

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева»

д.ф.-м.н., профессор



А.А. Куркин

« 15 » марта 2024 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» на диссертацию и автореферат диссертации Сидоренко Александра Анатольевича на тему «Повышение эффективности комбинированных помехоустойчивых кодов», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Диссертационная работа Сидоренко А. А. состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений со свидетельствами о государственной регистрации разработанных программ и актами внедрения результатов работы. В первой главе рассмотрены возможные подходы к повышению эффективности помехоустойчивых кодов и обоснована необходимость адаптивного кодирования, учитывающего состояние канала передачи сообщений, а следующие четыре главы посвящены разработке и исследованию новых методов повышения эффективности последовательных каскадных кодов и турбокодов.

Актуальность темы работы. Парадигмой современных цифровых систем связи является рост достоверности передачи информации, поэтому увеличение эффективности таких систем напрямую связано с уменьшением вероятности ошибок при приеме информации. Энергетический и частотный ресурс систем передачи информации всегда ограничен и чем сложнее помеховая обстановка в канале передачи информации, тем труднее обеспечить приемлемое качество информационного обмена. Важность и необходимость достоверной передачи информации трудно переоценить, однако бурное освоение радиочастотного спектра, наблюдаемое в последние десятилетия, значительно усложнило помеховую обстановку и радиоканалы с вероятностью ошибочного приема 10^{-2} - 10^{-3} стали не редкостью, особенно на участках спектра, используемых для военной связи и телекоммуникаций.

Проблема повышения достоверности передачи информации по каналам с

помехами решается путем использования помехоустойчивого кодирования передаваемых сигналов, но известные помехоустойчивые коды имеют ограниченные возможности. Поэтому большинство цифровых систем связи используют каскадное кодирование, объединяющее возможности нескольких помехоустойчивых кодов, однако и комбинированное кодирование не всегда обеспечивает достоверную передачу информации.

Диссертационная работа Сидоренко А. А. направлена на решение важной научно-практической проблемы повышения эффективности комбинированных помехоустойчивых кодов путем синтеза новых методов кодирования и декодирования комбинированных кодов, обеспечивающих повышение эффективности систем связи, то есть снижение вероятности ошибочного приема без увеличения энергетических затрат. Каскадное кодирование применяется в большинстве цифровых информационных технологий, поэтому тема и цель диссертационного исследования, направленные на решение проблемы повышения эффективности комбинированных кодов, имеют высокую значимость и актуальны в научном и в практическом аспектах.

Научная ценность выполненной работы. Решение проблемы повышения достоверности передачи информации по каналам со сложной помеховой обстановкой в диссертационной работе предлагается путем создания новых и более результативных методов комбинированного кодирования и декодирования каскадных кодов, позволяющих повысить эффективность комбинированных кодов и систем связи в целом. Для этого автором для решения проблемы повышения достоверности передачи информации предложены, теоретически научно обоснованы и экспериментально исследованы новые методы:

- метод последовательного кодирования при избирательном кодировании кодовых бит внутренним кодом, обеспечивающий повышение эффективности кодирования путем гибкой адаптации корректирующей способности кода, что позволяет увеличить скорость передачи данных до 48 %;

- метод декодирования турбокода, построенного на основе систематического сверточного кода, который позволяет без усложнения алгоритма мягкого декодирования снижать вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении до 2-х порядков;

- метод комбинированного кодирования, путем повторной передачи информационных бит кодового слова с декодированием в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности, позволяющий адаптировать характеристики кода к ухудшению состояния канала передачи данных и снизить вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении в десятки раз;

- метод декодирования в соответствии с критерием максимума апостериорной вероятности, путем применения понижающих коэффициентов к значениям символов, достоверность которых оказывает большее влияние на результат декодирования, что, например, для комбинированного кода, полученного из

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

- метод комбинированного кодирования на основе турбокода с дополнительным выборочным кодированием информационных бит, снижающий вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении в 212 раза при дополнительном кодировании трех бит кодового слова, обеспечивая энергетический выигрыш от 0,28 дБ – при дополнительном кодировании одного бита, 0,78 дБ – двух бит, 0,8 дБ – трех бит;

- метод декодирования по максимуму правдоподобия путем применения к значениям декодируемых бит коэффициентов, пропорциональных их достоверности, что снизило вероятность битовой ошибки в декодированном информационном сообщении в 920 раз, а при декодировании по максимуму апостериорной вероятности с $4,0 \cdot 10^{-9}$ по $7,6 \cdot 10^{-10}$ (при вероятности битовой ошибки в канале передачи данных $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$).

Автором выведены формулы для расчета вероятности битовой ошибки при декодировании согласно максимума апостериорной вероятности для турбокодов на основе систематического сверточного кода и на основе блочного кода Хемминга, а также разработаны программные имитаторы, моделирующие работу предложенных новых кодеков при прохождении сигналов через каналы с аддитивным белым гауссовским шумом.

Практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в том, что предложенные новые методы комбинированного помехоустойчивого кодирования, позволяют даже в каналах передачи информации с вероятностью битовой ошибки хуже чем $p_B = 1 \cdot 10^{-3}$ адаптивно к изменению свойств канала снижать вероятность ошибки. Также предложенные методы кодирования и декодирования позволяют, задаваясь необходимой вероятностью ошибки при работе системы связи, снизить энергетические затраты при передаче информации. Практическая значимость и полезность результатов исследования подтверждается их внедрением на промышленных предприятиях информационных технологий в городах Краснодар, Санкт-Петербург, Москва, Ставрополь и в учебном процессе Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.

Обоснованность и достоверность полученных результатов, научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обусловлена корректным применением теории информации, теории помехоустойчивого кодирования, теории вероятности и математической статистики, а также апробацией основных результатов на многочисленных научно-практических конференциях международного уровня. Достоверность полученных научных результатов подтверждена автором экспериментально с помощью созданных

им программных имитаторов каналов передачи информации, а также подтверждается полученными данными при внедрении предложенных методов на четырех промышленных предприятиях, работающих на рынке информационных технологий.

Основные результаты работы опубликованы в 39 научных статьях, в том числе 16 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертаций на соискание ученой степени доктора наук по специальности 2.2.15, в 7 работах, включенные в международные реферативные базы данных, 9 в материалах докладов международных конференций. По результатам проведенного научного исследования получено 7 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ, реализующих предложенные методы.

Следует положительно отметить, что из 39 работ по теме диссертации 37 научных публикаций выполнены без соавторства, что говорит о высокой самостоятельности при выполнении научно-квалификационной работы и практически 100- процентном личном участии в выполнении работы.

Автореферат в полной мере отражает суть диссертационного исследования и полностью согласован с самой диссертацией.

Рекомендации по использованию результатов и выводов, приведенных в диссертации:

1. Предложенные и подтвержденные экспериментальными результатами методы решения проблемы повышение эффективности комбинированных помехоустойчивых кодов, рекомендуется использовать на разрабатывающих и производящих цифровые системы предприятиях телекоммуникационной отрасли страны.

2. Для средств связи низового звена, работающих в сложной помеховой обстановке, рекомендуется использовать предложенные методы адаптивного кодирования в целях снижения вероятности ошибочного приема информационных сообщений.

3. Для телекоммуникационных систем, предназначенных для малогабаритных летно-подъемных средств, работающих в сложной помеховой обстановке, рекомендуется использовать предложенные методы, задаваясь допустимой вероятностью ошибок при приеме информации, в целях повышения энергетической эффективности используемых приемо-передающих средств.

Замечания по диссертационной работе:

1. Одними из помехоустойчивых кодов, приблизившихся к пределу Шеннона, являются LDPC-коды. В настоящее время эти коды достаточно широко распространены, однако в рассмотренной работе не исследуются.

2. В работе рассматривались алгоритмы декодирования турбокода только SOVA и MAP. Не ясно, проводилось ли исследование с применением распространенных алгоритмов Log-MAP, Max-Log-MAP.

3. В пятой главе не дано пояснение существенной разнице в результатах исследования для случаев реализации комбинированного кода на основе сверточного кода и блочного кода при применении декодера турбокода.

Выводы. Обобщая научную и практическую значимость выполненной работы можно считать, что полученные автором результаты являются значимым вкладом в развитие средств связи и телекоммуникационной отрасли науки. Диссертация соответствует специальности 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций и удовлетворяет пунктам паспорта специальности: 1, 2, 3, 15 и требованиям пунктов 9, 10, 11, 13 и 14 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением Правительства РФ № 842.

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных автором исследований, разработаны теоретические положения и технические решения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, а Сидоренко Александр Анатольевич достоин присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры "Электроника и сети ЭВМ" Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева». Протокол № 2 от 6 марта 2024 г.

Отзыв составил:

Бабанов Николай Юрьевич,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электроника и сети ЭВМ»
ФГБОУ ВО «НГТУ им. Р.Е. Алексеева»
6039155, РФ, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24
Тел.: 8(831) 436 8382
E-mail: esvm@nntu.ru.



13.03.24

Н.Ю. Бабанов

Подпись Бабанова Н.Ю. заверяю,
Ученый секретарь ученого совета
НГТУ им. Р.Е. Алексеева



И.Н. Мерзляков