

На правах рукописи



Сидоренко Александр Анатольевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОГО
ПОМЕХОУСТОЙЧИВОГО КОДЕРА-ДЕКОДЕРА
ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМ ТЕЛЕМЕТРИИ**

Специальность: 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Владимир – 2015

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

Научный руководитель: **Самойлов Александр Георгиевич**
д.т.н., профессор, декан факультета радиофизики, электроники и медицинской техники ВлГУ

Официальные оппоненты: **Кошелев Виталий Иванович**
д.т.н., профессор, заведующий кафедрой радиотехнических систем в Рязанском государственном радиотехническом университете, г. Рязань

Зеленов Дмитрий Юрьевич
к.т.н., главный конструктор ОАО «Владимирское конструкторское бюро радиосвязи», г. Владимир

Ведущая организация: Закрытое акционерное общество «Конструкторское опытное бюро радиоаппаратуры» - ЗАО «КОБРА», г. Владимир

Защита диссертации состоится « 27 » мая 2015 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д212.025.04 при ФГБОУ ВПО 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 <http://www.vlsu.ru>.

Автореферат разослан «23» марта 2015 года.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.т.н., профессор



А.Г. Самойлов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сегодня в мире постоянно растут объемы информации во всех отраслях деятельности. Системы телеметрии обеспечивают получение, преобразование, передачу по каналу связи, прием, обработку и регистрацию измерительной информации и информации о событиях с целью контроля на расстоянии состояния и функционирования контролируемых объектов.

Далеко не всегда есть возможность связать диспетчерский центр (ДЦ) с контролируемым объектом (КО) кабельным каналом, кроме того, обычно это требует значительных финансовых затрат. Актуальной задачей является организация надёжного цифрового радиоканала передачи данных.

Радиоканал связи ДЦ и КО является слабым звеном систем телеметрии, поскольку именно в нём передаваемые сигналы подвержены искажениям и затуханию из-за негативного воздействия многочисленных факторов. Помехи и замирания снижают достоверность передачи информации. Повышение достоверности, передаваемой по каналу связи информации можно организовать различными способами, например увеличением мощности передатчика, улучшением чувствительности приемника, увеличением усиления антенн. Реализация приведенных способов обычно требует значительных материальных затрат, а главное, не обеспечивает повышение достоверности передаваемой информации при частотно-селективных замираниях.

В настоящее время задача обеспечения достоверности передачи информации всё чаще решается применением помехоустойчивого кодирования, которое представляет собой класс преобразований сигнала, выполняемых для повышения качества связи. Работы таких ученых как Фано Р.М., Форни Г.Д., Омура Д.К., Витерби А.Д., Берлекэмп Э.Р., Хемминг Р.У., Боуз Р.Ч., Рей-Чоудхури Д.К., Хоквингем А.М., Голей М.Д., Рид И.С., Соломон Г.М., Нордстром К.А., Робинсон Д.М., Зубарев Ю.Б., Золотарев В.В., Овечкин Г.В. и многих других сформировали и развили теорию помехоустойчивого кодирования. Однако проблема выбора вида кодирования для конкретного канала передачи информации пока не решена.

В процессе кодирования происходит преобразование последовательности данных в новую, «улучшенную последовательность», имеющую избы-

точные символы. Избыточные разряды служат для определения и исправления ошибок. Применение каскадного кодирования, при котором кодирование осуществляется в два уровня (внешним и внутренним кодом) ещё больше улучшает достоверность передачи информации. Количество избыточных битов (степень кодирования) логично варьировать в зависимости от числа ошибок в канале, то есть использовать адаптивное кодирование.

Объектом исследований являются локальные системы телеметрии (ЛСТ) в радиоканалах связи которых возникают ошибки.

Предметом исследований является повышение достоверности передачи данных в радиоканалах ЛСТ.

Целью работы является разработка адаптивного каскадного кодера-декодера с исправлением ошибок для повышения достоверности передачи сообщений нерегулярной длины по цифровым радиоканалам связи ЛСТ.

Поставленная цель достигается решением следующих задач:

1. Анализ методов помехоустойчивого кодирования-декодирования с последующим выбором вида кодирования.
2. Синтез алгоритмов кодирования-декодирования и разработка соответствующего программного обеспечения.
3. Проведение теоретических и экспериментальных исследований эффективности кодера-декодера при наличии в канале связи независимых ошибок и пакетов ошибок.
4. Разработка рекомендаций по применению разработанного кодера-декодера в системах передачи данных различных ЛСТ.
5. Разработка универсального программно-аппаратного комплекса, осуществляющего передачу данных между ЭВМ контролируемых объектов и ЭВМ диспетчерского центра с использованием радиомодемов.
6. Практические исследования эффективности работы программного кодера-декодера в разработанном программно-аппаратном комплексе.

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

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке новых методов, алгоритмов и устройств, повышающих помехоустойчивость

ЛСТ. В диссертационной работе получены следующие основные результаты, содержащие элементы научной новизны:

1. Предложен метод адаптивного каскадного кодирования-декодирования нерегулярных по длине информационных сообщений. Разработаны соответствующие алгоритмы и программное обеспечение.

2. Получены аналитические выражения и проведены практические исследования разработанного кодера-декодера.

3. Даны рекомендации по применению разработанного кодера-декодера для применения в различных системах телеметрии.

4. Разработан универсальный программно-аппаратный комплекс для ЛСТ, осуществляющий передачу данных между ЭВМ контролируемых объектов и ЭВМ диспетчерского центра с применением радиомодемов, использующий в своей работе адаптивный программный кодер-декодер.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработанный кодек с исправлением ошибок (в зависимости от выбранной конфигурации) обеспечивает исправление пакетов ошибок длиной до 93 бит.

2. Применение разработанного программного кодера-декодера снижает вероятность появления ошибочного бита с $1 \cdot 10^{-2}$ до $7,2 \cdot 10^{-9}$, что соответствует выигрышу в величине E_b/N_0 на 2,5 дБ.

3. Разработанный программный кодер-декодер может применяться в разнообразных системах телеметрии и ретрансляции сообщений.

Достоверность и обоснованность результатов обусловлена корректным применением теории информации, теории помехоустойчивого кодирования сигналов, теории вероятности и математической статистики, а также подтверждением теоретических результатов экспериментальными данными.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Алгоритмы и программы преобразования и кодирования цифровых данных.
2. Адаптивный каскадный кодер-декодер с исправлением ошибок для повышения достоверности передачи нерегулярных по длине сообщений по цифровым радиоканалам связи, содержащим одиночные ошибки и пакеты ошибок.

3. Аналитические выражения для оценки вероятности ошибок на выходе разработанного декодера.
4. Результаты исследования разработанного кодера-декодера.
5. Разработанный универсальный программно-аппаратный комплекс для ЛСТ, осуществляющий передачу данных между ЭВМ контролируемых объектов и ЭВМ диспетчерского центра с применением радиомодемов, использующий в своей работе адаптивный программный кодер-декодер.

Апробация работы, публикации

Основные результаты диссертационного исследования докладывались на 7 научно-технических конференциях различного уровня и опубликованы в 13 публикациях, в том числе в 3-х статьях, включенных ВАК в перечень журналов для диссертационных работ.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы внедрены и нашли практическое применение в организациях: ООО «Миробэк», г. Москва; ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых». Все результаты внедрения подтверждены соответствующими актами.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из четырех глав, введения, заключения, списка литературы и десяти приложений и изложена на 160 стр. В списке литературы 90 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе описаны объекты и задачи телеметрии. Как правило, системы телеметрии создаются с целью решения двух следующих задач: централизованный оперативный контроль с диспетчерского центра (ДЦ) над процессами, происходящими на контролируемых объектах (КО), и управление этими процессами.

Под КО понимаются производственные, исследовательские, лабораторные, биологические и другие объекты, для которых необходимо производить удалённые измерения и сбор информации для предоставления оператору или

пользователю. В некоторых случаях система телеметрии полностью окупает себя, если с её помощью была предотвращена всего одна авария.

По числу КО системы телеметрии разделяются на глобальные (сотни и тысячи объектов) и локальные (единицы и десятки объектов). Глобальные системы часто бывают многоуровневыми.

В качестве среды передачи данных используются как беспроводные (радио, GSM/GPRS, ZigBee, WiFi, WiMax, LTE), так и проводные (телефонные, ISDN, xDSL, компьютерные) сети (электрические или оптические). Организация проводных сетей требует, как правило, значительных финансовых затрат.

Недостатком применения GSM-модемов для передачи данных между ДЦ и КО является оплата использования канала, и безусловная зависимость от оператора сотовой связи. Система перестает работать в случае выхода из строя ближайшей базовой станции и отсутствии достаточного уровня сигнала от других станций. Использование «обычных» (не GSM) радиомодемов не имеет указанных недостатков.

Источником помех в идеальном канале является тепловой шум, генерируемый в приемнике. Дополнительными источниками потерь в реальном радиоканале являются замирания, естественные и искусственные источники шума и помех, негативное влияние которых часто оказывается более значительным, чем тепловой шум приемника.

В первой главе так же описаны топологические структуры ЛСТ: радиальная, магистральная, цепочечная. Описаны варианты организации множественного доступа: частотное разделение, временное разделение, кодовое разделение, пространственное разделение, поляризационное разделение. Приведены варианты информационного обмена.

Проведен выбор варианта организации передачи данных на базе персональной ЭВМ с подключенным радиомодемом.

Во второй главе рассмотрены различные варианты повышения помехозащищенности ЛСТ. Применение кодирования с исправлением ошибок позволяет при тех же значениях энергии бита (излучаемой мощности) получить более высокую достоверность передачи данных.

Рассмотрены свойства различных методов помехоустойчивого кодирования. Произведены теоретические исследования эффективности кодов.

Проведены исследования кода Хэмминга с параметрами: число кодовых бит $n=7$, число информационных бит $k=4$, число гарантировано исправляемых ошибок $t=1$.

Используя положения теории вероятности, найдено, что вероятность ошибки декодирования одного слова Хэмминга (P_x) равна:

$$P_x = 18p^3 (1 - p)^5 \quad (1)$$

При $p=10^{-2}$: $P_x = 1,7 \cdot 10^{-3}$ и $P_{x1000} = 4,3 \cdot 10^{-1}$.

При $p=10^{-3}$: $P_x = 1,8 \cdot 10^{-5}$ и $P_{x1000} = 4,5 \cdot 10^{-3}$.

При $p=10^{-4}$: $P_x = 1,8 \cdot 10^{-7}$ и $P_{x1000} = 4,5 \cdot 10^{-5}$.

При $p=10^{-5}$: $P_x = 1,8 \cdot 10^{-9}$ и $P_{x1000} = 4,5 \cdot 10^{-7}$.

Для проведения сравнения эффективности кодов найдена вероятность ошибки декодирования информационного сообщения длиной 1000 бит закодированного кодом Хэмминга (P_{x1000}).

Проведены исследования кода Голя с параметрами: $n=23$, $k=12$, $t=3$.

Используя положения теории вероятности, находим, что вероятность ошибки декодирования одного слова Голя равна:

$$P_G = 8525p^4 (1 - p)^{19} \quad (2)$$

При $p=10^{-2}$: $P_G = 7,0 \cdot 10^{-5}$ и $P_{G1000} = 5,8 \cdot 10^{-3}$.

При $p=10^{-3}$: $P_G = 8,4 \cdot 10^{-9}$ и $P_{G1000} = 6,9 \cdot 10^{-7}$.

При $p=10^{-4}$: $P_G = 8,5 \cdot 10^{-13}$ и $P_{G1000} = 7,1 \cdot 10^{-11}$.

При $p=10^{-5}$: $P_G = 8,5 \cdot 10^{-17}$ и $P_{G1000} = 7,1 \cdot 10^{-15}$.

Проведены исследования двоичного кода БЧХ с параметрами: $n=15$, $k=7$, $t=2$. Используя положения теории вероятности, найдено, что вероятность ошибки декодирования одного слова БЧХ равна:

$$P_{БЧХ} = 406 p^3 (1 - p)^{12} \quad (3)$$

При $p=10^{-2}$: $P_{БЧХ} = 3,6 \cdot 10^{-4}$ и $P_{БЧХ1000} = 5,2 \cdot 10^{-2}$.

При $p=10^{-3}$: $P_{БЧХ} = 4 \cdot 10^{-7}$ и $P_{БЧХ1000} = 5,7 \cdot 10^{-5}$.

При $p=10^{-4}$: $P_{БЧХ} = 4 \cdot 10^{-10}$ и $P_{БЧХ1000} = 5,7 \cdot 10^{-8}$.

При $p=10^{-5}$: $P_{БЧХ} = 4 \cdot 10^{-13}$ и $P_{БЧХ1000} = 5,7 \cdot 10^{-11}$.

Проведены исследования недвоичного кода БЧХ (кода РС) с параметрами: $n=9$, $k=5$, $t=2$, имеющего размер символа 1 байт. Структурная схема кодового слова изображена на рисунке 1.

1 байт	2 байт	3 байт	4 байт	5 байт	6 байт	7 байт	8 байт	9 байт
Проверочные символы				Информационные символы				

Рисунок 1 – Структурная схема кодового слова РС

Используя положения теории вероятности, найдено, что вероятность ошибки декодирования одного слова РС равна:

$$P_{PC} = 80q^3 (1 - q)^6, \quad (4)$$

где q – вероятность наличия в 1 байте 1 ошибочного бита, вычисляемая по формуле Бернулли:

$$q = P_8(1) = C_8^1 p(1 - p)^{8-1} = \frac{8!}{1!7!} p(1 - p)^7 = 8p(1 - p)^7 \quad (5)$$

При $p=10^{-2}$: $q=7,4 \cdot 10^{-2}$; $P_{PC} = 2,0 \cdot 10^{-2}$; $P_{PC1000} = 5,0 \cdot 10^{-1}$.

При $p=10^{-3}$: $q=7,9 \cdot 10^{-3}$; $P_{PC} = 3,8 \cdot 10^{-5}$; $P_{PC1000} = 9,5 \cdot 10^{-4}$.

При $p=10^{-4}$: $q=8,0 \cdot 10^{-4}$; $P_{PC} = 4,1 \cdot 10^{-8}$; $P_{PC1000} = 1,0 \cdot 10^{-6}$.

При $p=10^{-5}$: $q=8,0 \cdot 10^{-5}$; $P_{PC} = 4,1 \cdot 10^{-11}$; $P_{PC1000} = 1,0 \cdot 10^{-9}$.

Рассматриваемый код РС может противостоять пакетам ошибок до 49 бит.

На рисунке 2 изображена зависимость вероятности ошибочного декодирования информационного сообщения длиной 1000 бит, закодированного с использованием рассмотренных кодов, от вероятности появления ошибочного бита в канале связи.

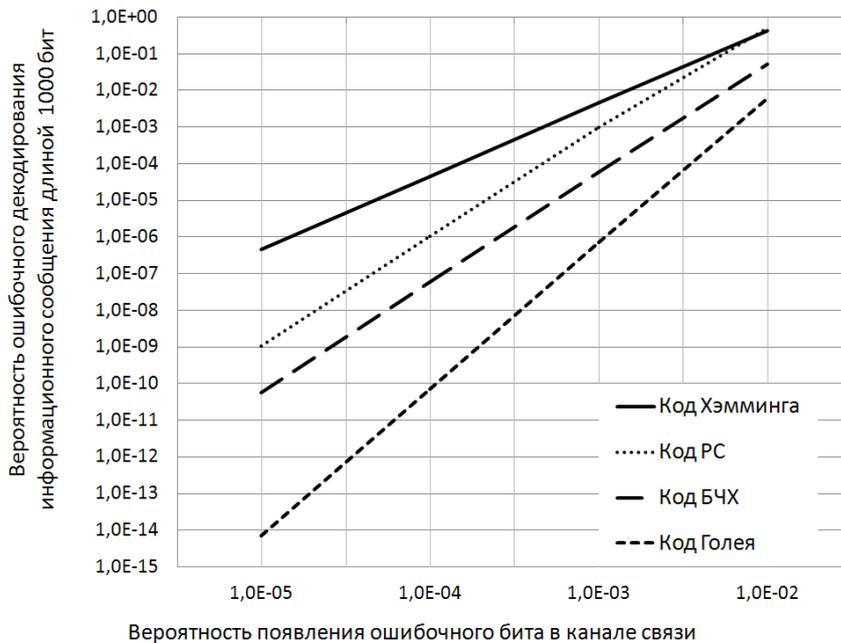


Рисунок 2 – Сравнение

эффективности кодов при наличии независимых ошибок в канале связи

В случае ЛСТ, использующей радиоканал для передачи данных, имеется высокая вероятность появления как независимых ошибок, так и пакетов ошибок. Применение простейших двоичных кодов типа кодов Хэмминга здесь не имеет смысла даже при переспросе сообщений, ведь повторная посылка с высокой долей вероятности будет также содержать ошибки. Такие коды вместо исправления ошибок будут вносить новые. Двоичные коды БЧХ и код Голя более успешно решают проблему возросшей вероятности появления независимых ошибок, однако и они не способны эффективно противостоять пакетам ошибок.

Решение задач борьбы с пакетами ошибок под силу недвоичным кодам РС. Код РС не искажается ошибками внутри m -битового символа. Коду РС все равно сколько бит повреждено в символе, - один или m . Однако код РС недостаточно эффективно борется с независимыми ошибками. Для большей эффективности предлагается использовать код РС в качестве внешнего кода в каскаде с внутренним двоичным кодом. Применение двоичного кода в каскаде целесообразно варьировать адекватно помеховой обстановке (числу ошибок, переспросов).

Рассмотренный код РС, одно кодовое слово которого состоит из 72 бит, удобно соединять в каскад как с кодом Хемминга, так и с кодом Голя. В первом случае минимальный кодовый элемент каскадного кода (МКЭ) образуется следующим образом: 40 информационных бит кодируются в одно кодовое слово РС, из которого в свою очередь образуется 18 информационных слов для кода Хемминга (смотри рисунок 3), что после кодирования образует 126 кодовых бит.

Во втором случае МКЭ образуется следующим образом: 40 информационных бит кодируются в одно кодовое слово РС, из которого образуется 6 информационных слов кодируемых кодом Голя (смотри рисунок 4). После кодирования образуется 138 кодовых бит.

При каскадном соединении кода РС и Хемминга вероятность ошибки декодирования слова РС также вычисляется по формуле 4, однако при этом q – вероятность наличия ошибки в 1 символе (байте) находится через P_X :

$$q = 2P_X - P_X^2 \quad (6)$$

Найдены значения вероятности ошибки декодирования слова РС при каскадном кодировании с кодом Хэмминга P_{PCX} :

При $p=10^{-2}$: $q=3,4 \cdot 10^{-3}$; $P_{PCX} = 3,1 \cdot 10^{-6}$; $P_{PCX1000} = 7,8 \cdot 10^{-5}$.

При $p=10^{-3}$: $q=3,6 \cdot 10^{-5}$; $P_{PCX} = 3,7 \cdot 10^{-12}$; $P_{PCX1000} = 9,3 \cdot 10^{-11}$.

При $p=10^{-4}$: $q=3,6 \cdot 10^{-7}$; $P_{PCX} = 3,7 \cdot 10^{-18}$; $P_{PCX1000} = 9,3 \cdot 10^{-17}$.

При $p=10^{-5}$: $q=3,6 \cdot 10^{-9}$; $P_{PCX} = 3,7 \cdot 10^{-24}$; $P_{PCX1000} = 9,3 \cdot 10^{-23}$.

9 символов (байт) кодового слова РС																	
1 байт		2 байт		3 байт		4 байт		5 байт		6 байт		7 байт		8 байт		9 байт	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
18 информационных слов кода Хемминга																	

Рисунок 3 – Одно кодовое слово РС соответствует 18 информационным словам Хемминга

9 символов (байт) кодового слова РС								
1 байт	2 байт	3 байт	4 байт	5 байт	6 байт	7 байт	8 байт	9 байт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
6 информационных слов кода Голя								

Рисунок 4 – Одно кодовое слово РС соответствует 6 информационным словам Голя

При каскадном соединении кода РС и Голя вероятность ошибки декодирования слова РС находится через P_{Γ} :

$$P_{PCG} \approx 15P_{\Gamma}^2(1 - P_{\Gamma})^4 \quad (7)$$

Найдены оценочные значения вероятности ошибки декодирования слова РС при каскадном кодировании с кодом Голя P_{PCG} :

При $p=10^{-2}$: $P_{\Gamma} = 7,0 \cdot 10^{-5}$; $P_{PCG} \approx 7,4 \cdot 10^{-8}$; $P_{PCG1000} = 1,8 \cdot 10^{-6}$.

При $p=10^{-3}$: $P_{\Gamma} = 8,4 \cdot 10^{-9}$; $P_{PCG} \approx 1,05 \cdot 10^{-15}$; $P_{PCG1000} = 2,6 \cdot 10^{-14}$.

При $p=10^{-4}$: $P_{\Gamma} = 8,5 \cdot 10^{-13}$; $P_{PCG} \approx 1,1 \cdot 10^{-22}$; $P_{PCG1000} = 2,7 \cdot 10^{-21}$.

При $p=10^{-5}$: $P_{\Gamma} = 8,5 \cdot 10^{-17}$; $P_{PCG} \approx 1,1 \cdot 10^{-29}$; $P_{PCG1000} = 2,7 \cdot 10^{-28}$.

В третьей главе проведена разработка программного обеспечения (ПО), осуществляющего помехоустойчивое кодирование и декодирование.

Разработано ПО кодирования кодом Хемминга с использованием порождающей матрицы для генерации кодовых слов. Разработано ПО декодирования последовательности кодовых слов, закодированных кодом Хемминга табличным методом.

Разработано ПО кодирования последовательности информационных бит кодом Голя с использованием для генерации кодовых слов метода полиномиального деления.

Разработано ПО декодирования последовательности кодовых слов закодированных кодом Голя при помощи реализации декодера Меггита.

Разработано ПО кодирования последовательности информационных бит двоичным кодом БЧХ с использованием для генерации кодовых слов метода полиномиального деления.

Разработано ПО декодирования последовательности кодовых слов закодированных кодом БЧХ с использованием проверочной матрицы для нахождения синдрома и проведением дальнейшего декодирования искаженного слова табличным методом. Одной из сложностей декодирования не двоичных кодов БЧХ кодов РС является то, что символы кодов берутся из конечного поля Галуа. Проведена разработка ПО формирующего элементы поля Галуа $GF(2^8)$ и элементы обратного поля. Поля Галуа имеют специальные правила проведения математических операций. Разработано ПО, осуществляющее операции сложения, умножения и деления элементов поля Галуа $GF(2^8)$.

Разработано ПО, осуществляющее методом полиномиального деления кодирование кодом РС.

Алгоритм декодирования кодов БЧХ в целом приведен на рисунке 5.

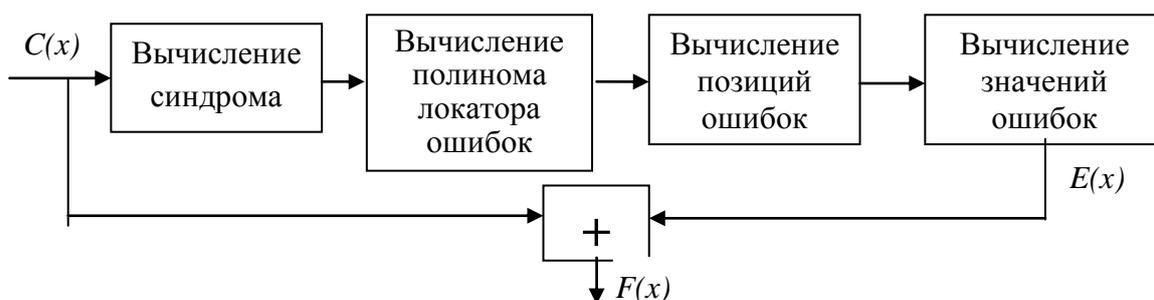


Рисунок 5 – Алгоритм декодирования кодов БЧХ

Разработано ПО осуществляющее декодирование последовательности кодовых слов закодированных кодом РС. В разработанном ПО для вычисления полинома локатора ошибок применяется алгоритм Берлекэмп-Мессис, для вычисления позиции ошибки – метод Ченя, для вычисления значения ошибки – алгоритм Форни.

Разработано ПО каскадного кодирования и декодирования. Программное обеспечение осуществляет:

- кодирование нерегулярных по длительности сообщений кодом РС, каскадом из внешнего кода РС и внутреннего кода Хэмминга (РС+Х), каскадом из внешнего кода РС и внутреннего кода Голя (РС+Г);
- включение и отключение перемежения символов кода РС;
- декодирование кодовой последовательности.

В начале программы задаются:

- число информационных байт;
- метод кодирования;
- флаг перемежения.

Если в программном продукте переставить местами кодер и декодер, то получится программа-ретранслятор принятого кодового сообщения. Дальность действия современных радиомодемов как правило не превышает 10-12 км, что делает программный ретранслятор востребованным в ЛСТ.

В четвертой главе приведены экспериментальные исследования разработанного каскадного кодера-декодера.

Для экспериментальных исследований программных кодеров-декодеров разработано ПО, осуществляющее генерацию массива информационных данных. Для проведения исследования работы декодера при наличии независимых ошибок разработано ПО, осуществляющее генерацию массива двоичных чисел с заданной вероятностью появления единичного бита. Поэлементное суммирование по модулю 2 сгенерированного массива с массивом информационных бит эквивалентно появлению в последнем независимых ошибок с заданной вероятностью.

Проведя слияние программ генерации информационных данных и ошибочные бит с программами кодирования-декодирования, получаем инстру-

мент для проведения экспериментальных исследований эффективности кодов при наличии независимых ошибок в принятом сообщении.

Результаты исследований эффективности работы кодов: РС, РС+Х, РС+Г при наличии в канале независимых ошибок отражены в таблице 1 и на рисунке 6. На рисунке 6 специальными символами обозначены практически полученные точки.

В таблице 1 использованы следующие обозначения: P_B – вероятность появления ошибочного бита при передаче закодированного сообщения, P_{PC} – вероятность появления ошибки при декодировании 1 слова РС рассчитанная ранее (в том числе и при каскадном кодировании), $P_{PCП}$ – практически полученная вероятность появления ошибки в 1 слове РС, P_{BD} – вероятность появления ошибочного бита в декодированном информационном сообщении, V_k – увеличение отношения E_b/N_0 в дБ связанное с добавлением избыточных проверочных бит при кодировании, V_0 – увеличение отношения E_b/N_0 (где E_b - энергии бита, а N_0 - спектральной плотности мощности шума) необходимое для снижения P_B до уровня P_{BD} без применения помехоустойчивого кодирования, VW – энергетический выигрыш от применения кодирования (разница V_0 и V_k). Значения V_k и V_0 найдены по графику зависимости E_b/N_0 от вероятности появления ошибочного бита в канале связи для модуляции типа 16QAM изображенным на рисунке 7. Для всех видов модуляции изображенных на графике значения V_k и V_0 отличаются незначительно.

Таблица 1 – Сравнение эффективности кодов при наличии независимых ошибок в канале связи

№	P_B	Метод кодир.	P_{PC}	$P_{PCП}$	P_{BD}	V_k , дБ	V_0 , дБ	VW , дБ
1.	10^{-2}	РС	0,02	0,022	$1,4 \cdot 10^{-3}$	2,5	2	-0,5
2.	10^{-3}	РС	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$4,5 \cdot 10^{-5}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	2,5	3,2	0,7
3.	10^{-2}	РС+Х	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-7}$	5	6,7	1,7
4.	10^{-2}	РС+Г	$7,4 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$	$7,2 \cdot 10^{-9}$	5,4	7,9	2,5

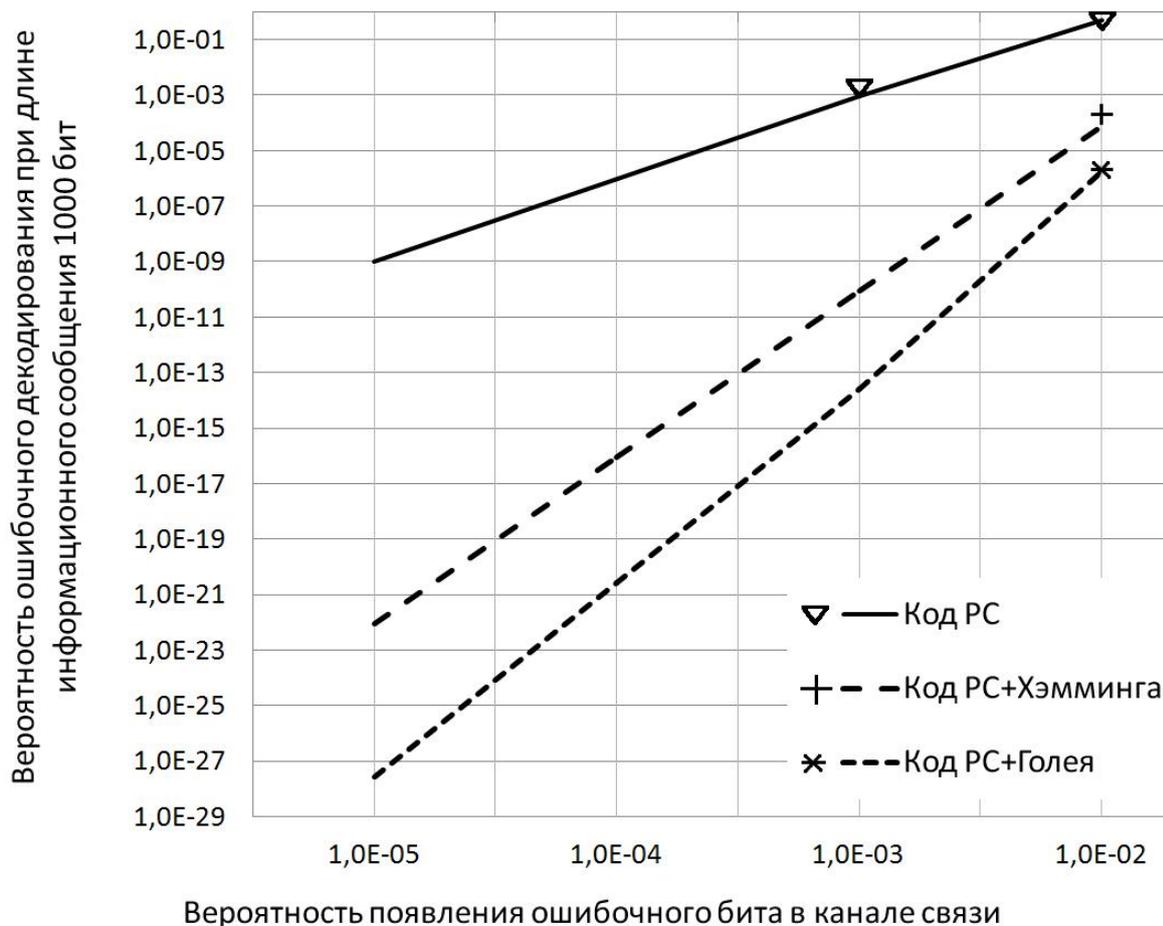


Рисунок 6 – Зависимость вероятности ошибочного декодирования сообщения от P_B при длине информационного сообщения 1000 бит

Для проведения исследования эффективности кодов при наличии в канале пакетов ошибок, разработано ПО, осуществляющее генерацию пакетов ошибок разной длины. Положение пакета ошибок сдвигается на 1 бит каждый такт исследований от начала до конца кодовой последовательности.

Исследована эффективность работы кодера-декодера РС при наличии в канале пакетов ошибок. При размере пакета ошибок менее 10 бит, декодер всегда проводит правильное декодирование. Правильное декодирование возможно с определенной вероятностью при размере пакета ошибок от 10 до 48 бит.

Исследована эффективность работы кодера-декодера РС+Х при наличии в канале пакетов ошибок. При размере пакета ошибок менее 18 бит, декодер всегда проводит правильное декодирование. Правильное декодирование возможно с определенной вероятностью при размере пакета ошибок от 18 до 86 бит.

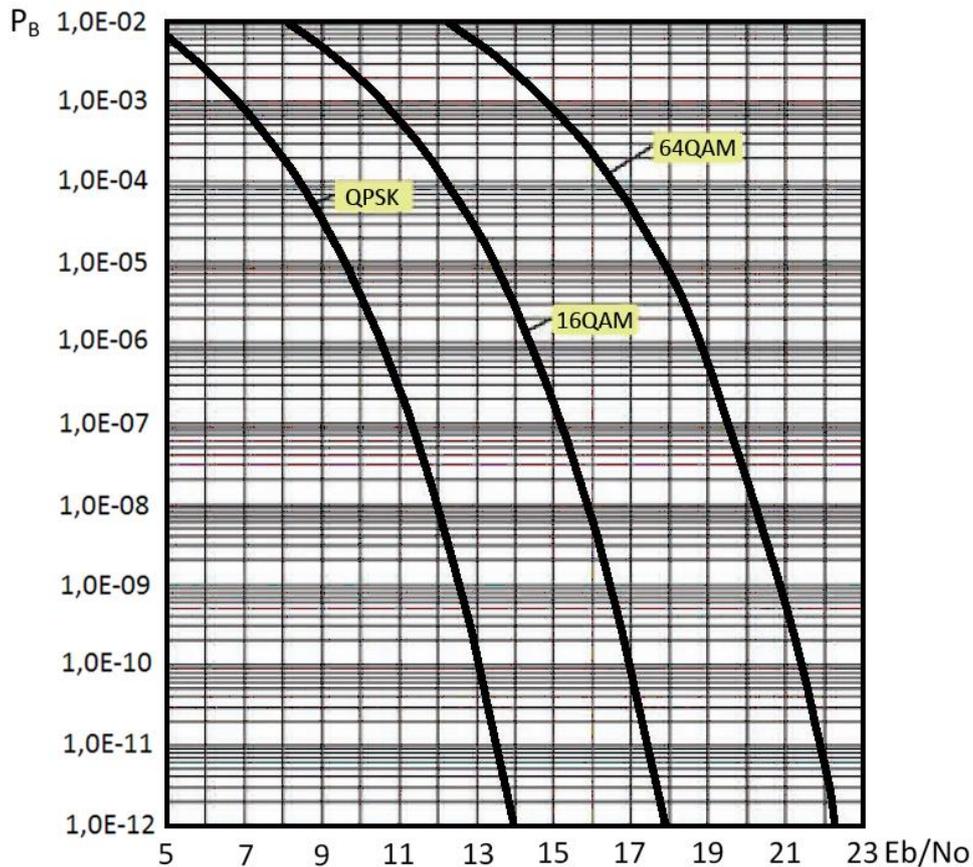


Рисунок 7 – Зависимость E_b/N_0 от вероятности появления ошибочного бита в канале связи для разных видов модуляции

Исследована эффективность работы кодера-декодера РС+Г при наличии в канале пакетов ошибок. При размере пакета ошибок менее 8 бит, декодер всегда проводит правильное декодирование. Правильное декодирование возможно с определенной вероятностью при размере пакета ошибок от 8 до 92 бит.

На рисунке 8 показаны сравнительные характеристики для разных методов кодирования-декодирования, возможных в разработанном ПО каскадного кодирования-декодирования.

Даны рекомендации по применению разработанного каскадного кодера-декодера в различных ЛСТ. Проведена разработка и построение универсального программно-аппаратного комплекса для ЛСТ, осуществляющего передачу данных между ЭВМ контролируемых объектов и ЭВМ диспетчерского центра с использованием радиомодемов. В комплексе применяется разработанный каскадный кодер-декодера.

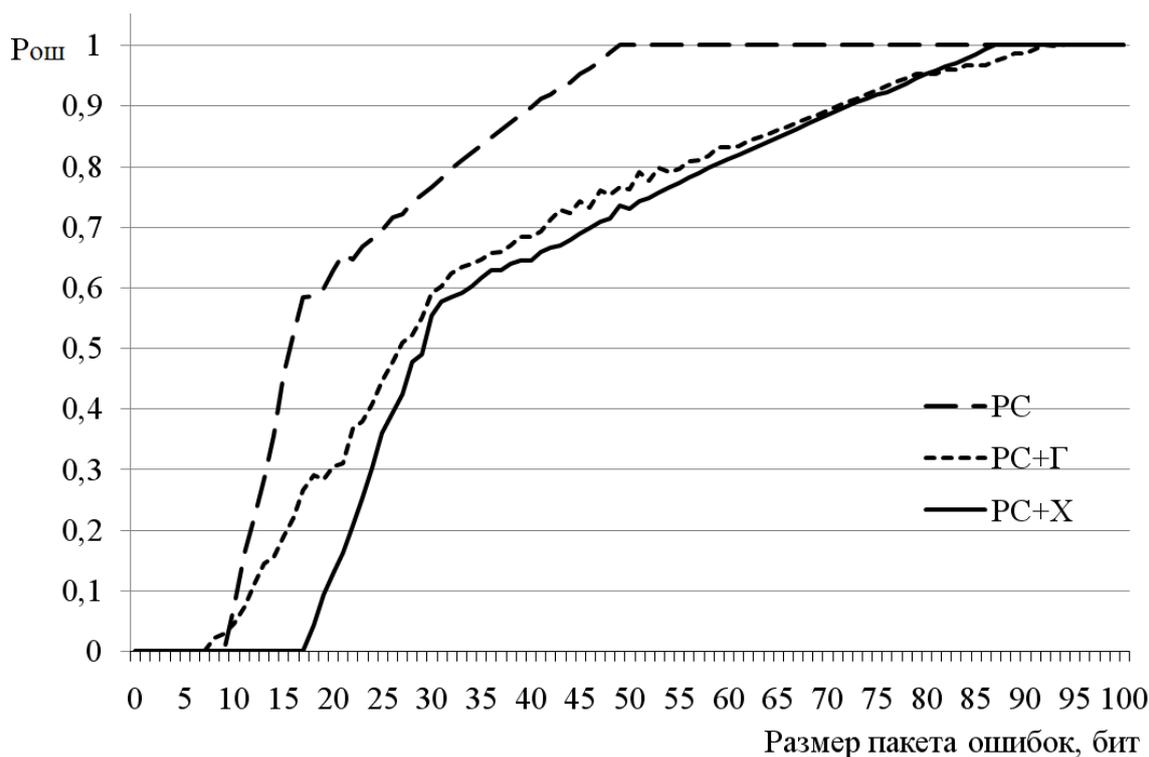


Рисунок 8 – Зависимость вероятности приема ошибочного сообщения от величины пакета ошибок

Работа комплекса происходит следующим образом. От ДЦ на КО приходит запрос, содержащий:

- код ДЦ – 5 бит;
- номер КО – 4 бита;
- разрешающий бит варианта кодирования – 1 бит;
- вариант кодирования – 2 бита;
- разрешающий бит флага переноса – 1 бит;
- флаг перемежения – 1 бит;
- разрешающий бит ретрансляции – 1 бит;
- флаг ретрансляции – 1 бит;
- информация о местоположении файла данных – 5 бит.

Разрешающие биты разрешают использовать информацию (1-2 бита), идущую следом за ними.

ПО КО формирует массив служебной информации. Служебные биты содержат всю информацию, необходимую ЭВМ ДЦ для проведения успешного декодирования:

- номер КО – 4 бит;

- вариант кодирования – 2 бита;
- флаг перемежения – 1 бит;
- флаг ретрансляции (устанавливается если сообщение предназначено для приема ретранслятором, который произведя успешное декодирование убирает флаг и кодирует сообщение повторно) – 1 бит;
- объем информационных данных – 12 бит;
- проверочный символ – 8 бит.

Вычисление проверочного символа проводится суммированием по модулю 2 побитно всех информационных байт.

Служебные биты и биты запроса данных кодируются кодом BCH ($n=15$, $k=7$, $t=2$) образуя четыре и три кодовых слова соответственно. Далее, для лучшей устойчивости к пакетам ошибок, проводится их перемежение.

Алгоритм обмена данными КО с ДЦ приведен на рисунке 9.

ПО, установленное на ЭВМ КО декодируя биты запроса передачи данных, направленные ДЦ, преобразует файл с информацией в массив данных, сохраняя в массиве информацию об имени и расширении файла (для его последующего восстановления). Полученный массив информационных бит кодируется. Вид кодирования определяется установками оператора, и рекомендациями, содержащимися в запросе передачи данных (из них выбирается наиболее сложный вариант кодирования). Закодированные биты служебной информации, предваряя массив закодированных данных, передаются модемом.

ПО, установленное на ЭВМ ДЦ, получает от модема закодированную служебную информацию и декодирует её. Далее считываются остальные биты принятой искаженной закодированной информации. Затем происходит формирование массива кодовых бит, его декодирование и вычисление проверочного символа. Найденный проверочный символ сравнивается с проверочным символом, содержащимся в служебной информации. В случае равенства символов декодированный массив преобразуется в файл. Иначе происходит повторный запрос передачи данных. Повторные запросы (переспросы) содержат рекомендации по применению кодирования, - вначале каскадный код РС+Х, а затем каскадный код РС+Г.

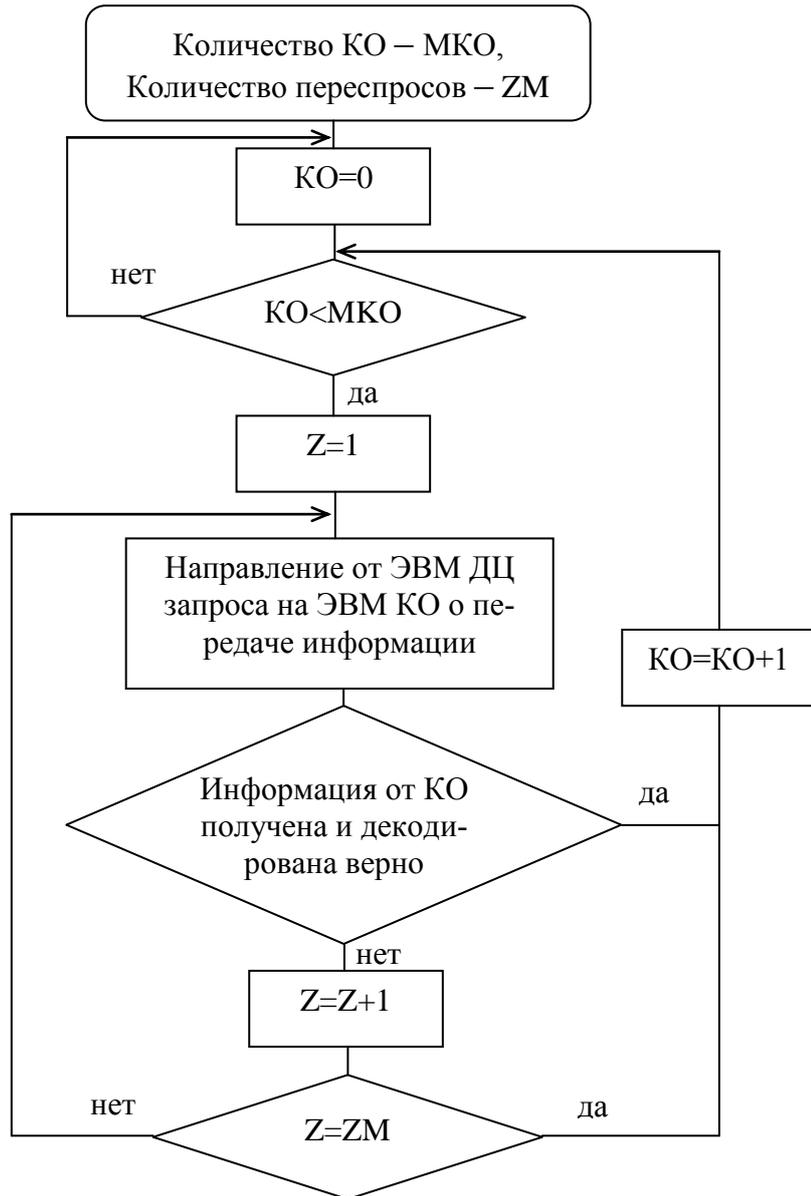


Рисунок 9 – Алгоритм обмена данными

Для реализации обмена данных, в дополнение к ПО каскадного кодирования - декодирования, разработан программный модуль преобразующий файл в массив данных и обратно, а также программный модуль обеспечивающий взаимодействие с радиомодемом.

Проведены эксперименты по передаче закодированных данных с использованием радиомодемов «Спектр-433» и антенна АШ-433. Результаты экспериментов подтверждают эффективность каскадного кодирования, выявленную ранее.

Основные результаты

1. На основании анализа методов помехоустойчивого кодирования предложен метод адаптивного каскадного кодирования-декодирования нерегулярных по длине информационных сообщений, для которого разработаны соответствующие алгоритмы и программное обеспечение.

2. Проведен теоретический анализ и экспериментальные испытания разработанного программного кодера-декодера, показавшие эффективность его борьбы как с независимыми ошибками, так и с пакетами ошибок, возникающими в канале связи. Получены следующие результаты исследования кодера декодера:

- при наличии в канале независимых ошибок с вероятностью появления ошибочного бита $1 \cdot 10^{-2}$, вероятность появления ошибочного бита в декодированном сообщении снижается до $7,2 \cdot 10^{-9}$, что соответствует выигрышу в величине E_b/N_0 на 2,5 дБ;

- при наличии в канале пакетов ошибок, декодер способен исправить пакет максимальным размером: при кодировании кодом РС - 48 бит; при кодировании кодом РС в каскаде с кодом Хемминга - 86 бит; при кодировании кодом РС в каскаде с кодом Голя - 92 бит.

3. Даны рекомендации по применению разработанного каскадного кодера-декодера в различных ЛСТ.

4. Разработан универсальный программно-аппаратный комплекс для ЛСТ, осуществляющий передачу данных между ЭВМ контролируемых объектов и ЭВМ диспетчерского центра с применением радиомодемов, использующий в своей работе адаптивный программный кодер-декодер.

5. Проведены эксперименты по передаче закодированных данных с использованием радиомодемов «Спектр-433» и антенна АШ-433. Результаты экспериментов подтверждают эффективность каскадного кодирования.

Список публикаций по теме диссертации

Статьи 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.

Публикации в других изданиях

4. Сидоренко А.А. Методы построения систем мониторинга объектов // Материалы IX международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». – Владимир-Суздаль, 2011. – Т. 2. – С. 209-210.

5. Samoylov A.G., Sidorenko A.A., Ryabokon A.V. Research of constructing methods of powerful generators which work on a variable loads // Материалы IX международной научно-технической конференции «Перспективные технологии в средствах передачи информации». конференции. – Владимир-Суздаль, 2011. – Т. 2. – С. 112-113.

6. 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.

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

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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». – Москва, 2014. – С. 196.

12. Самойлов А.Г., Сидоренко А.А. Топология системы мониторинга городского водоснабжения // Международная НТК «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». – Владимир, 2012. – Кн.2. – С. 210-212.

13. Самойлов А.Г., Сидоренко А.А. Алгоритм информационного обмена для системы городского водоснабжения // Международная НТК «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». – Владимир, 2012. – Кн.2. – С. 312-313.

Подписано в печать 20.03.2015 г.
Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Заказ _____

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

