где q – вероятность наличия в одном байте одного ошибочного бита. Найдем эту вероятность по формуле Бернулли

$$q = P_8(1) = C_8^1 p_B (1 - p_B)^{8-1} = \frac{8!}{1!7!} p_B (1 - p_B)^7 = 8p_B (1 - p_B)^7. \quad (16)$$

Расстояние между кодовыми словами кода равно четырем байтам, то есть, при ошибочном декодировании в кодовом слове будет четыре ошибочных бита. Очевидно, что в среднем в одном ошибочном байте имеется четыре ошибочных бита, тогда кодовое слово из 72 бит содержит 16 ошибочных бит. Следовательно, вероятность ошибочного бита в декодированном информационном сообщении равна

$$p_D = (16/72) \cdot P_{PC} = 0,22 \cdot P_{PC}. \quad (17)$$

Далее в главе рассмотрены возможности блочных кодов по адаптации параметров путем перфорации. Для систематического двоичного блочного кода, исправляющего t и обнаруживающего $t+1$ ошибок, предложен способ повышения корректирующей способности путем реализации подбора значения выколотого бита. Для примера выбран расширенный код Голея, исправляющий три и обнаруживающий четыре ошибки. При выкалывании одного бита применение метода подбора позволило снизить вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении в 46 раз (при $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$). При выкалывании двух бит применение метода подбора позволило снизить вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении в 20 раз (при $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$).

При перфорации рассмотренных блочных кодов изменение кодовой скорости в значительных пределах невозможно. При перфорации сверточных кодов изменение кодовой скорости возможно с 0,5 до 0,83 (на 66 %), при перфорации рассмотренных блочных кодов с 0,555 до 0,625 (на 13 %).

Произведена оценка корректирующей способности последовательного каскадного кода на основе внешнего кода Рида-Соломона. В качестве внутренних кодов использовались код Хемминга и код Голея. Результаты

работы программного имитатора работы кодека каскадного кода приведены в таблице 1.

Таблица 1

Вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении

Применяемый код	$p_B = 1 \cdot 10^{-1}$	$p_B = 1 \cdot 10^{-2}$	$p_B = 1 \cdot 10^{-3}$	$p_B = 1 \cdot 10^{-4}$
Рида-Соломона	$2,7 \cdot 10^{-1}$	$4,9 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^{-9}$
Каскадное соединение кода Рида-Соломона и Хэмминга	$7,7 \cdot 10^{-2}$	$9,2 \cdot 10^{-7}$	$9,1 \cdot 10^{-13}$	$9,0 \cdot 10^{-19}$
Каскадное соединение кода Рида-Соломона и Голея	$4,6 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-16}$	$2,4 \cdot 10^{-23}$

Каскадное соединение кодов позволило значительно повысить корректирующую способность и в определенной степени позволило адаптировать код к изменениям характеристик канала передачи данных. Недостатком такой адаптации является отсутствие плавной возможности изменения скорости и корректирующей способности кода.

Существенным недостатком блочных кодов является отсутствие простых алгоритмов декодирования мягких решений детектора, что было подробно описано при рассмотрении возможностей мягкого декодирования кода Рида-Соломона.

В главе показан процесс декодирования кода Хемминга согласно алгоритму Витерби с использованием синдромной решетки. Алгоритм декодирования одинаков при декодировании как мягкого, так и жесткого решения детектора. При декодировании мягкого решения детектора существенно улучшается корректирующая способность кода, становится возможно исправление множественных ошибок. С применением программного имитатора работы кодека кода Хемминга проведена численная оценка корректирующей способности при декодировании мягкого и жесткого решения детектора, результаты которой приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Вероятность появления ошибочного бита в декодированном
информационном сообщении

Вид декодирования	$p_B = 1 \cdot 10^{-1}$	$p_B = 1 \cdot 10^{-2}$	$p_B = 1 \cdot 10^{-3}$	$p_B = 1 \cdot 10^{-4}$
Декодирование жесткого решения	$6,33 \cdot 10^{-2}$	$8,53 \cdot 10^{-4}$	$8,92 \cdot 10^{-6}$	$9,05 \cdot 10^{-8}$
Декодирование мягкого решения	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$

Произведено исследование корректирующей способности перфорированного кода Хемминга при декодировании мягкого решения детектора (таблица 3). Сделан вывод о возможности изменения корректирующей способности при применении перфорации кодового слова.

Таблица 3.

Вероятность появления ошибочного бита в декодированном
информационном сообщении

Число выколотых бит	$p_B = 1 \cdot 10^{-1}$	$p_B = 1 \cdot 10^{-2}$	$p_B = 1 \cdot 10^{-3}$	$p_B = 1 \cdot 10^{-4}$
1	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$
2	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
3	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,05 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$0,9 \cdot 10^{-4}$

В главе 2 была рассмотрена возможность регулировки избыточности и корректирующую способность последовательного каскадного кода при изменении числа кодовых бит внешнего кода, кодируемых внутренним кодом. Таким образом, было реализовано повышение эффективности последовательного каскадного кода на основе внешнего сверточного кода. В главе 3 рассмотрена возможность построения ГПКК на основе внешнего блочного кода при его декодировании согласно алгоритму Витерби. В качестве внешнего блочного кода использован код Хемминга. В качестве внутреннего кода использован код Голя. С целью исследования корректирующей способности ГПКК на языке программирования Python создан программный имитатор работы кодека. Программный продукт содержит в своем составе

следующие основные компоненты: генератор информационной последовательности, кодер внешнего кода, блок моделирования выхода детектора приемника с заданной вероятностью появления ошибочного бита p_B , блок моделирования выхода декодера внутреннего кода с вероятностью появления ошибочного бита p_V , декодер внешнего кода.

Результаты исследования ГПКК представлены на рисунке 3 пунктирными линиями. Количество бит кодового слова, закодированных внутренним кодом, обозначено на графике как C_H . Проанализировав результаты, можно сделать выводы о наличии возможности изменения корректирующей способности при осуществлении избирательного кодирования внутренним кодом. Диапазон изменений увеличивается при снижении вероятности появления ошибочного бита в канале передачи данных.

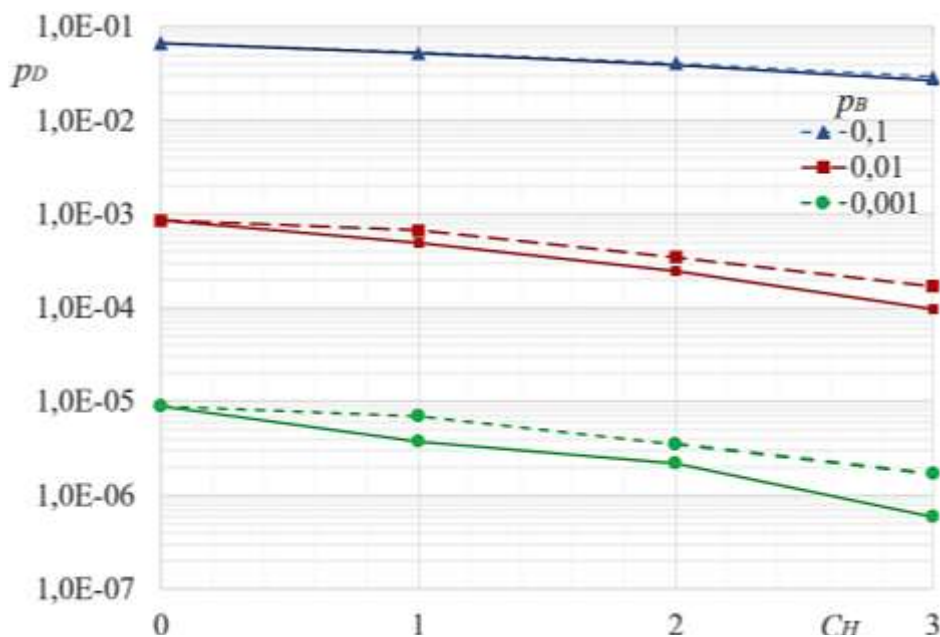


Рисунок 3. Вероятность появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении p_D при использовании ГПКК

В главе 2, при исследовании ГПКК на основе внешнего сверточного кода, в алгоритм декодирования внесены изменения с целью реализации возможности умножение на коэффициент $K > 1$ значений символов, поступающих с декодера внутреннего кода. Применение модификации алгоритма декодирования привело к росту корректирующей способности. В главе 3 рассмотрена аналогичная модификация алгоритма декодирования

ГПКК на основе внешнего блочного кода при декодировании в соответствии с критерием максимального правдоподобия. Сделанное предположение о росте корректирующей способности подтверждено в работе по итогам рассмотрения процесса декодирования различных последовательностей. С целью количественного исследования роста корректирующей способности в программном имитаторе работы кодека ГПКК реализовано умножение на коэффициент $K > 1$ декодируемых внешним кодом значений символов, поступающих с декодера внутреннего кода. В качестве внутреннего кода использован код Голея. Результаты исследования ГПКК представлены на рисунке 3 сплошными линиями.

Проанализировав результаты, можно сделать следующие выводы. Применение описанной модификации декодирования привело к росту корректирующей способности. При кодировании трех из семи бит кодового слова кода Хемминга внутренним кодом Голея вероятность битовой ошибки снижается в 2,5 раза: с $4,7 \cdot 10^{-7}$ до $1,9 \cdot 10^{-7}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$). Эффект от применения коэффициентов увеличивается при снижении вероятности ошибочного бита в декодируемой последовательности, а также при увеличении разницы между значениями p_B и p_V .

В четвертой главе рассмотрены вопросы повышения эффективности систематических сверточных и систематических блочных кодов при использовании для их декодирования декодера турбокода. В начале главы рассмотрены принципы построения турбокода на основе систематического сверточного кода (далее – ТССК), введены термины и обозначения, принятые при описании процессов кодирования и декодирования турбокодов. Разобран процесс декодирования кодового слова турбокода с использованием распространенных алгоритмов SOVA и MAP.

Для ТССК осуществлен вывод формулы для расчета значения вероятности появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении p_D при наличии в конце информационной последовательности двух терминирующих бит. Кодовое слово турбокода состоит из блока

информационных бит и двух блоков проверочных бит, по четыре бита в каждом блоке. Турбокод способен исправлять две ошибки при любом их расположении. Так как вероятность наличия трех ошибочных бит в кодовом слове значительно превышает вероятность возникновения большего числа ошибок, то с незначительной долей приближения можно считать, что ошибочное декодирование кодового слова вызвано наличием трех ошибок. Длина кодового слова составляет 12 бит. Вероятность появления трех ошибочных бит из двенадцати можно найти по формуле Бернулли

$$P_{\text{зиз12}} = (12! / (3! \cdot (12 - 3)!)) \cdot p_B^3 \cdot (1 - p_B)^{12-3} = 220 \cdot p_B^3 \cdot (1 - p_B)^9. \quad (18)$$

В MS Excel разработан декодер одного кодового слова турбокода в соответствии с алгоритмом MAP. Результаты работы декодера показали, что при наличии трех ошибок в кодовом слове ошибочное декодирование осуществляется в 16,8 % случаев. Тогда вероятность ошибочного декодирования кодового слова p_W вычисляется по следующей формуле

$$p_W = 0,168 \cdot P_{\text{зиз12}} = 37 \cdot p_B^3 \cdot (1 - p_B)^9. \quad (19)$$

Как показали результаты исследований, при ошибочном декодировании кодового слова ошибка возникает в среднем в 1,2 битах из двух информационных бит. Тогда вероятность появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении равна

$$p_D = (1,2/2) \cdot p_W = 22,2 \cdot p_B^3 \cdot (1 - p_B)^9. \quad (20)$$

Результаты расчета по формуле (20), совпали с результатами, полученными экспериментально с использованием программного имитатора кодека турбокода.

Произведена оценка корректирующей способности перфорированного ТССК, кодовое слово в котором состоит из блока информационных бит и двух блоков проверочных бит, по четыре бита в каждом блоке. Сравнение результатов декодирования при перфорации различных частей кодового слова турбокода позволило сделать вывод о наибольшей целесообразности введения перфорации в последовательность проверочных бит. Наиболее низкие значения корректирующей способности получены при перфорации информационных бит.

Анализ результатов работы программного имитатора кодека ТССК (таблицы 4 и 5) показал возможность регулировки избыточности и корректирующей способности путем изменения числа выколотых бит. При декодировании жесткого решение детектора изменение кодовой скорости возможно от 0,33 до 0,57, то есть на 72 %. При декодировании мягкого решение детектора изменение кодовой скорости возможно от 0,33 до 0,8, то есть на 142%.

Таблица 4

Вероятность появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении при декодировании жесткого решения детектора

Число выкал	$p_B=1 \cdot 10^{-1}$	$p_B=1 \cdot 10^{-2}$	$p_B=1 \cdot 10^{-3}$	$p_B=1 \cdot 10^{-4}$
0	$3,1 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$4,7 \cdot 10^{-9}$
1	$3,9 \cdot 10^{-2}$	$3,49 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$
2	$4,9 \cdot 10^{-2}$	$5,46 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$	$6,0 \cdot 10^{-8}$
3	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-4}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$8,0 \cdot 10^{-8}$
5	$8,8 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$7,37 \cdot 10^{-4}$	$7,6 \cdot 10^{-5}$

Таблица 5

Вероятность появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении при декодировании мягкого решения детектора

Число выкал	$p_B=1 \cdot 10^{-1}$	$p_B=1 \cdot 10^{-2}$	$p_B=1 \cdot 10^{-3}$	$p_B=1 \cdot 10^{-4}$
0	$9,55 \cdot 10^{-3}$	$2,81 \cdot 10^{-6}$	$3,50 \cdot 10^{-9}$	$2,91 \cdot 10^{-12}$
1	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$8,8 \cdot 10^{-6}$	$1,09 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-11}$
2	$1,96 \cdot 10^{-2}$	$2,9 \cdot 10^{-5}$	$1,01 \cdot 10^{-7}$	$2,4 \cdot 10^{-10}$
3	$2,64 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$	$7,0 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-9}$
5	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$9,6 \cdot 10^{-7}$
6	$6,8 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-4}$	$9,8 \cdot 10^{-6}$
7	$8,3 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$
8	$9,9 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$

Далее в главе рассмотрена возможность использования декодера турбокода для декодирования кодовых слов блочных и сверточных кодов. После прибавления к кодовому слову систематического блочного кода (далее – СБК) или систематического сверточного кода (далее – ССК) еще одного или

нескольких блоков информационных бит в приемном устройстве возможно формирование нескольких вариантов кодового слова, при декодировании которых может быть использован декодер турбокода. Назовем такой комбинированный код кодом с повтором информационных бит (далее – КПИБ). Кодовое слово КПИБ состоит из блока проверочных бит и N блоков информационных бит. Кодер КПИБ не в состоянии сформировать кодовые слова, обладающие квазислучайными свойствами, однако он значительно проще кодера турбокода. Декодер КПИБ представляет собой модификацию декодера турбокода, как показано на рисунке 4.

В качестве СБК применен код Хемминга ($k = 4, n = 7$). В качестве ССК применен код, структурная схема кодера которого изображена на рисунке 5, при длине кодируемого блока информации, равной четырем битам.



Рисунок 4. Декодер КПИБ

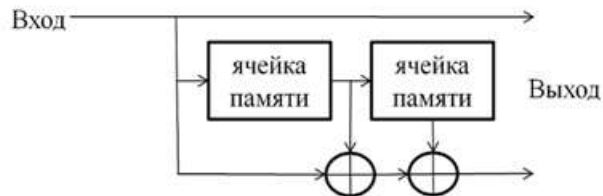


Рисунок 5. Структурная схема кодера ССК

С целью реализации количественных исследований корректирующей способности КПИБ путем нахождения вероятности появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении p_D на языке программирования Python созданы программные имитаторы, моделирующие работу кодеров

КПИБ. В сравнении с результатами декодирования блочного и сверточного кода, на основе которых был создан КПИБ, наблюдается рост корректирующей способности (рисунки 6 – 9). Графики, полученные по результатам исследования КПИБ, обозначены пунктиром.

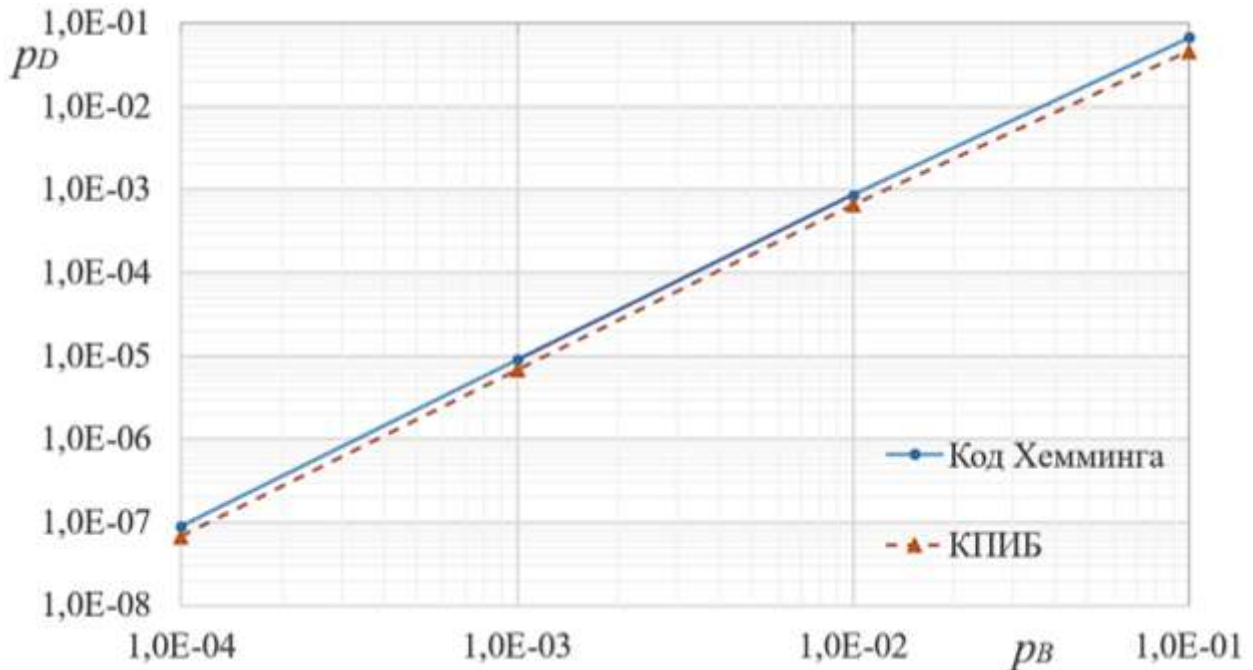


Рисунок 6. Результаты декодирования жесткого решения детектора

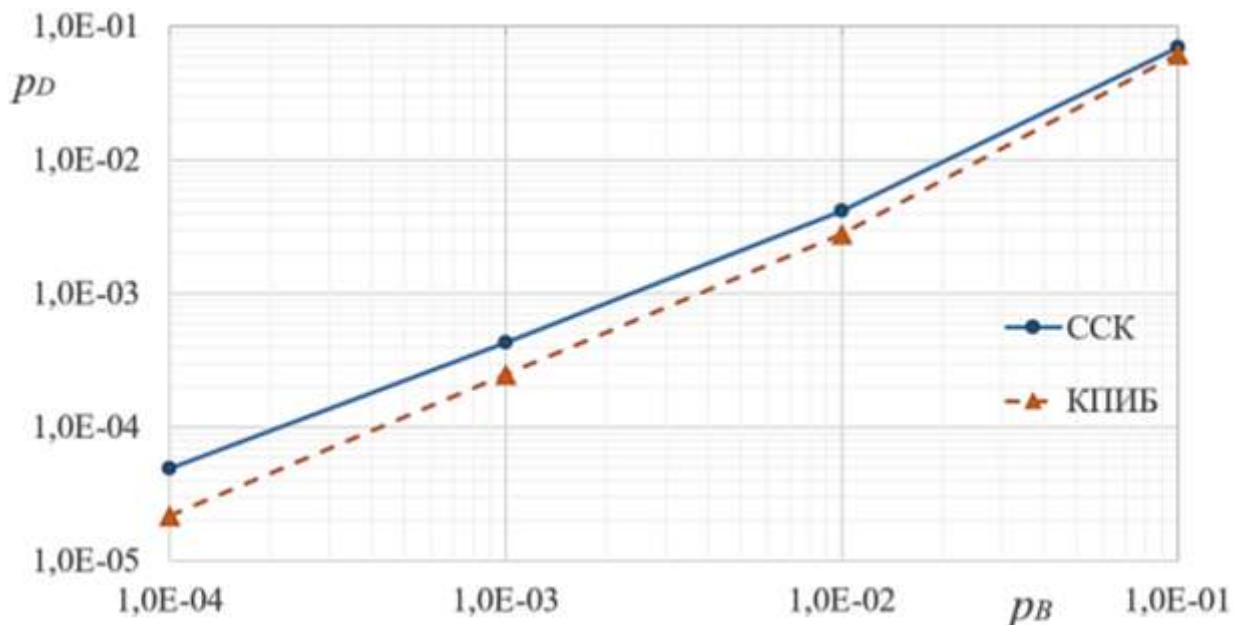


Рисунок 7. Результаты декодирования жесткого решения детектора

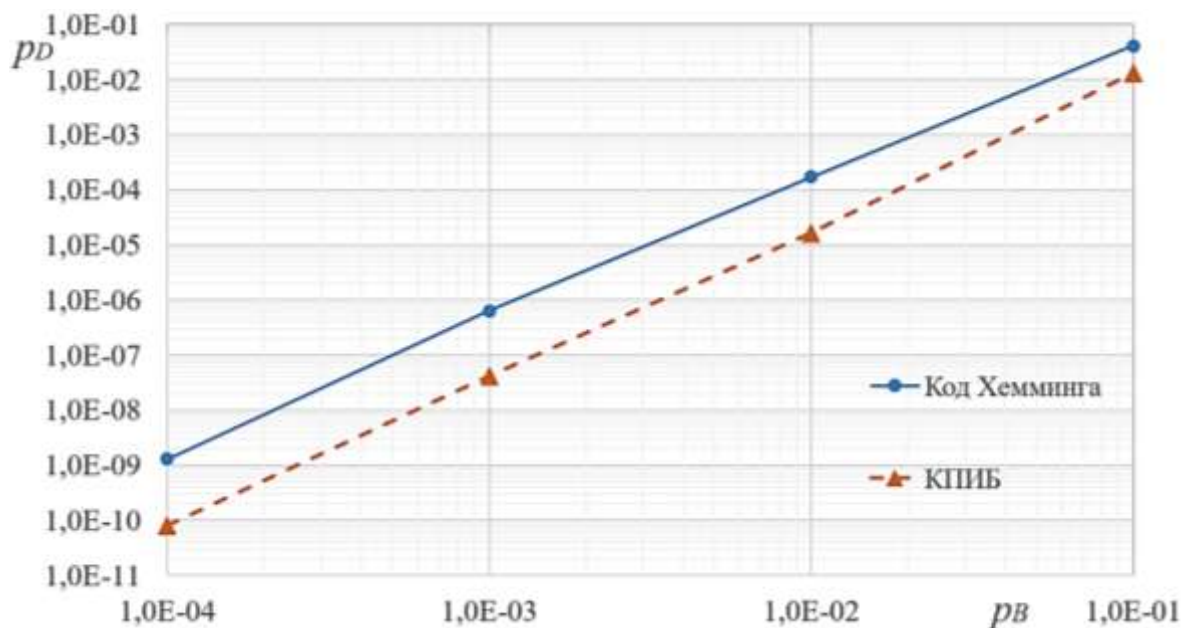


Рисунок 8. Результаты декодирования мягкого решения детектора

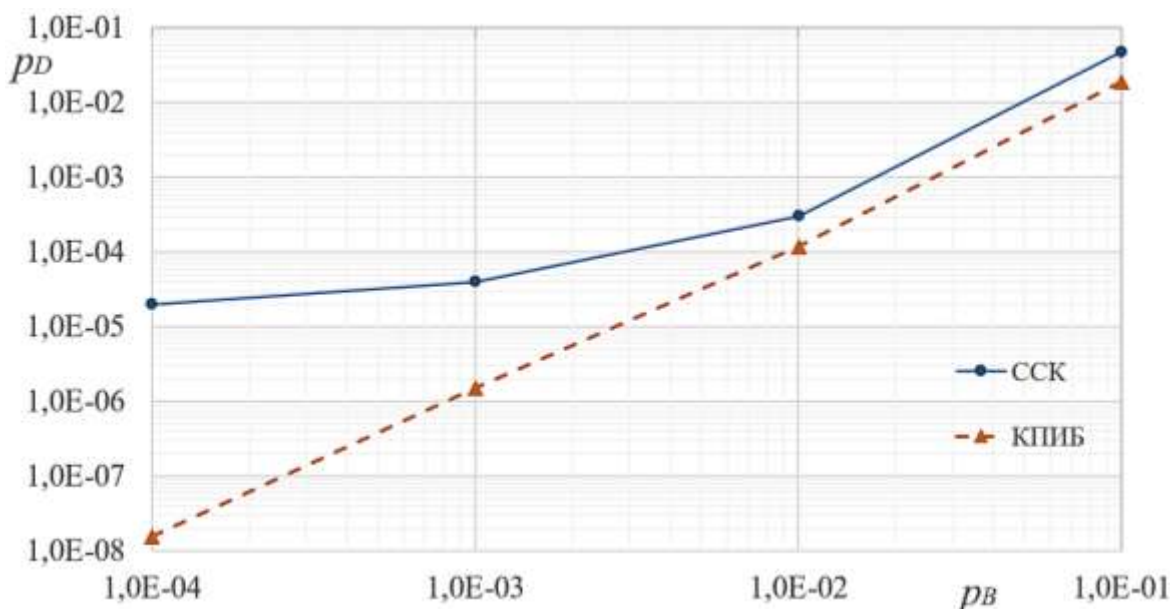


Рисунок 9. Результаты декодирования мягкого решения детектора

Построение комбинированного кода на основе сверточного и блочного кода при повторной передаче информационных бит и декодировании согласно максимуму апостериорной вероятности привело к снижению вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении. Для случая построения КПИБ на основе ССК, при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$, вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении снизилась в 27 раз: с $4,0 \cdot 10^{-5}$ до $1,5 \cdot 10^{-6}$.

Кодовое слово КПИБ состоит из одного блока проверочных и нескольких блоков информационных бит. Символы блока проверочных бит участвуют в формировании нескольких слов на входе декодера КПИБ. Это определяет высокую чувствительность декодера к достоверности значений проверочных бит кодового слова, что подтверждено экспериментально. Негативной стороной такой чувствительности является высокая вероятность ошибки декодирования при наличии ошибок в проверочных битах кодового слова КПИБ. Предложено снизить высокую чувствительность декодера к достоверности значений проверочных бит путем умножения их значений на понижающий коэффициент $K < 1$. В диссертационном исследовании такое предположение подтверждено рассмотрением результатов декодирования кодового слова КПИБ при наличии ошибок в проверочных битах и применении коэффициентов. В метод декодирования КПИБ внесены изменения с целью реализации возможности использования коэффициентов. Проведены повторные исследования корректирующей способности КПИБ на основе выбранных ССК и СБК.

Результаты работы программных комплексов представлены на рисунках 10 – 13 сплошными линиями. Пунктиром обозначены графики, построенные по ранее полученным результатам. Применение описанной модификации метода декодирования привело к снижению вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении. Например, для случая декодирования КПИБ на основе ССК, снижение составило 208 раз: с $2,5 \cdot 10^{-4}$ до $1,2 \cdot 10^{-6}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 10^{-3}$).

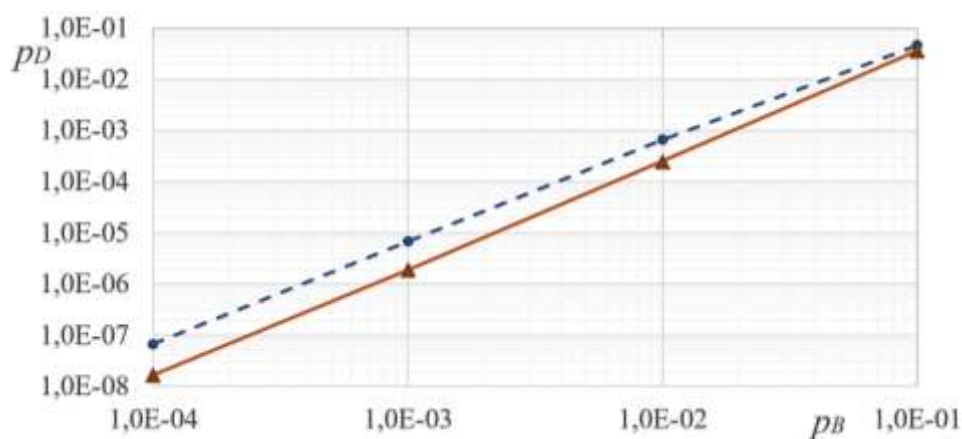


Рисунок 10. Декодирование жесткого решения КПИБ на основе СБК

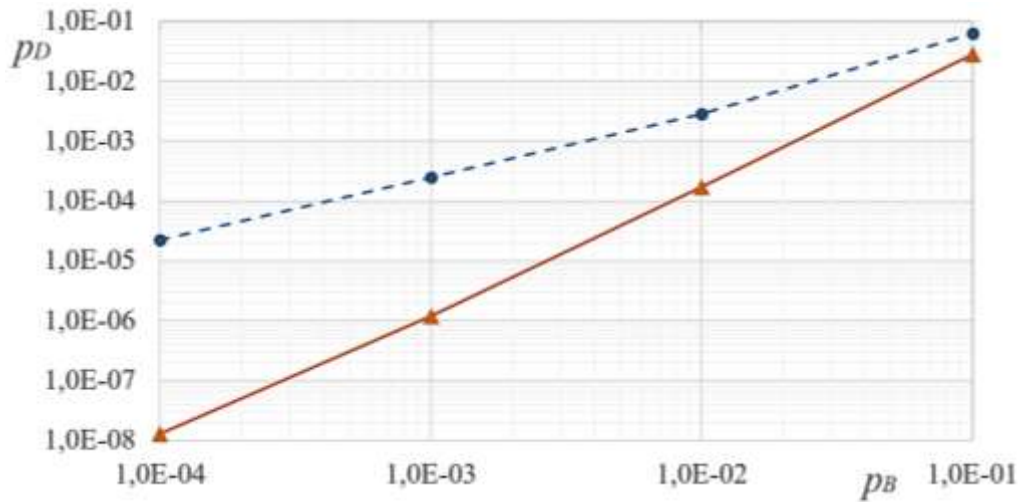


Рисунок 11. Декодирование жесткого решения КПИБ на основе ССК

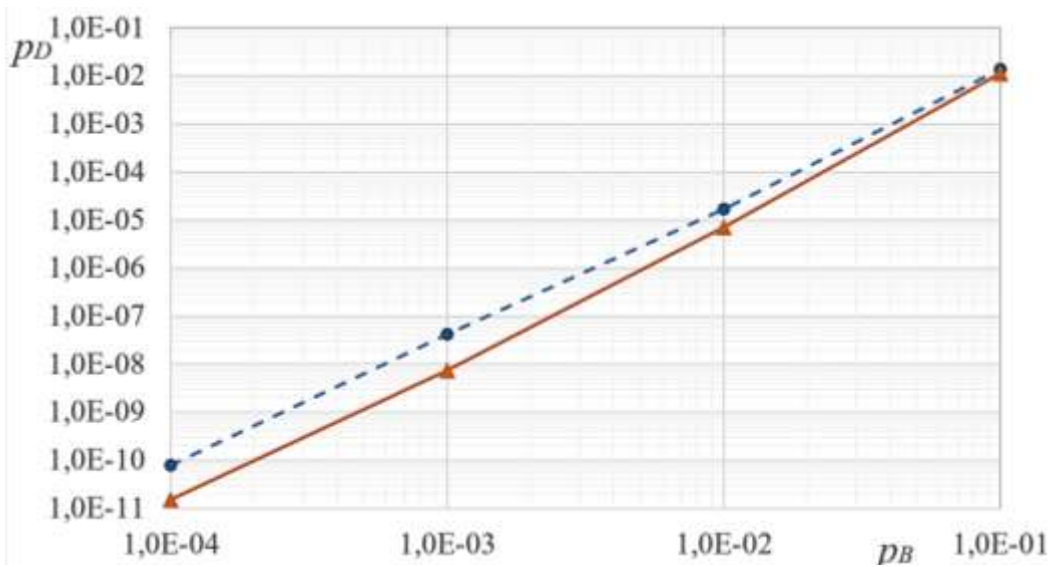


Рисунок 12. Декодирование мягкого решения КПИБ на основе SBK

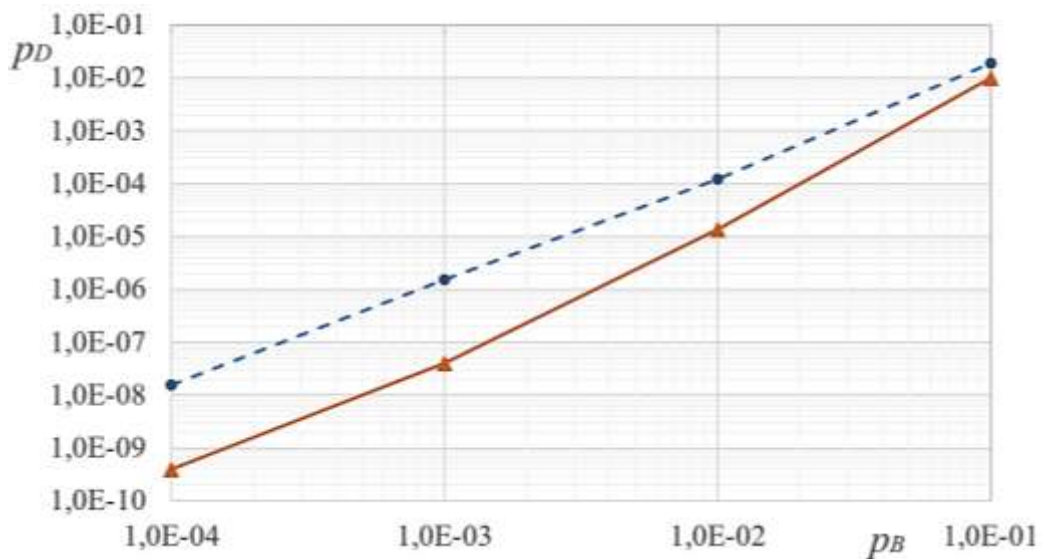


Рисунок 13. Декодирование мягкого решения КПИБ на основе ССК

В пятой главе рассмотрены вопросы повышения эффективности турбокодов. Известно, что построение турбокода возможно, как на основе систематического сверточного кода, так и на основе систематического блочного кода. Для варианта построения ТССК разработан и хорошо исследован целый ряд алгоритмов декодирования (SOVA, MAP, Log-MAP, Max-Log-MAP и др.). Для варианта построения турбокода на основе СБК (далее – ТСБК) в разнообразных источниках описано построение турбокода в виде кода-произведения при декодировании, как правило, согласно алгоритму Чейза-Пиндиаха.

Алгоритмы декодирования кодов-произведений значительно усложняются при декодировании мягкого решения детектора в отличие от перечисленных алгоритмов декодирования турбокодов на основе ССК. Алгоритмы декодирования турбокодов на основе ССК имеют более гибкие реализации и показывают лучшие характеристики при низких относительных скоростях кодирования. Сделано предположение, что использование при декодировании ТСБК синдромной решетки блочного кода позволит применять при декодировании перечисленные выше алгоритмы, используемые при декодировании ТССК.

Пусть кодер ТСБК состоит из двух кодеров блочного кода и устройства перемежения. В качестве СБК выберем код Хемминга, кодовое слово которого состоит из трех проверочных и четырех информационных бит. Алгоритм декодирования ТССК, согласно критерию максимума апостериорной вероятности, подразумевает декодирование по синдромной решетке с регулярной структурой. В диссертационном исследовании подробно описана модификация метода декодирования согласно максимуму апостериорной вероятности с использованием решетки блочного кода Хемминга, обладающей нерегулярной структурой.

С целью предварительной оценки корректирующей способности ТСБК выведем формулу нахождения вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении. При декодировании жесткого решения детектора,

декодер ТСБК способен исправить все одиночные ошибки. Вероятность появления 2 ошибочных бит из 10 равна

$$P_{2из10} = (10! / (2! \cdot (10-2)!)) \cdot p_B^2 \cdot (1-p_B)^{10-2} = 45 \cdot p_B^2 \cdot (1-p_B)^8. \quad (21)$$

Вероятность наличия двух ошибочных бит в кодовом слове значительно превышает вероятность возникновения большего числа ошибок. С небольшой долей приближения можно считать, что ошибочное декодирование слова вызвано наличием двух ошибок. В MS Excel разработан декодер одного кодового слова ТСБК в соответствии с алгоритмом MAP. Результаты работы декодера показали, что при наличии двух ошибок в кодовом слове ошибочное декодирование осуществляется в 22 % случаев. Тогда вероятность ошибочного декодирования кодового слова p_W вычисляется по следующей формуле

$$p_W \approx 0,22 \cdot P_{2из10} = 9,9 \cdot p_B^2 \cdot (1-p_B)^8. \quad (22)$$

Исследования показали, что при ошибочном декодировании кодового слова ошибка возникает в среднем в 2,25 битах из четырех информационных бит. Тогда вероятность появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении p_D равна

$$p_D = (2,25 / 4) \cdot p_W = 5,6 \cdot p_B^2 \cdot (1-p_B)^8. \quad (23)$$

Результаты расчета вероятности битовой ошибки по формуле (23) совпали с экспериментальными результатами, полученными на программном имитаторе работы кодека ТСБК, созданном на языке программирования Python. Сравнение результатов работы программных имитаторов кодеков ТСБК и ТССК показало примерно равную корректирующую способность при одинаковой длине кодового слова.

Исследована возможность гибкой адаптации параметров ТСБК при введении перфорации. При декодировании жесткого решения детектора изменение кодовой скорости возможно от 0,3 до 0,5, то есть на 67 %. При декодировании мягкого решения детектора изменение кодовой скорости возможно от 0,3 до 0,6, то есть на 100 %.

Информационные биты кодового слова участвуют в формировании нескольких слов на входе декодера турбокода. Это определяет высокую чувствительность декодера к достоверности значений информационных бит кодового слова. Негативной стороной такой чувствительности является высокая вероятность ошибки декодирования при наличии ошибок в информационных битах кодового слова турбокода. В диссертационном исследовании данное утверждение подтверждено рассмотрением результатов декодирования при расположении ошибок в разных частях кодового слова.

Предложено снизить высокую чувствительность декодера к достоверности значений информационных бит путем умножения их значений на понижающий коэффициент $K < 1$. Действенность предложения подтверждена итогами рассмотрения результатов декодирования при расположении ошибок в разных частях кодового слова и применении коэффициентов. В метод декодирования на основе максимизации апостериорной вероятности внесены изменения с целью реализации возможности использования коэффициентов. С целью определения эффективности модифицированного метода декодирования с использованием программных комплексов, разработанных на языке программирования Python, проведены экспериментальные исследования корректирующей способности ТССК и ТСБК.

Итоги исследования ТССК приведены на рисунках 14, 15. Результаты декодирования модифицированным методом изображены сплошными линиями. Пунктиром приведены результаты декодирования без применения коэффициентов. Проведя анализ полученных данных, можно сделать вывод о снижении вероятности появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении при декодировании модифицированным методом. Эффект увеличивается при снижении значения p_B .

В ходе исследования ТСБК при декодировании жесткого решения детектора влияние значения K на величину p_D обнаружено не было, что может быть связано с особенностью построения блочного кода Хемминга. Результаты работы программного имитатора при декодировании мягкого решения ТСБК

модифицированным методом приведены на рисунке 16 сплошной линией. Пунктиром приведен график, построенный по результатам декодирования без применения коэффициентов. Проведя анализ результатов, можно сделать вывод о снижении вероятности появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении при декодировании модифицированным методом. Эффект от применения модифицированного метода декодирования увеличивается при снижении p_B .

Применение модифицированного метода декодирования позволило снизить вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении. В частности, для ТССК при декодировании жесткого решения детектора снижение вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении составило: 1,1 раза (с $3,1 \cdot 10^{-2}$ до $2,82 \cdot 10^{-2}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-1}$, 3 раза (с $1,3 \cdot 10^{-4}$ до $4,3 \cdot 10^{-5}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-2}$, 14 раз (с $8,5 \cdot 10^{-7}$ до $6,1 \cdot 10^{-8}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$.

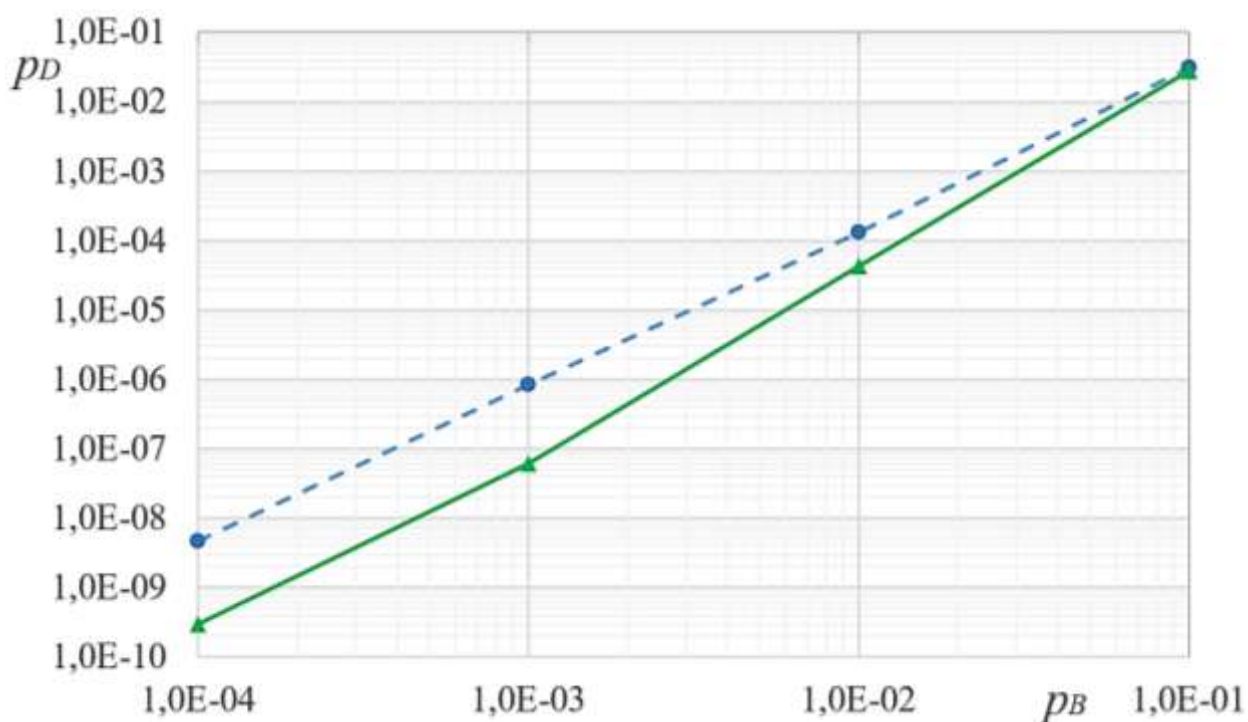


Рисунок 14. Декодирование жесткого решения ТССК

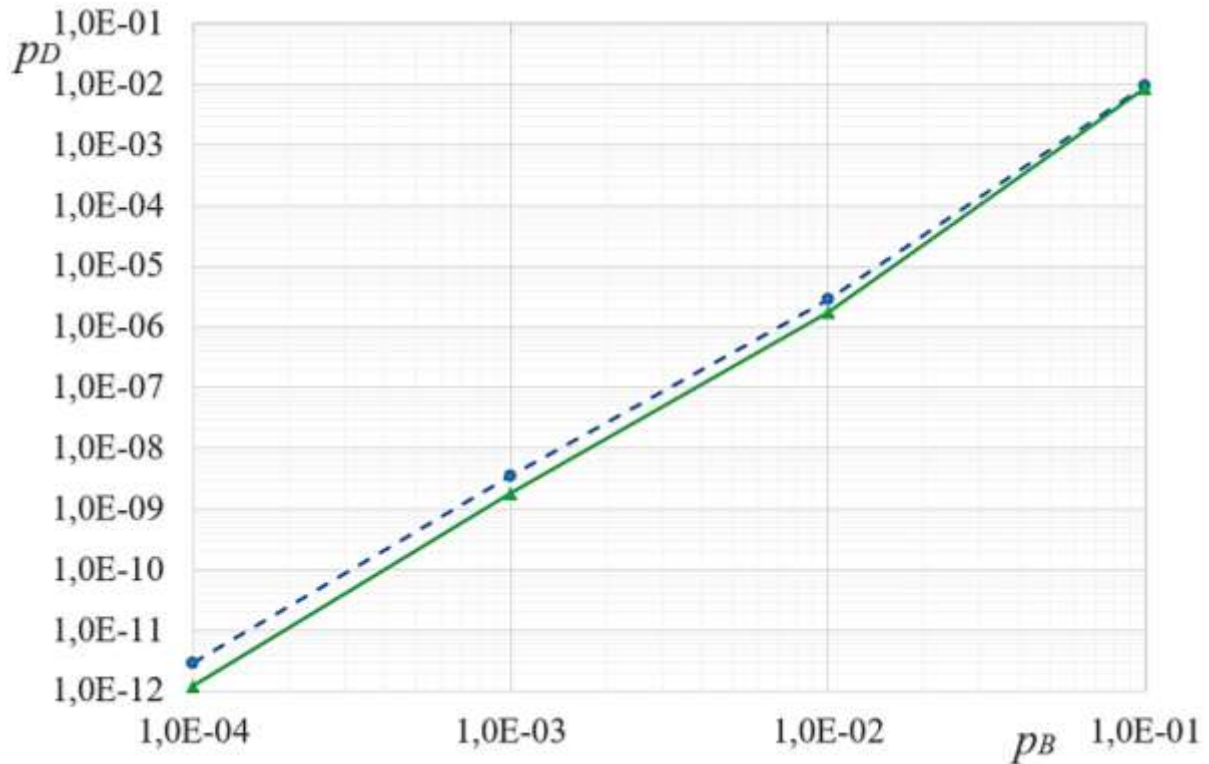


Рисунок 15. Декодирование мягкого решения ТССК

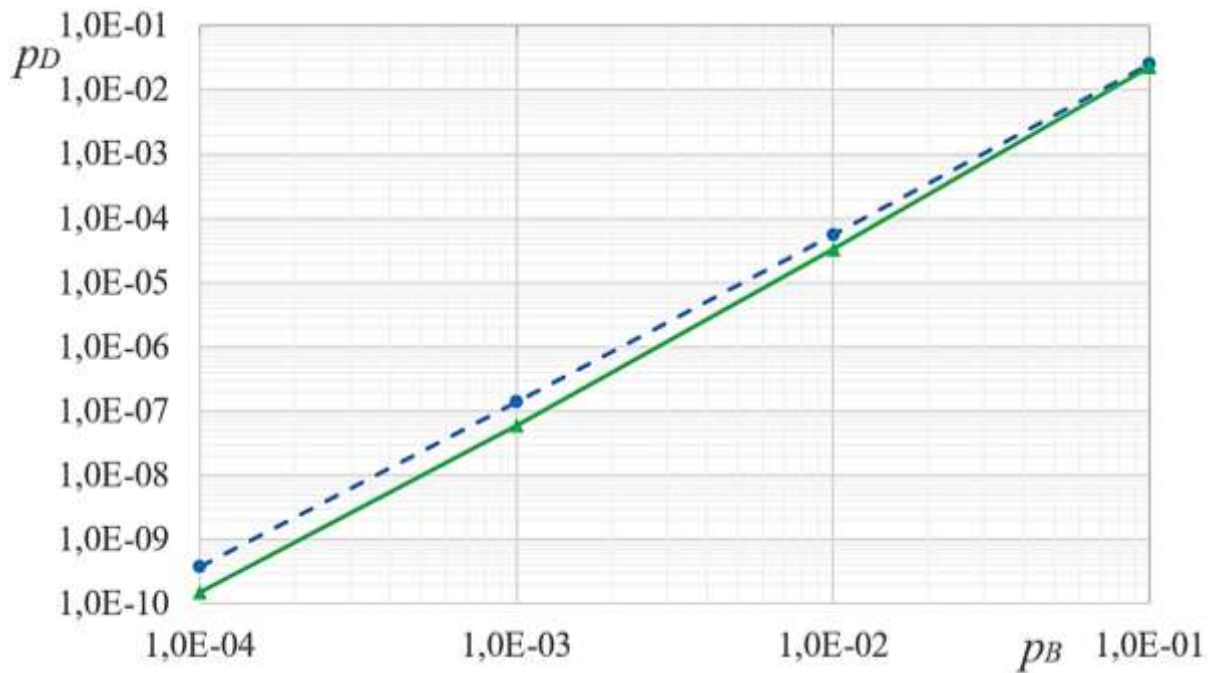


Рисунок 16. Декодирование мягкого решения ТСБК

Далее в главе рассмотрен еще один вариант решения проблемы высокой чувствительности декодера турбокода к достоверности значений информационных бит кодового слова, заключающийся в дополнительном кодировании информационных бит. Назовем такой комбинированный код турбокодом с дополнительным кодированием информационных бит (далее –

ТДК). Обозначим число информационных бит кодового слова турбокода, дополнительно закодированных кодом Голя, как T_D . С использованием программного имитатора работы кодека ТДК произведены исследования, дающие количественную информацию о значении p_D в зависимости от вероятности ошибки в канале передачи данных p_B и значения T_D . Результаты исследования ТДК представлены на графике пунктирными линиями (рисунок 17).

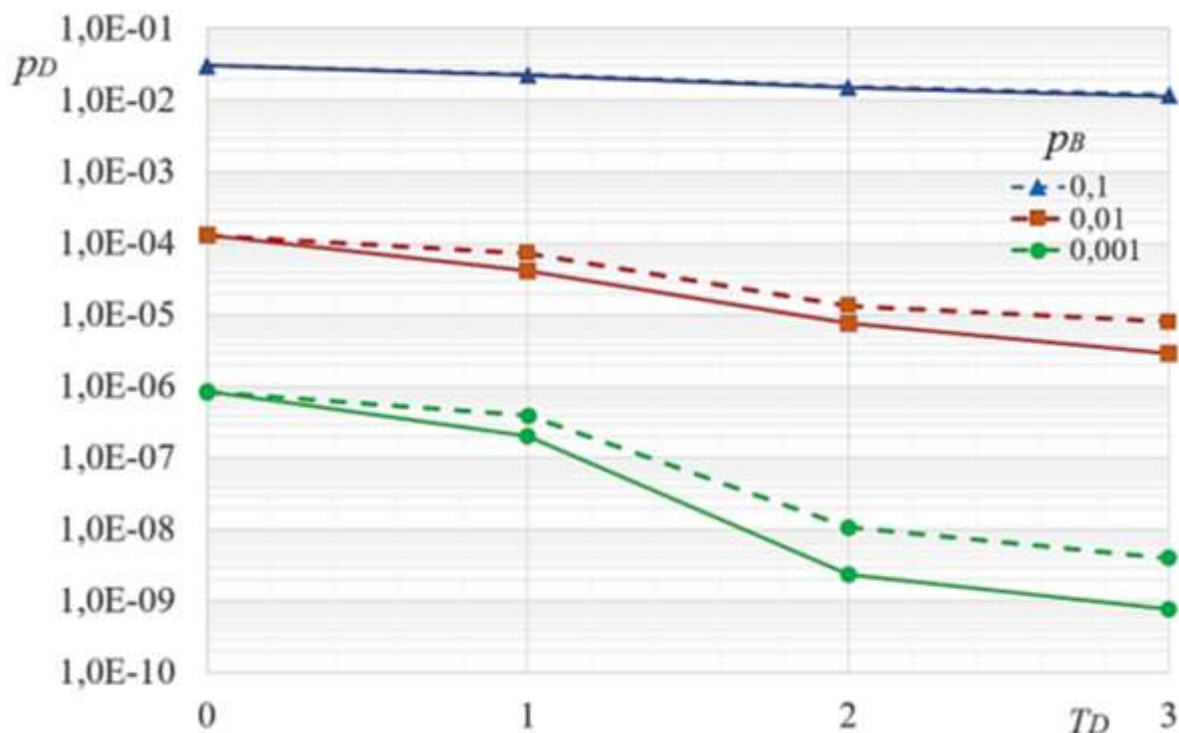


Рисунок 17. Результаты исследования ТДК

Проанализировав результаты, можно сделать вывод о повышении корректирующей способности турбокода при дополнительном кодировании даже одного бита из информационной части кодового слова турбокода. Путем дополнительного кодирования возможно изменение в широких пределах корректирующей способности при регулировании числа дополнительно закодированных бит.

С использованием известной характеристики модуляции BPSK произведен расчет энергетического выигрыша, вызванного снижением вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении при применении ТДК. Результаты расчета приведены в таблице 6.

Проведя анализ данных, представленных в таблице 6, можно сделать вывод о том, что энергетический выигрыш от снижения вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении превышает потери, вызванные введением дополнительной избыточности.

Таблица 6

Энергетический выигрыш от применения дополнительного кодирования

T_D	Потери из-за введения дополнительной избыточности, дБ	Выигрыш за счет снижения p_D , дБ		
		$p_B = 1 \cdot 10^{-1}$	$p_B = 1 \cdot 10^{-2}$	$p_B = 1 \cdot 10^{-3}$
1	0,32	0,6	0,4	0,35
2	0,62	1,4	1,19	1,4
3	0,9	1,7	1,4	1,7

Учесть большую степень достоверности дополнительно закодированных информационных бит можно путем умножения их значений перед декодированием на повышающие коэффициенты $K > 1$. Эффект повышения корректирующей способности при применении коэффициентов подтвержден в диссертации эмпирическим путем при рассмотрении примеров декодирования разнообразных кодовых слов. В метод декодирования внесены изменения с целью реализации возможности использования коэффициентов. Внесенные изменения отражены в работе программного имитатора работы кодека ТДК. Результаты работы программы представлены на рисунке 17 сплошными линиями. Проведя анализ полученных данных, можно сделать вывод о снижении вероятности появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении при декодировании модифицированным методом. При дополнительном кодировании трех информационных бит и применении повышающего коэффициента к значениям дополнительно кодированных информационных бит снижение вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении составило: 1,1 раза (с $1,2 \cdot 10^{-2}$ по $1,1 \cdot 10^{-2}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-1}$, 2,8 раза (с $8,01 \cdot 10^{-6}$ по $2,9 \cdot 10^{-6}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-2}$, 5,3 раза (с $4,0 \cdot 10^{-9}$ по $7,6 \cdot 10^{-10}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$.

Основные результаты

В диссертационном исследовании решена научная проблема повышения эффективности комбинированных помехоустойчивых кодов, имеющая важное теоретическое и прикладное значение. Получены следующие основные результаты:

1. По итогам анализа научных трудов и доступных источников в области исследования вопросов оценки эффективности определены следующие основные критерии эффективности помехоустойчивого кодирования:

- степень приближения характеристик кода к пределу К. Шеннона;
- достижение требуемой величины вероятности битовой ошибки;
- достижение требуемого значения кодовой скорости;
- снижение величины вероятности битовой ошибки при заданной избыточности кода;
- снижение избыточности кода при заданной допустимой вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении;
- снижение энергетических и временных затрат на кодирование-декодирование.

2. На основе анализа научных публикаций последних лет выделены основные современные подходы к повышению эффективности помехоустойчивых кодов: комбинирование кодов, декодирование мягкого решения детектора, перемежение бит и символов, адаптация параметров кода. Адаптация параметров кода чаще всего была реализована путем модификации порождающих и проверочных матриц блочных кодов и перфорацией кодовых последовательностей сверточных кодов.

3. С целью повышения адаптивных возможностей последовательного каскадного кода предложен модифицированный метод последовательного каскадного кодирования, позволяющий изменять параметры кода путем осуществления кодирования внутренним кодом только определенной части бит с выхода кодера внешнего кода. С учетом избыточности, вносимой при кодировании внутренним кодом, плавное изменение скорости передачи

информации в зависимости от состояния канала возможно до 48 % при применении кода Голя в качестве внутреннего кода, что соответствует энергетическому выигрышу до 1,7 дБ.

4. Осуществлено построение турбокода на основе блочного кода при декодировании в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности. Разработан модифицированный метод декодирования в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности, позволяющий осуществлять декодирование кодовой последовательности ТСБК. Предложенный вариант построения декодера позволяет без усложнения алгоритма осуществлять декодирование мягкого решения детектора и декодирование перфорированного кода. Продемонстрирована возможность гибкой адаптации параметров ТСБК без изменения алгоритма декодирования при введении перфорации. При декодировании жесткого решения детектора изменение кодовой скорости возможно на 67 %. При декодировании мягкого решения детектора изменение кодовой скорости возможно на 100 %.

5. Осуществлено построение комбинированного кода на основе сверточного и блочного кода при повторной передаче информационных бит и декодировании в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности. Для блочных и сверточных кодов при повторной передаче информационных бит кодового слова на приемной стороне возможно формирование нескольких кодовых слов и их декодирование с использованием модифицированного декодера турбокода. Таким образом, при отсутствии изменений в кодере блочного или сверточного кода возможна адаптация характеристик кода к ухудшению состояния канала передачи данных. Для случая построения комбинированного кода на основе сверточного кода, при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$, вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении снизилась в 27 раз: с $4,0 \cdot 10^{-5}$ до $1,5 \cdot 10^{-6}$.

6. Реализовано построение комбинированного кода на основе турбокода с дополнительным кодированием информационных бит. Таким образом решена

проблема высокой чувствительности декодера турбокода к достоверности значений информационных бит кодового слова турбокода. Для исследуемого турбокода при дополнительном кодировании лишь одного информационного бита кодового слова турбокода зафиксировано снижение вероятности появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении в 2,18 раза при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$. Изменяя число бит, подвергшихся дополнительному кодированию, можно регулировать кодовую скорость и корректирующую способность комбинированного кода. При дополнительном кодировании трех информационных бит кодовая скорость изменилась с 0,33 до 0,27, а вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении снизилась в 212 раз. Для случая использования модуляции BPSK произведен расчет энергетического выигрыша от применения дополнительного кодирования информационных бит кодового слова турбокода, который составил 0,28 дБ – при дополнительном кодировании одного бита, 0,78 дБ – при дополнительном кодировании двух бит, 0,8 дБ – при дополнительном кодировании трех бит.

7. Предложена модификация метода декодирования по максимуму правдоподобия путем применения к значениям декодируемых символов коэффициентов, пропорциональных их достоверности. В методы декодирования внесены изменения, позволяющие реализовать умножение значений символов на коэффициенты перед декодированием. Применение модификации метода привело к росту корректирующей способности ГПКК.

Для ГПКК на основе внешнего сверточного кода получено снижение вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении в 920 раз – с $1,1 \cdot 10^{-10}$ до $1,2 \cdot 10^{-13}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 10^{-3}$). Для ГПКК на основе внешнего блочного кода получено снижение вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении в 2,5 раза: с $4,7 \cdot 10^{-7}$ до $1,9 \cdot 10^{-7}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$), что в 368 раз меньше снижения вероятности битовой ошибки при построении ГПКК на основе

внешнего сверточного кода. Такое преимущество ГПКК на основе внешнего сверточного кода обусловлено лучшей взаимосвязью бит кодового слова сверточного кода.

8. Предложена модификация метода декодирования в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности путем применения к значениям декодируемых символов коэффициентов.

Путем теоретического анализа особенности декодирования кодового слова турбокода, а также экспериментальным путем, выявлена высокая чувствительность декодера к достоверности значений информационных бит кодового слова. Негативной стороной такой чувствительности является высокая вероятность ошибки декодирования при наличии ошибок в информационных битах кодового слова. Применение модифицированного метода декодирования с использованием понижающих коэффициентов для декодируемых значений информационных бит кодового слова позволило снизить вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении. Для турбокода на основе сверточного кода при декодировании жесткого решения детектора снижение вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении составило: 1,1 раза (с $3,1 \cdot 10^{-2}$ до $2,82 \cdot 10^{-2}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-1}$, 3 раза (с $1,3 \cdot 10^{-4}$ до $4,3 \cdot 10^{-5}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-2}$, 14 раз (с $8,5 \cdot 10^{-7}$ до $6,1 \cdot 10^{-8}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$.

После проведения теоретического и экспериментального анализа особенности декодирования кодового слова ТДК определено, что учесть большую степень достоверности дополнительно закодированных информационных символов можно путем умножения их значений на повышающие коэффициенты $K > 1$ или путем умножения значений менее достоверных символов на понижающие коэффициенты $K < 1$. Применение коэффициентов позволило снизить вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении. Определены значения коэффициентов, обеспечивающие минимальную величину вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении. При дополнительном

кодировании трех информационных бит снижение вероятности битовой ошибки в декодированном информационном сообщении составило: 1,1 раза (с $1,2 \cdot 10^{-2}$ по $1,1 \cdot 10^{-2}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-1}$, 2,8 раза (с $8,01 \cdot 10^{-6}$ по $2,9 \cdot 10^{-6}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-2}$, 5,3 раза (с $4,0 \cdot 10^{-9}$ по $7,6 \cdot 10^{-10}$) при $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$.

При разностороннем анализе особенностей декодирования кодового слова КПИБ выявлена высокая чувствительность декодера к достоверности значений проверочных бит кодового слова. Негативной стороной такой чувствительности является высокая вероятность ошибки декодирования при наличии ошибок в проверочных битах кодового слова. Осуществлено повышение корректирующей способности КПИБ путем снижения чувствительности декодера к значениям проверочных бит кодового слова. Применение модифицированного метода декодирования с использованием коэффициентов позволило снизить вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении. Для случая декодирования КПИБ на основе ССК снижение составило 208 раз: с $2,5 \cdot 10^{-4}$ до $1,2 \cdot 10^{-6}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 10^{-3}$).

9. С целью исследования корректирующей способности рассмотренных вариантов комбинированных кодов и исследования действенности предложений по модификации методов декодирования разработаны программные имитаторы кодеров комбинированных кодов на языках программирования Python и C++. На семь программных продуктов оформлены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Разработанные программные имитаторы могут быть использованы в научных и учебных целях.

Опыт внедрения в практическую деятельность разработанных кодовых конструкций, модифицированных методов декодирования, алгоритмов, воплощенных в программные продукты, позволяет рекомендовать результаты диссертационного исследования к практическому использованию в системах цифровой связи.

Перспективы дальнейшей разработки темы автору видятся следующими:

1. Разработка адаптивных к изменениям характеристик канала передачи данных каскадных сигнально-кодовых конструкций.
2. Повышение эффективности кодов Галлагера.
3. Разработка комбинированных кодов с применением в их составе полярных кодов.

Публикации по теме диссертационного исследования

Работы, опубликованные в изданиях из Перечня ВАК

1. Сидоренко А.А. Использование арифметики полей Галуа при построении кодов Рида-Соломона / Проектирование и технология электронных средств. – 2011, – № 3. – С. 13–17.
2. Альшрайдех А.М., Гомес Ж.Л., Самойлов С.А., Сидоренко А.А. Исследование «мягкого» декодирования кода Рида-Соломона / Проектирование и технология электронных средств, 2014. – № 1. – С. 8–11.
3. Самойлов А.Г., Сидоренко А.А. Применения кодов РС в каскаде с двоичными кодами с целью повышения эффективности борьбы с независимыми ошибками / Проектирование и технология электронных средств, 2014. – № 3. – С. 2–7.
4. Сидоренко А.А. Энергетический выигрыш от применения помехоустойчивого кодирования / Проектирование и технология электронных средств. – 2016, – № 4. – С. 8–14.
5. Сидоренко А.А. Механизм исправления множественных ошибок при декодировании сверточного кода / Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2018, – № 2. С. 53–59.
6. Сидоренко А.А. Эффективность применения блочных и сверточных кодов для кодирования коротких информационных сообщений / Проектирование и технология электронных средств. – 2017, – № 4. – С. 31–36.
7. Сидоренко А.А. Разработка программной эмуляция мягкого решения на выходе детектора, для сравнительного исследования эффективности декодеров,

работающих с мягким и жестким решением детектора / Проектирование и технология электронных средств. – 2018, – № 3. – С. 44–49.

8. Сидоренко А.А. Сравнение эффективности декодирования мягкого и жесткого решения детектора на примере сверточного кода / Проектирование и технология электронных средств. – 2018, – № 2. – С. 51–56.

9. Сидоренко А.А. Исследование механизма декодирования перфорированных сверточных кодов / Проектирование и технология электронных средств. – 2019, – № 4. – С. 42–46.

10. Сидоренко А.А. Исследование эффективности декодирования мягких и жестких решений детектора в перфорированных сверточных кодах / Проектирование и технология электронных средств. – 2021, – № 3. – С. 31–36.

11. Сидоренко А.А. Декодирование турбокода, созданного на основе блочного кода, с использованием синдромной решетки / Проектирование и технология электронных средств, 2022. – № 4. – С. 46–52.

12. Сидоренко А.А. Сравнение эффективности декодирования турбокодов, созданных на основе сверточных и блочных кодов / Проектирование и технология электронных средств, 2023, – № 1. – С. 3–9.

13. Сидоренко А.А. Оценка эффективности турбокода, построенного на основе блочного кода, при декодировании в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности / Системы управления, связи и безопасности, 2023. – № 3. – С. 29–43.

14. Сидоренко А.А. Исследование эффективности декодирования блочного и сверточного кода с использованием декодера турбокода / Проектирование и технология электронных средств, 2023, – № 4. – С. 44–49.

15. Сидоренко А.А. Метод изменения избыточности последовательного каскадного кода, построенного на основе внешнего блочного кода / Информационно-измерительные и управляющие системы, 2024. – № 2. – С. 31–36.

16. Сидоренко А.А. Построение комбинированного кода на основе турбокода с дополнительным кодированием бит / Научные исследования в космических исследованиях Земли, 2024. – № 1. – С. 53–58.

Работы в трудах, индексируемых Scopus и Web of Science

17. Sidorenko A.A. Overview of the III International Conference on Advanced Technologies in Materials Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering-III – 2021 // AIP Conf. Proc. 2021. Vol. 2402 (1). P. 050038(1-7). doi:10.1063/5.0071456.

18. Sidorenko A.A. Overview of the International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH – 2019 // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1399(1). P. 033011(1-8). doi:10.1088/1742-6596/1399/3/033011.

19. Sidorenko A.A. Overview of the International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH III 2021//Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2094(1). P. 032061(1-9) doi:10.1088/1742-6596/2094/3/032061.

20. Sidorenko A.A. Overview of the International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering – APITECH-IV-2022 // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2388(1). P. 012029 (1-7). doi:10.1088/1742-6596/2388/1/012029.

21. Sidorenko A.A. Overview of the International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-IV-2022 // Journal of Physics: Conference Series. 2022. Vol. 2388(1). P. 012032 (1-9). doi:10.1088/1742-6596/2388/1/012032.

22. Sidorenko A.A. Overview of the International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-V-2023 // Journal of Physics: Conference Series. 2024. Vol. 2697(1). P. 012038 (1-7). doi:10.1088/1742-6596/2697/1/012038.

22. Sidorenko A.A. Overview of the International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering - APITECH-V-2023 // Journal of Physics: Conference Series. 2024. Vol. 2697(1). P. 012039 (1-7). doi:10.1088/1742-6596/2697/1/012039.

Прочие публикации:

24. Сидоренко А.А. Кодек для систем телеметрии, работающих в условиях сложной помеховой обстановки // Материалы XV Всероссийской научной конференции студентов-радиофизиков. – СПб., 2011. – С. 108–112.

25. Сидоренко А.А. Применение помехоустойчивого кодирования с исправлением ошибок при передаче цифровых сигналов // Материалы вторых Всероссийских Армандовских чтений. Сб. тезисов докладов научно-практического семинара. – Муром, 2012. – С. 36–37.

26. Сидоренко А.А. Построение кодов, исправляющих ошибки с использованием арифметики полей Галуа // II международная заочная научно-техническая конференция «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2012)». – Тольятти, 2012. – Ч. 3. – С. 230–236.

27. Сидоренко А.А. Адаптивное помехоустойчивое кодирование // Материалы X международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». – Владимир-Суздаль, 2013. – Т. 1. – С. 152–154.

28. Сидоренко А.А. Построение универсального алгоритма Берлекемпа-Месси для кодов Боуза-Чоудхури-Хоквенгема // Материалы X международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». – Владимир-Суздаль, 2013. – Т. 1. – С. 155–157.

29. Сидоренко А.А. Анализ эффективности кодов Рида-Соломона в борьбе с независимыми ошибками и пакетами ошибок // 21 Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика-2014». – М., 2014. – С. 196.

30. Сидоренко А.А. Исправление множественных ошибок декодером сверточного кода // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 12-ой международной научно – технической конференции. Том 1. – Владимир: ВлГУ. – 2017. – С. 156–159.

31. Сидоренко А.А. Адаптивные возможности блочных и сверточных кодов // Перспективные технологии в средствах передачи информации:

Материалы 13-ой международной научно – технической конференции. Том 2. – Владимир : ВлГУ. – 2019. – С. 22–26.

32. Сидоренко А.А. Мягкое декодирование блочных кодов с использованием синдромной решетки // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 14-ой международной научно – технической конференции. – Владимир : ВлГУ. – 2021. – С. 184–187.

Результаты интеллектуальной деятельности

33. Сидоренко А.А. Программный тренажер исследования эффективности турбокода, построенного на основе кода Хемминга // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2023614197. 2023.

34. Сидоренко А.А. Программный тренажер исследования эффективности турбокода с изменяемыми коэффициентами значимости декодируемых символов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023619022. 2023.

35. Сидоренко А.А. Программный тренажер исследования эффективности упрощенного турбокода, построенного на основе кода Хемминга при повторной передаче информационных бит // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2023664344. 2023.

36. Сидоренко А.А. Программный тренажер исследования эффективности каскадного кодирования при применении внешнего кода Рида-Соломона // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668233. 2023.

37. Сидоренко А.А. Программный тренажер исследования эффективности последовательного каскадного кода, построенного на основе внешнего сверточного кода, при избирательном кодировании внутренним кодом // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2023682349. 2023.

38. Сидоренко А.А. Программный комплекс исследования эффективности комбинированного кода, построенного на основе сверточного кода при

повторной передаче информационных бит и декодировании декодером турбокода // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611219. 2024.

39. Сидоренко А.А. Программный имитатор функционирования кодера-декодера последовательного каскадного кода на основе внешнего кода Хемминга, при избирательном кодировании внутренним кодом // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2024612359. 2024.

Подписано в печать

Формат бумаги 60×84 1/16. Усл. печ. л. 2,0. Тираж 100 экз.

Заказ №

Издательство Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.
600000, Владимир, ул. Горького, 87.