

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.391. (075.8)

АЛЬ-АЛЕМ Ахмед Саид

**КОНТРОЛЬ ОШИБОК В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ
НА ОСНОВЕ НЕРАВНОМЕРНОГО КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Минск 2011

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Научный руководитель **Конопелько Валерий Константинович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Сети и устройства телекоммуникаций» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Официальные оппоненты: **Липницкий Валерий Антонович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Высшая математика» учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь»

Саломатин Сергей Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиотехнические системы» учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация: учреждение образования «Высший государственный колледж связи»

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В течение многих лет помехоустойчивое кодирование находит широкое применение в телекоммуникационных системах благодаря возможности контроля ошибок в передаваемой информации. Однако существующие методы, алгоритмы и устройства используемых кодов как при одномерном, так и двумерном кодировании данных, характеризуются высокой информационной избыточностью и требуют больших вычислительных затрат на реализацию кодеков при контроле многократных ошибок. Необходимость контроля многократных ошибок при невысокой информационной избыточности для повышения помехоустойчивости в телекоммуникационных системах обуславливает актуальность темы диссертации. В работе исследуются методы, алгоритмы и устройства контроля многократных ошибок на основе неравномерного кодирования информации, позволяющие при использовании одномерного и двумерного кодирования, известных и модифицированных сверточных и групповых кодов реализовать достаточно простые кодеки при невысокой информационной избыточности.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Диссертационная работа выполнялась в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» в рамках научно-исследовательской госбюджетной темы ГБ 06-2033 «Разработка методов обработки, передачи и распределения мультимедийной информации» (2007 г. – по наст. время. № госрегистрации 200797).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка методов, алгоритмов и устройств контроля многократных ошибок в телекоммуникационных системах на основе неравномерного кодирования информации для повышения помехоустойчивости телекоммуникационных систем и сетей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1 Разработать методы, алгоритмы и устройства для контроля многократных ошибок с использованием вложенного кодирования циклических и сверточных кодов.

2 Разработать методы, алгоритмы и устройства для контроля многократных ошибок при неравномерном кодировании информации сверточными кодами.

3 Разработать методы, алгоритмы и устройства по формированию библиотек образов ошибок, идентификации, правил декодирования для двумерного неравномерного кодирования информации групповыми кодами.

Предметом исследования является одномерная и двумерная обработка информации, основанная на неравномерном кодировании информации известными и модифицированными сверточными и групповыми кодами. Объектом исследования в диссертационной работе являются методы, алгоритмы и устройства контроля ошибок на основе неравномерного кодирования информации с использованием библиотеки образов ошибок. Выбор перечисленных объектов исследования обусловлен актуальностью повышения помехоустойчивости телекоммуникационных систем и сетей при снижении информационной избыточности. Эффективным подходом к решению этой проблемы является применение методов неравномерного кодирования информации сверточными и циклическими кодами, обеспечивающих повышение корректирующей способности при минимальной избыточности передаваемой информации, а также расширение функциональных возможностей кодеков по контролю ошибок при невысоких аппаратурных затратах на их реализацию.

Положения, выносимые на защиту

1 Методы вложенного кодирования циклическими и самоортогональными сверточными кодами, обеспечивающими по сравнению с известными циклическими и сверточными кодами увеличение соответственно в 2–3 раза кратности исправляемых ошибок и уменьшение в 1,5–2 раза длины кодового ограничения.

2 Методы организации неравномерной защиты информации от ошибок на основе вложенного кодирования самоортогональных сверточных кодов, диффузных и равномерных сверточных кодов, модифицированных циклических кодов, позволяющих обеспечить вероятность ошибочного приема данных $10^{-6} \dots 10^{-12}$ и информационной избыточности порядка единиц процентов.

3 Метод порогового декодирования сверточных кодов, обеспечивающий одновременно исправление пакетов ошибок и обнаружение некорректируемых пакетов ошибок сверточными кодами, контролирующими случайные ошибки, позволяющий на порядок уменьшить вероятность ошибочного декодирования.

4 Метод и алгоритмы двумерного кодирования информации, позволяющие осуществлять неравную защиту информации с использованием трехзонных карт для размещения образов ошибок. Для кратности ошибок $t = 2, 3$ число образов ошибок равно 14 и 52, что в $10^3 \dots 10^8$ раз меньше числа векторов ошибок по сравнению с одномерным кодированием информации для длин кодов $n = 127$ и $n = 1023$.

5 Устройства декодирования групповыми, сверточными и двумерными кодами, позволяющие осуществлять неравномерную защиту от ошибок переданной информации путем применения кодов с различной корректирующей способностью.

Личный вклад соискателя

1. Соискатель лично разработал методы вложенного кодирования и декодирования сверточных и циклических кодов для коррекции случайных и группирующихся ошибок.

2. Совместно с руководителем соискатель выполнил разработку методов неравномерной защиты данных от ошибок на основе вложенного кодирования и декодирования сверточных и циклических кодов, а также на основе модифицированных сверточных и циклических кодов.

3. Совместно с В.К. Конопелько соискатель выполнил разработку методов неравномерной защиты данных от ошибок на основе одномерного и двумерного кодирования данных групповыми кодами.

4. Совместно с В.К. Конопелько и О.С. Смоляковой выполнил анализ сложности идентификации ошибок кратности $t=1-3$ с использованием библиотеки образов ошибок при неравномерном совместном кодировании.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ – БГУИР (БГУИР, Минск, 19 марта 2009 г.); XIII Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харьков, 30 марта – 1 апр. 2009 г.); Научно-техническая конференция, посвященная защите информации (БГУИР, Минск, 23 – 24 июня 2009 г.); VIII Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» (Браслав, 24–28 мая 2010 г.); Международный научно-технический семинар (Браслав, 20–24 сент. 2010 г.); 4th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (Tashkent, Uzbekistan, 12–14 Oct. 2010 г.).

Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований, изложенных в диссертации, опубликовано 15 работ, в том числе 4 статьи в научных журналах; 7 тезисов докладов в материалах международных научно-технических конференций и семинаров; получены 1 патент на полезную модель и 3 положительных решения на выдачу патентов.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. В первой главе проведен анализ существующих методов неравной защиты от ошибок. Во второй главе предложены методы, алгоритмы и устройства для контроля многократных ошибок на основе вложенного (N -канального) кодирования сверточных кодов с пороговым декодированием, а также модифицированных циклических кодов на основе подстановки Корра. В третьей главе рассматриваются методы, алгоритмы и

устройства контроля многократных ошибок на основе многоканального неравномерного кодирования информационных символов сверточными (диффузными, самоортогональными и равномерными) кодами. В четвертой главе предложены методы, алгоритмы и устройство для контроля ошибок при неравномерном двумерном кодировании информационных символов групповыми кодами.

Общий объем диссертационной работы составляет 113 страниц, из которых 67 страниц основного текста, 57 рисунков на 22 страницах, 16 таблиц на 8 страницах, 4 приложения на 6 страницах, библиография из 99 наименований на 7 страницах, 15 публикаций автора на 2 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость разработки и исследования методов, алгоритмов и устройств контроля многократных ошибок при неравномерном кодировании информации.

В первой главе анализируются методы, коды и кодеки с неравномерным кодированием информации. Показано, что при прогрессивной передаче сжатых сообщений данные по степени устойчивости к ошибкам можно разделить на значимые, менее значимые и незначимые. Следовательно, для защиты от ошибок можно использовать помехоустойчивые коды с разной корректирующей способностью для обеспечения качественного восстановления принятой информации, то есть применять неравномерное помехоустойчивое кодирование информации. Очевидно, что данное решение позволит уменьшить информационную избыточность (повысить скорость передачи) и сложность реализации схем коррекции.

Анализ известных методов организации неравной защиты данных от ошибок показывает, что неравномерное кодирование с помощью циклических (3;1;3) и (31;26;3) кодов используется при кодировании значимых символов кодового слова (отсчета) ИКМ-сигнала и передаче незакодированных остальных символов, а также при объединении k' ($k' \gg 2$) значимых символов из k ($k \gg 2$) кодовых отсчетов.

Показано, что вероятности ошибочного приема отсчетов ИКМ-сигналов в диапазоне канальных ошибок $P_{\text{ош.кан.}} = 10^{-2} - 10^{-3}$ уменьшаются примерно на 1–2 порядка для данных кодов соответственно при высокой избыточности ($\approx 40-60\%$) и низкой достоверности значимых символов ($P_{\text{ош.пр.}} = 10^{-3} - 10^{-4}$). Проведен анализ неравномерной защиты данных от ошибок в беспроводных телекоммуникационных системах, использующих коды Рида-Соломона (РС-коды) и сверточные коды (СК).

Установлено, что общими недостатками известных методов организации неравномерного кодирования данных, используемых в беспроводных сетях связи,

являются высокая информационная избыточность (более 50 %) и низкая достоверность ($P_{\text{ош.пр.}} = 10^{-5}$). Обоснована необходимость проведения исследований по разработке новых методов, алгоритмов и устройств для неравномерного кодирования информации, в том числе и на основе двумерного кодирования с использованием образов ошибок, обеспечивающих высокую достоверность ($P_{\text{ош.доп.}} \leq 10^{-6} - 10^{-12}$) при высокой скорости обработки данных (≥ 100 Мбит/с).

Во второй главе разработаны методы вложенного кодирования данных на основе известных и модифицированных циклических и сверточных кодов с алгоритмом порогового декодирования. При построении модифицированных кодов используется известная подстановка Корра, обеспечивающая циклическое перемежение информационных символов, благодаря чему имеется возможность увеличивать в разы (обычно в 2–3 раза) число корректируемых ошибок. Сущность метода вложенного кодирования циклических кодов состоит в организации $N(N \geq 2)$ независимых каналов кодирования, причем при $N = 2$ кодовые символы базового кода 2-го канала суммируются с проверочными символами модифицированного кода 1-го канала. На рисунке 1 приведены исходная (а) и модифицированная (б) проверочные матрицы кодов (7;3) и (14;8), а на рисунке 2 – структурные схемы кодеров, реализующих метод вложенного кодирования циклических (а) и сверточных (б) кодов.

$$H_{7,3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H_{14,8} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

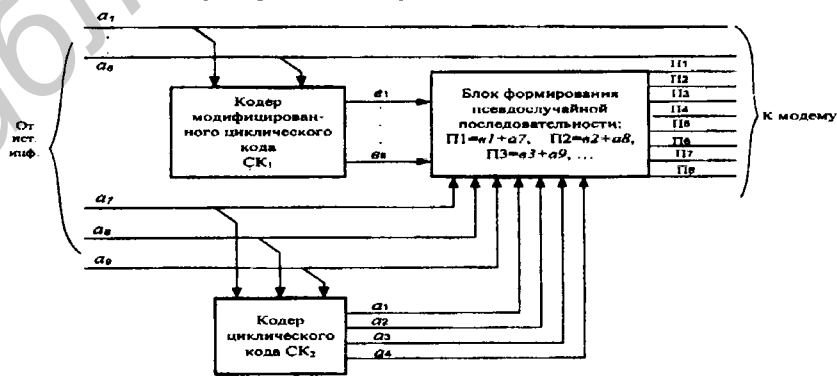
а

б

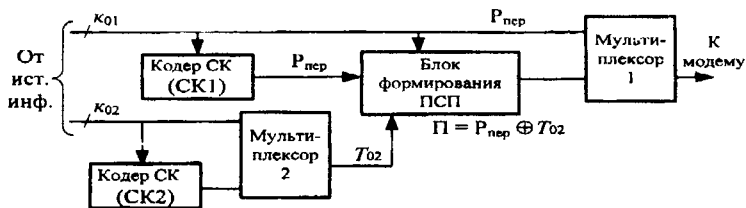
а – исходная проверочная матрица кода (7;3);

б – модифицированная проверочная матрица кода (14;8)

Рисунок 1 – Проверочные матрицы кодов (7;3) и (14;8)



а



б

Рисунок 2 – Структурные схемы кодеров, реализующих вложенное кодирование циклическими а) и сверточными б) кодами

Получены аналитические выражения, определяющие основные параметры кодирующих и декодирующих устройств, реализующих двухканальное вложенное кодирование данных на основе известных и модифицированных циклических и сверточных кодов, которые могут быть обобщены на большее количество вложенных каналов. Установлено, что при двухканальном вложенном кодировании кратность корректируемых ошибок $t_{кор.вл} \geq t_{кор.1} + t_{кор.2}$; $t_{кор.1}$ и $t_{кор.2}$ – кратность ошибок, корректируемых в первом и втором каналах соответственно. Итеративный метод декодирования позволяет повысить корректирующую способность: вначале декодируется второй код, а затем первый. Скорость передачи кодера $R_{вл} = (1 - r_1 r_2)$, где r_1 и r_2 – избыточность кодов первого и второго каналов кодирования.

Анализ эффективности вложенного кодирования при использовании самоортогональных сверточных кодов (ССК) показал, что вложенное кодирование обеспечивает коррекцию ошибок заданной кратности на меньшей (в 1,5 – 2 раза) длине кодового ограничения ($n_{a.вл.}$), чем известные ССК при равных скоростях передачи кодов ($R_{вл.}$), а также коррекцию ошибок большей (в $n_{a.вл.}/n_a$ раз) кратности при равных значениях длин кодовых ограничений.

Показано, что при 2–3 каналах вложенного кодирования можно обеспечить требуемую вероятность ошибочного приема $P = 10^{-12}$ данных при избыточности передаваемой информации менее одного процента, а при использовании кодов с разной корректирующей способностью возможна организация неравной защиты данных от ошибок.

Предложен метод коррекции пакетов ошибок и обнаружения некорректируемых пакетов при кодировании данных ССК, основанный на разработанном алгоритме формирования дополнительной последовательности.

Уравнения формирования дополнительных проверочных символов для $I = n_a \geq t_{н.кор.}$ (а) и $I = 0,5, n_a \geq t_{н.кор.}$ (б) имеют вид:

$$\begin{aligned}
 W_1 &= a_{1,1} \oplus a_{1,2} \oplus \dots \oplus a_{1,n_a} & W_i &= a_{1,1} \oplus a_{1,3} \oplus \dots \oplus a_{1,n_a-1} \\
 W_i &= a_{2,1} \oplus a_{2,2} \oplus \dots \oplus a_{2,n_a} & W_i &= a_{2,1} \oplus a_{2,3} \oplus \dots \oplus a_{2,n_a-1}
 \end{aligned}$$

$$W_{na} = a_{na,1} \oplus a_{na,2} \oplus \dots \oplus a_{na,na}, \quad W_{in.na} = a_{ia,1} \oplus a_{ia,3} \oplus \dots \oplus a_{na.na-1},$$

а

б

где W_i – дополнительный проверочный символ, a_i – кодовые символы соответствующих регистров сдвига перемежителя, I – количество канальных подпотоков передачи кодовых символов.

Получены аналитические выражения, определяющие параметры кодека ($R_{св}$ – скорость передачи модифицированного сверточного кода; r_m – избыточность модифицированного сверточного кода и $d_{ом}$ – минимальное расстояние сверточного кода), реализующего предложенный метод коррекции и обнаружения некорректируемых пакетов ошибок ССК.

Анализ параметров предложенного метода кодирования показывает, что данный метод обеспечивает на порядок меньшую вероятность ошибочного декодирования по сравнению с известным методом N – канального ($N \geq 2$) кодирования и равной избыточности кодов.

В третьей главе анализируются методы организации неравной защиты данных от ошибок, разработанные на основе методов вложенного кодирования сверточными и циклическими кодами, представленными во второй главе.

Показано, что при делении передаваемых информационных символов (данных) по их значимости на две группы (значимые и менее значимые) наиболее эффективным методом организации неравной защиты данных от ошибок является двухканальное кодирование с использованием диффузных сверточных кодов (ДФСК) (для кодирования значимых данных) и самоортogonalных сверточных кодов (для кодирования менее значимых данных) и метода модуляции ФМ-4.

Установлено, что выбором параметров соответствующих сверточных кодов и методов модуляции обеспечивается как необходимая вероятность ошибочного приема значимых и менее значимых информационных символов, так и высокая скорость передачи информации.

При делении передаваемых данных по их значимости на три и более групп предложен метод и разработан кодек, обеспечивающий неравномерную защиту данных от ошибок на основе вложенного кодирования равномерных сверточных кодов (РСК) и ССК с алгоритмом порогового декодирования. На рисунке 3 представлена структурная схема разработанного кодера, обеспечивающего неравномерную защиту данных от ошибок на основе предложенного метода вложенного кодирования РСК и ССК ($I_2 \dots I_{n_0-1}$ – менее значимые символы).

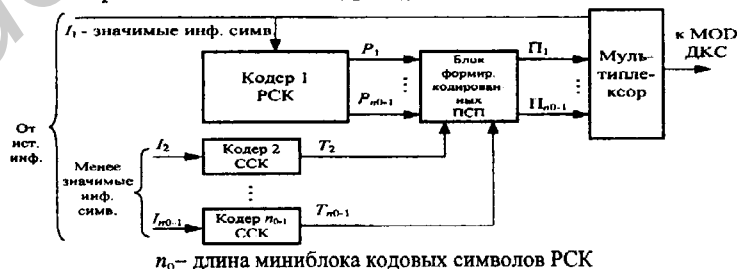


Рисунок 3 – Структурная схема кодера, обеспечивающего неравномерную защиту данных на основе РСК и ССК

Значимые информационные символы I_1 кодируются РСК соответствующей корректирующей способности, а менее значимые информационные символы $I_2 \dots I_{n_0-1}$, в зависимости от их значимости могут передаваться без корректирующего кодирования, кодироваться ССК равной и разной корректирующей способностью.

Кодовые последовательности менее значимых информационных символов, закодированные ССК, суммируются по модулю 2 в блоке формирования кодированных псевдослучайных последовательностей с проверочными символами $n_0 - 1$ РСК и далее вместе со значимыми информационными символами через мультиплексор поступают в канал связи. В декодере первоначально осуществляется декодирование менее значимых информационных символов, а затем значимых.

Получены аналитические выражения, позволяющие определить основные параметры кодека:

$$r_0 = \left(1 - \frac{n_0 - 1}{n_0} \right) \cdot 100\% \quad - \quad \text{избыточность передаваемой}$$

информации; $m \leq \min\{n_{a1}, n_{01} \cdot (n_{01} - 1)\}$ - задержка информации при декодировании;

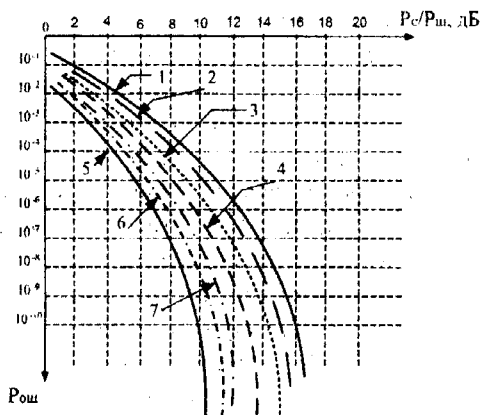
$$P_{\text{ош.дек.РСК}} = \frac{1}{n_a} \sum_{i=1}^{n_a} C_{n_a}^i \cdot \left(\frac{P_k}{n_0} \right)^i \cdot \left(1 - \frac{P_k}{n_0} \right)^{n_a-i} \quad - \quad \text{вероятность ошибочного}$$

декодирования значимых информационных символов (P_k - вероятность приема ошибочных символов),

$$P_{\text{ош.дек.ССК}} = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^{n'_a} C_{n_0}^i \cdot \left(\frac{\beta \cdot P_k}{n_0} \right)^i \cdot \left(1 - \frac{J \cdot P_k}{n_0} \right)^{n'_a-i} \quad - \quad \text{вероятность}$$

ошибочного декодирования значимых информационных символов; n'_a - длина кодового ограничения ССК, J - число ортогональных проверок ССК.

На рисунке 4 представлены кривые вероятностей ошибочного приема значимых и менее значимых информационных символов кодека, реализующего предложенный метод неравной защиты. При некодированной передаче менее значимых информационных символов вероятность их ошибочного приема определялась с использованием выражения $P_{\text{ош.пр.м.з.с}} \leq P_k/n_0$. Вероятность ошибочного приема двоичных символов когерентного демодулятора ДОФМ (кривая 1) рассчитывалась с учетом уменьшения $P_c/P_{\text{ш}}$ на входе демодулятора на 12% по отношению к потенциальной помехоустойчивости ДОФМ (кривая 2) за счет увеличения в $n_{01} = 8$ входной скорости передачи данных.

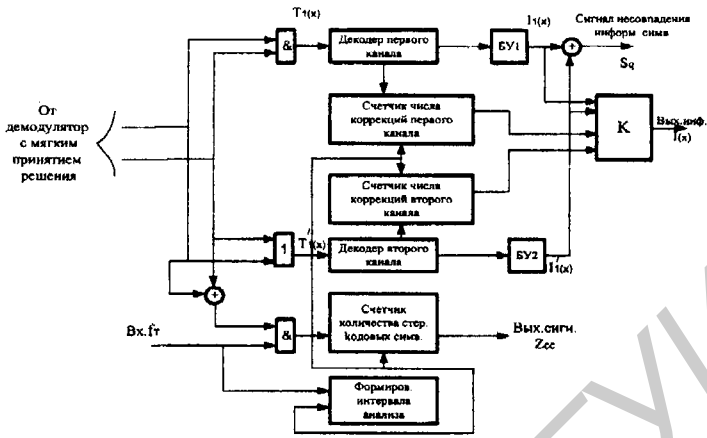


1 – помехоустойчивость когерентной ДОФМ с учетом увеличения входной скорости данных в $n_0 = 8$ раз;
 2 – потенциальная помехоустойчивость когерентной ДОФМ;
 3 – некодированные менее значимые данные;
 4, 5 – кодированные менее значимые данные ССК с $R = 1/2$, $J = 4$ и $J = 8$ соответственно;
 6 – кодированные значимые данные РСК с $R = 1/8$ и $J = 10$.

Рисунок 4 – Вероятности ошибочного приема при кодировании значимых и менее значимых данных РСК и ССК

Установлено, что предложенный метод неравной защиты данных от ошибок на основе вложенного кодирования РСК и ССК обеспечивает высокую достоверность как значимых $P_{\text{ош. знач.}} = 10^{-12}$, так и менее значимых $P_{\text{ош. м. з. с.}} = 10^{-8}$ информационных символов при минимальной ($r_0 = 2-3\%$) избыточности передаваемой информации.

С целью повышения корректирующей способности порогового декодирования сверточных кодов предложен алгоритм декодирования СК с квантованием выходных сигналов демодулятора ФМ-2 на четыре уровня (декодирование со стиранием или мягкое декодирование ССК). На рисунке 5 представлена структурная схема порогового декодера СК, реализующего предложенный алгоритм мягкого декодирования СК. Сущность алгоритма мягкого порогового декодирования СК состоит в организации двух каналов декодирования. Кодовые символы, соответствующие зоне стирания, поступают на входы каналов декодирования с разной полярностью. Установлено, что при равномерном шаге квантования огибающей выходного ФМ-сигнала общее количество корректируемых ошибок составляет $t \leq (t_1 + t_2/2) + 1 = (J/2) + 1$ дв. симв., где t_1 и t_2 – соответственно количество ошибочных кодовых символов вне зоны стирания и «стертых» символов.



БУ1 и БУ2 – буферные устройства первого и второго каналов декодирования,
 К – коммутатор

Рисунок 5 – Структурная схема декодера СК при декодировании квантованных выходных сигналов ФМ-демодулятора на четыре уровня

Разработан метод и пороговый декодер сверточных кодов, обеспечивающий одновременно коррекцию ошибок заданной кратности и обнаружение некорректируемых пакетов ошибок. Сущность метода состоит в том, что для обнаружения некорректируемых пакетов ошибок используются структурные свойства синдромной последовательности. На рисунке 6 приведена структурная схема декодера СК, обеспечивающего обнаружение некорректируемых пакетов ошибок.

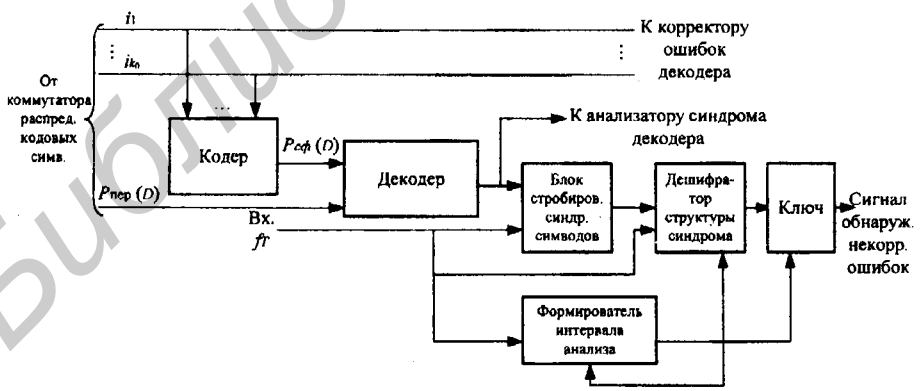


Рисунок 6 – Структурная схема порогового декодера СК с обнаружением некорректируемых пакетов ошибок

Для геометрической модели распределения длин защитных промежутков между пакетами ошибок получены аналитические выражения:

$$P_1 = \sum_{k=\eta+1}^{\bar{t}_n-1} (1 - 1/\bar{t}_n) \cdot 1/\bar{t}_n \cdot \sum_{k=\eta+1}^{\bar{t}_n} \left(K \bar{t}_n^k \right) \cdot 1/2 \bar{t}_n - \text{вероятность обнаружения}$$

пакетов ошибок t_n заданной кратности;

$$P_2 = \sum_{k=t_n}^{n_a} (1 - 1/\bar{t}_n) \cdot 1/\bar{t}_n \cdot \sum_{k=1}^{n_a} \left(K \bar{t}_n^k \right) \cdot 1/2 \bar{t}_n - \text{вероят-$$

ность пропуска пакетов ошибок кратности больше, чем t_n , где η - величина порога принятия решения об обнаружении пакетов ошибок, рассчитываемая исходя из модели канала связи и параметров используемого сверточного кода.

Установлено, что чем больше величина интервала анализа (n_a), тем меньше вероятность пропуска некорректируемых пакетов ошибок.

В четвертой главе диссертации приведены результаты исследований по неравномерному двумерному кодированию информации, при котором часть информационных символов не кодируется одним из двух групповых кодов С1 и С2, благодаря чему обеспечивается неравная защита информации от ошибок. На рисунке 7 представлены таблицы двумерного кодирования информации при равномерной (а) и неравномерной (б, в) защите данных от ошибок.

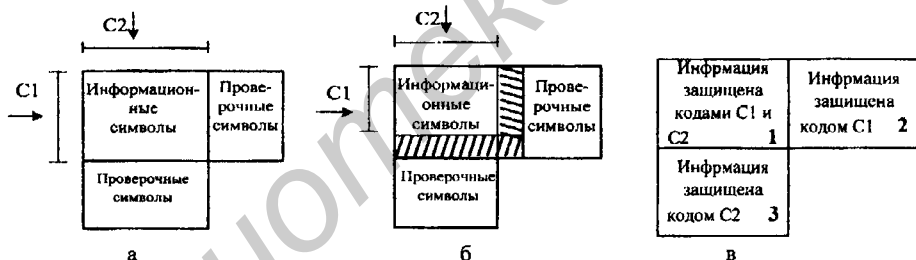


Рисунок 7 – Таблица двумерного кодирования информации при равномерной и неравномерной защите от ошибок

Впервые введено понятие двумерного неравномерного совместного кодирования (НСК), когда один из кодов, например, С1 кодирует все строки таблицы, а код С2 только часть столбцов таблицы, что позволяет осуществить неравномерную защиту информации от ошибок. Предложено использовать трехзонную карту ошибок, представленную на рисунке 7 в, из которой следует, что зона 1 защищена двумя кодами С1 и С2, а зоны 2 и 3 – одним из кодов С1 или С2.

При возникновении ошибок при НСК ошибочные символы могут располагаться в любых зонах карты ошибок в любом количестве не превышающим t_{Σ} . Для решения задачи размещения ошибок в карте ошибок разработано правило, блок-схема алгоритма которого представлена на рисунке 8.

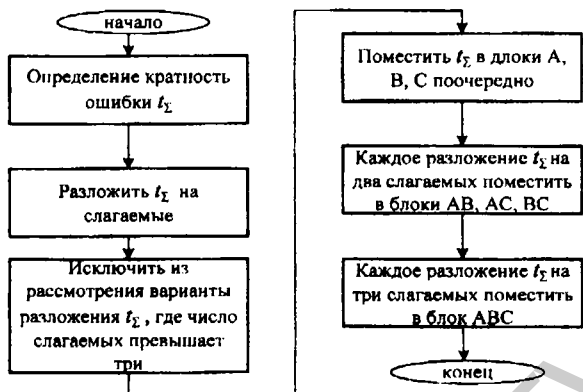
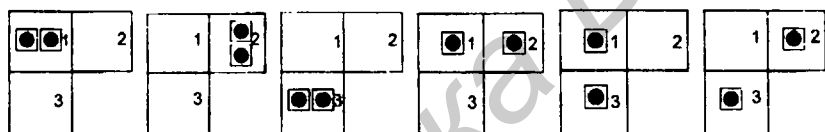


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма размещения ошибочных символов в карте ошибок

Для НСК и кратности ошибок $t = 2$ число карт равно 6 (рисунок 9).



● – ошибочный символ

Рисунок 9 – Размещение двукратных ($t = 2$) ошибок в карте

Далее определяется образ двумерной ошибки как изображение в таблице, строки и столбцы которой обязательно содержат хотя бы один ошибочный образ. В отличие от двумерного кодирования образ ошибок НСК, кроме произошедших ошибок, имеет информацию и о том, в какой зоне карты эта ошибка произошла.

Разработан алгоритм формирования библиотек образов ошибок для НСК (рисунок 10).

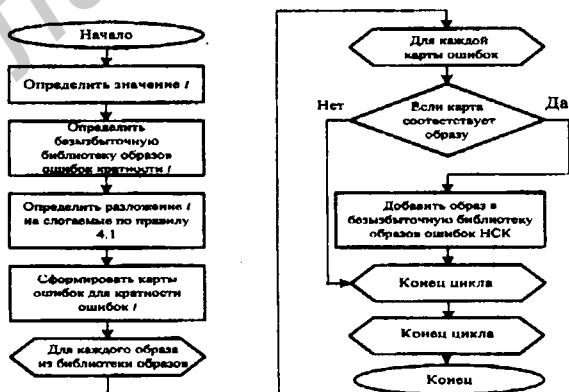


Рисунок 10 – Алгоритм формирования библиотеки образов ошибок для НСК

Получены соответствующие библиотеки образов ошибок кратности $t = 2; 3$, число которых равно 14 и 52 и не зависит от длины кода n .

В таблице 1 приведены результаты сравнительного анализа количества синдромов и образов ошибок при одномерном кодировании и двумерном неравномерном совместном кодировании (НСК).

Таблица 1 – Число образов ошибок для НСК

t	Число образов ошибок для НСК	Число образов ошибок при двумерном кодировании информации	Число селективируемых комбинаций при одномерном кодировании информации	
			$n = 127$	$n = 1023$
2	14	3	8 001	522 753
			$n = 1023$	522 753
3	52	6	333 375	177 910 271
			$n = 1023$	177 910 271

Установлено уменьшение числа селективируемых комбинаций в $10^3 \div 10^8$ раз для $n = 127; 1023$ по сравнению с одномерным кодированием информации. Однако по сравнению с двумерным кодированием происходит увеличение числа образов ошибок для НСК из-за необходимости учета размещения ошибок в зонах карт.

Для идентификации образов ошибок при НСК предложено использовать трехмерный идентификационный вектор $I = (I_1, I_2, I_3)$, где вектор $I_1 = (w_1, w_2)$, w_1, w_2 – число ошибочных позиций по строкам и столбцам; вектор $I_2 = (w_3, w_4)$, w_3, w_4 – число строк (w_3) и столбцов (w_4) с четным/нечетным количеством ошибок; вектор $I_3 = (w_5, w_6)$, w_5, w_6 – количество строк и столбцов, в которых произошла однократная ошибка. В таблице 2 приведены значения идентификационного вектора $I = (I_1, I_2, I_3)$ для $t = 2$.

Таблица 2 – Значения идентификационного вектора $I = (I_1, I_2, I_3)$ для НСК $t = 2$

№	ID образа	Идентификационный вектор
1	T12-01	((1,2),(0,2),(0,2))
2	T12-02	((2,1),(2,0),(2,0))
3	T12-03	((2,2),(2,2),(2,2))
4	T12-04	((1,0),(0,0),(0,0))
5	T12-05	((2,0),(2,0),(2,0))
6	T12-06	((2,1),(2,0),(2,0))
7	T12-07	((0,2),(2,1),(0,2))
8	T12-08	((0,1),(0,0),(0,0))
9	T12-09	((0,1),(0,2),(0,2))
10	T12-10	((1,1),(0,0),(0,0))
11	T12-11	((2,1),(2,1),(2,1))
12	T12-12	((1,1),(1,0),(1,0))
13	T12-13	((1,2),(1,2),(1,2))
14	T12-14	((1,1),(1,1),(1,1))

Установлено, что увеличение размерности вектора I до шести параметров позволяет однозначно идентифицировать 10 и 24 образа для кратности ошибок $t = 2$ и $t = 3$ соответственно, при количестве групп идентифицируемых образов 2 и 12 соответственно. Показано, что для увеличения идентификационных возможностей следует увеличивать суммарное кодовое расстояние двумерных кодов.

Разработана библиотека правил декодирования образов ошибок кратности $t = 2$ и $t = 3$ при НСК, основанная на коррекции ошибок и стираний. Установлено, что при кратности ошибок $t = 2$ все образы ошибок корректируются, а для $t = 3$ число отказов от декодирования не превышает 6 % от общего числа образов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1 Впервые разработан метод вложенного кодирования самоортогональных сверточных кодов с алгоритмом порогового декодирования, позволяющий формировать модифицированные сверточные коды, которые при одинаковой скорости передачи кода и числе ортогональных проверок с известными сверточными кодами обеспечивают коррекцию ошибок на меньшей в 1,5–2 раза длине кодового ограничения и при меньшей в 2–3 раза избыточности передаваемой информации. Получены выражения, определяющие основные параметры модифицированных кодов и кодеков, реализующих метод вложенного кодирования самоортогональных сверточных кодов [2 – А, 11 – А, 14 – А].

2 Впервые разработаны метод и устройство вложенного кодирования циклических кодов, обеспечивающие, увеличение в N раз ($N \geq 2$ – число ступеней кодирования) кратность корректируемых ошибок при уменьшении в 1,5–2 раза избыточности передаваемой информации [3 – А, 4 – А, 5 – А].

3 Впервые предложены методы и разработаны устройства организации неравномерной защиты данных от ошибок на основе вложенного кодирования самоортогональных сверточных кодов, диффузных и равномерных сверточных кодов с алгоритмом порогового декодирования, модифицированных циклических кодов. Получены аналитические выражения, позволяющие определить параметры кодеков, реализующих предложенные методы. Показано, что метод неравномерного кодирования данных с использованием самоортогональных и равномерных сверточных кодов является наиболее эффективным, обеспечивая вероятность ошибочного приема данных на выходе декодера $P_{ош} = 10^{-6} - 10^{-12}$ при информационной избыточности порядка 1–2 % [1 – А, 2 – А, 5 – А, 8 – А, 9 – А, 10 – А, 11 – А, 15 – А].

4 Разработан метод кодирования и декодирования сверточных кодов, обеспечивающий одновременно исправление пакетов ошибок заданной кратности и обнаружение некорректируемых пакетов ошибок сверточными кодами, корректирующими случайные ошибки. Получены аналитические выражения

оценки эффективности предложенного метода контроля пакетных ошибок. Установлено, что при использовании кодов с одинаковой избыточностью предложенный метод кодирования сверточных кодов обеспечивает на порядок меньшую вероятность ошибочного декодирования по сравнению с известным N -канальным кодированием ($N=2$) [1 – А, 6 – А].

5 Впервые разработан метод неравномерного совместного кодирования данных на основе использования трехзонных карт размещения образов ошибок, позволяющий осуществить неравномерную защиту информации [7 – А, 8 – А, 9 – А, 12 – А].

6 Разработаны для кратности ошибок $t = 2$ и $t = 3$ библиотеки образов ошибок, число которых равно 14 и 52, что в $10^3 \dots 10^8$ раз меньше по сравнению с числом синдромов при одномерном кодировании для длин кодов $n = 127; 1023$. Показано, что при использовании трехмерного идентификационного вектора ошибок можно идентифицировать 10 и 24 образа. Установлено, что при кратности ошибок $t = 2$ все образы корректируется как ошибки и стирания, а для $t = 3$ число отказов от декодирования не превышает 6 % от общего числа образов [7 – А, 12 – А, 13 – А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1 Предложенные методы неравномерного кодирования данных на основе вложенного кодирования известных и модифицированных сверточных и циклических кодов могут быть использованы в спутниковых и космических системах связи при прогрессивной передаче изображений, а также в системах обработки и хранения информации с высокими требованиями к вероятности ошибочного декодирования и быстродействия схем коррекции [1 – А, 2 – А, 5 – А, 6 – А, 8 – А, 13 – А].

2 Предложенные библиотеки образов ошибок при двумерном неравномерном совместном кодировании, идентификационных параметров, алгоритмов декодирования образов ошибок могут быть использованы в системах памяти для неравной защиты информации от ошибок, в частности, RAID-системах и системах видеонаблюдения [7 – А, 9 – А, 12 – А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1–А. Аль-алем, А. С. Обнаружение некорректируемых пакетов стираний с помощью сверточных кодов / В.К. Конопелько, А.С. Аль-алем, А.И. Королев, Н.Н. Ловчий // Доклады БГУИР. – 2008. – 7(37). – С. 41–48.

2–А. Аль-алем, А. С. Методы неравной защиты информационных символов на основе сверточных кодов / А.И. Королев, А.С. Аль-алем, А.А. Борискевич // Доклады БГУИР. – 2008. – 8(38). – С. 12–18.

3–А. Аль-алем, А. С. Метод и характеристики вложенного кодирования групповых кодов на основе циклической подстановки Корра / А.И. Королев, А.С. Аль-алем // Доклады БГУИР. – 2009. – 5(43). – С. 17–23.

4–А. Аль-алем, А. С. Мажоритарное декодирование циклических кодов при мягком принятием решения на выходе дискретного канала связи / А.И. Королев, А.С. Аль-алем // Инженерный вестник 2010. № 2(30). – С. 16–19.

Тезисы докладов

5–А. Аль-алем, А. С. Алгоритмы вычисления классифицированных ошибок при двухмерном кодировании информации / В.К. Конопелько, О.Г. Смолякова, А.С. Аль-алем // Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ–БГУИР: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19 марта 2009 г. – Минск: БГУИР, 2009. – С. 71.

6–А. Аль-алем, А. С. Оценка эффективности метода неравной защиты информационных символов на основе сверточных кодов / В.К. Конопелько, А.С. Аль-алем, А.И. Королев, А.А. Борискевич // Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ–БГУИР: тез. докл. Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 19 марта 2009 года. – Минск: БГУИР, 2009. – С. 88.

7–А. Аль-алем, А. С. Метод кодирования информации с неравной защитой / В.К. Конопелько, А.С. Аль-алем, А.И. Королев // XIII Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке»: тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., Харьков, 30 марта – 1 апр. 2009 г. – Харьков: 2009. – С. 134.

8–А. Аль-алем, А. С. Анализ методов коррекции ошибок в широкополосных каналах связи / В.К. Конопелько, А.С. Аль-алем, А.И. Королев // Научно-техническая конференция, посвященная защите информации: тез. докл. Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 23–24 июня 2009 г.. – Минск: БГУИР, 2009. – С. 23–24.

9–А. Аль-алем, А. С. Определение библиотек образов ошибок для неравномерной защиты данных при двумерном кодировании информации / В.К. Конопелько, А.С. Аль-алем, О.Г. Смолякова // VIII Белорусско-российская

научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации): тез. Междунар. научн.-техн. конф., Браслав, 24–28 мая 2010 г. – Браслав: БГУИР, 2010 г. – С. 55.

10–А. Аль-алем, А. С. Двумерное неравномерное кодирование информации / В.К. Конопелько, А.С. Аль-алем, О.Г. Смолякова // Международный научно-технический семинар: тез. докл. Междунар. науч.-техн. семинар, Браслав, 20–24 сент. 2010 г. – Минск: БГУИР, 2010 г. – С. 40.

Материалы конференций

11–А. Аль-алем, А. С. Методы и характеристики неравной защиты видеоданных на основе использования равномерных сверточных кодов / А.И. Королев, А.С. Аль-алем, В.К. Конопелько // 4th International Conference on Application of Information and Communication Technologies. 12–14 October 2010, Tashkent, Uzbekistan. С. 97–101.

Патенты

12–А. Положительное решение на выдачу патента «Устройство вложенного кодирования и декодирования групповых циклических кодов» / А.И. Королев, В.К. Конопелько, Аль-алем А. С., В.В. Рыжиков; заявитель Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники – № а 20080773; заявл. 13.06.2008 // Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2008.

13–А. Положительное решение на выдачу патента «Пороговый декодер сверточного кода» / В.К. Конопелько, А.И. Королев, Аль-алем А. С.; заявитель Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники – № а 20081471; заявл. 20.11.2008 / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2009.

14–А. Устройство норменной коррекции двойных ошибок: Пат. № 6062 Респ. Беларусь, МПК Н 04L 1/00 / В.К. Конопелько, О.Г. Смолякова, Аль-алем А. С.; заявитель: Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – № и 20090380; заявл. 06.10.2009; опубл. 30.04.2010 // Официальный бюллетень/ Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2010. №. 2 – С.233.

15–А. Положительное решение на выдачу патента «Устройство неравной защиты информационных символов на основе сверточных кодов» / А.И. Королев, Аль-алем А. С., В.К. Конопелько, А.А. Борискевич; заявитель: Бел. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники – № а 20100057; заявл. 19.01.2010 / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2010.



РЭЗЮМЭ

Аль-Алем Ахмед Саід

КАНТРОЛЬ ПАМЫЛАК У ТЭЛЕКАМУНІКАЦЫЙНЫХ СІСТЭМАХ НА АСНОВЕ НЕРАЎНАМЕРНАГА КАДАВАННЯ ІНФАРМАЦЫІ

Ключавыя словы: коды, нераўнамернае кадаванне, укладзенае кадаванне, дэкадаванне, звёртачны код, цыклічны код, кратнасць памылак, сіндром, ідэнтыфікацыя.

Мэта працы: павышэнне перашкодаўстойлівасці тэлекамунацыйных сістэм і сетак.

Асноўныя вынікі працы: распрацаваны метады, алгарытмы і прылады, якія забяспечваюць няроўную абарону ад памылак інфармацыі на аснове выкарыстання вядомых і мадыфікаваных звёртачных і групавых кодаў для зніжэння інфармацыйнага лішку (павышэнне хуткасці перадачы) і складанасці схем карэкцыі. Распрацаваны метады і прылады ўкладзенага кадавання самаартаганальных звёртачных кодаў з алгарытмам парогавага дэкадавання і мадыфікаваных цыклічных кодаў, якія забяспечваюць пры аднолькавых хуткасцях перадачы і ліку артаганальных праверак з вядомымі звёртачнымі кодамі, карэкцыю памылак роўнай кратнасці даўжыні, якая менш у 1,5–2 разы кодавага абмежавання і ў 2–3 разы меншай лішку. Для кратнасці памылак $t = 2$ і 3 распрацаваны бібліятэкі выяў памылак для нераўнамернага двухмернага кадавання, лік якіх роўны 14 і 52, што ў 10^3 – 10^8 раз менш у параўнанні з лікам сіндромаў пры аднамерным кадаванні для даўжынь кодаў $n = 127$ і 1023 .

Ступень выкарыстання атрыманых вынікаў: навуковыя вынікі працы скарыстаны пры правядзенні навукова-даследчых прац пры распрацоўцы кодэкаў для абароны малонкаў ад памылак пры перадачы.

Вобласць ужывання: высакахуткасныя спадарожнікавыя і касмічныя сістэмы сувязі, а таксама ў сістэмы апрацоўкі і захоўвання інфармацыі з высокімі патрабаваннямі да верагоднасці памылковага дэкадавання і хуткадзейнасці схем карэкцыі.

РЕЗЮМЕ

Аль-Алем Ахмед Саид

КОНТРОЛЬ ОШИБОК В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ НЕРАВНОМЕРНОГО КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Ключевые слова: коды, неравномерное кодирование, вложенное кодирование, декодирование, сверточный код, циклический код, кратность ошибок, синдром, идентификация.

Цель работы: повышение помехоустойчивости телекоммуникационных систем и сетей.

Основные результаты работы: разработаны методы, алгоритмы и устройства, обеспечивающие неравную защиту от ошибок информации на основе использования известных и модифицированных сверточных и групповых кодов для снижения информационной избыточности (повышения скорости передачи) и сложности схем коррекции. Разработаны методы и устройства вложенного кодирования самоортогональных сверточных кодов с алгоритмом порогового декодирования и модифицированных циклических кодов, обеспечивающие при одинаковых скоростях передачи и числе ортогональных проверок с известными сверточными кодами, коррекцию ошибок равной кратности на меньшей в 1,5–2 раза длине кодового ограничения и в 2–3 раза меньшей избыточности. Для кратности ошибок $t = 2$ и $t = 3$ разработаны библиотеки образов ошибок для неравномерного двумерного кодирования, число которых равно 14 и 52, что в $10^3 - 10^8$ раз меньше по сравнению с числом синдромов при одномерном кодировании для длин кодов $n = 127$ и 1023 .

Степень использования полученных результатов: научные результаты работы использованы при поведении научно-исследовательских работ при разработке кодеков для защиты передаваемых изображений от ошибок.

Область применения: высокоскоростные спутниковые и космические системы связи, а также системы обработки и хранения информации с высокими требованиями к вероятности ошибочного декодирования и быстрдействию схем коррекции.

SUMMARY

EIAlam Ahmed Said

CONTROL OF ERRORS IN TELECOMMUNICATIONS SYSTEMS BASED ON NONUNIFORM CODING INFORMATION

Keywords: codes, unequal coding, embedded coding, decoding, convolutional code, cyclic code, the multiplicity of errors, the syndrome, identification.

Objective: improve the noise immunity of telecommunications systems and networks.

Main results: To work out methods, algorithms and devices that provide unequal error protection of information through the use of known and modified convolutional codes and groups to reduce information redundancy (increasing transmission speed) and the complexity of the correction scheme. The methods and devices embedded coding self-orthogonal convolutional codes with threshold decoding algorithm and the modified cyclic codes, ensuring at the same rate and the number of orthogonal tests with known convolutional codes, error correction equal to the multiplicity at least 1,5–2 times the constraint length and 2–3 times less redundancy. For the multiplicity of errors $t = 2$ and $t = 3$ are designed library of images of errors for irregular two-dimensional coding, of which there are 14 and 52, $10^3 - 10^8$ times smaller compared with the number of syndromes in the one-dimensional coding for the code length $n = 127$ and $n = 1023$.

Benefit from the results: scientific results of the work used to conduct scientific research work in developing codecs for the protection of transmitted images from mistakes.

Field of application: high-speed satellite and space communication systems as well as in processing and storing information with high demands on the probability of decoding error correction schemes and speed.

Научное издание

АЛЬ-АЛЕМ АХМЕД САИД

**КОНТРОЛЬ ОШИБОК В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ НА
ОСНОВЕ НЕРАВНОМЕРНОГО КОДИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Подписано в печать 12.05.2011.	Формат 60×84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,4.
Уч.-изд. л. 1,3.	Тираж 60 экз.	Заказ 279.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009
220013, Минск, П. Бровки, 6