

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.391. (075.8)

САЛАС ВАЛОР
Нестор Альфредо

**ДВУХКАНАЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ СТИРАНИЙ И ОШИБОК
ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫМИ КОДАМИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Минск 2014

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

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

Официальные оппоненты: **Листопад Николай Измайлович**, доктор технических наук, профессор, «Главный информационно-аналитический центр Министерства образования Республики Беларусь», директор

Мальцев Сергей Васильевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Радиоэлектроника» учреждения образования «Полоцкий государственный университет»

Оппонирующая организация Учреждение образования «Белорусский национальный технический университет»

Защита состоится «3» апреля 2014 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. 293-89-89, e-mail: dissovvet@bsuir.by.

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

В последние годы одним из основных методов повышения достоверности передаваемой информации в телекоммуникационных системах является применение помехоустойчивого кодирования. Однако существующие методы декодирования кодов, корректирующих многократные ошибки, как при одномерном, так и двумерном кодировании данных, характеризуются высокой информационной избыточностью и требуют больших аппаратурных и временных затрат. Этих недостатков можно избежать при использовании дополнительной информации о местоположении символов с малой достоверностью (стираний), использовании двух каналов (прямого и инверсного) декодирования, идентификации канала с меньшим числом ошибок и их коррекции кодами, исправляющими ошибки малой кратности. Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью совершенствования методов, алгоритмов и устройств декодирования одномерных и двумерных кодов с целью повышения помехоустойчивости телекоммуникационных систем, уменьшения сложности и повышения быстродействия устройств декодирования.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

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» (этап «Разработать и исследовать высокоскоростные методы передачи мультимедийной информации по различным каналам связи»).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка методов, алгоритмов и устройств двухканального декодирования одномерных и двумерных кодов на основе коррекции стираний кодами, исправляющими ошибки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать метод двухканальной коррекции стираний кодами, исправляющими ошибки;
- разработать методы, алгоритмы и устройства идентификации кратности несогласованных стираний (ошибок) в двух каналах при одномерном и двумерном кодировании информации;

– разработать методы и устройства коррекции стираний и ошибок при мажоритарном декодировании кодов, исправляющих ошибки.

Предметом исследования является одномерная и двумерная защита данных от искажений, основанная на двухканальном декодировании информации с коррекцией стираний. *Объектом исследования* являются методы, алгоритмы и устройства двухканального декодирования одномерных и двумерных помехоустойчивых кодов на основе обработки принятого слова и его инверсии, идентификации кратности несогласованных стираний (ошибок) в них и коррекции ошибок в слове с меньшим числом несогласованных стираний. Выбор перечисленных объектов исследования обусловлен актуальностью проблемы повышения помехоустойчивости телекоммуникационных систем, эффективным подходом к решению которой является применение методов, алгоритмов и устройств декодирования кодов, основанных на применении коррекции стираний путем исправления ошибок как при одномерном, так и двумерном кодировании информации.

Положения, выносимые на защиту

1. Метод двухканального декодирования групповых кодов, корректирующих стирания, позволяющий осуществлять коррекцию стираний в 2^6 раз быстрее по сравнению с переборным методом коррекции многократных стираний при одномерном и двумерном кодировании информации; t_c – число корректируемых стираний.

2. Синдромный и норменный методы двухканальной идентификации кратности несогласованных стираний (ошибок) в прямом A^* и инверсном \bar{A}^* словах при одномерном кодировании информации, позволяющие определять слово с меньшим числом несогласованных стираний при коррекции $t_c = 3; 5; 7$ с использованием 2; 3; 4 идентификационных параметров синдромным методом, а при $t_c = 5; 7$ с использованием 2; 3 идентификационных параметров норменным методом, вычисляемых по синдромам и нормам используемых кодов при минимальном кодовом расстоянии $d = t_c + 1$.

3. Метод совместной двухканальной идентификации кратности несогласованных стираний (ошибок) в прямом A_d^* и инверсном \bar{A}_d^* словах при двумерном кодировании информации, позволяющий определить слово с меньшим числом несогласованных стираний при использовании идентификационных параметров, вычисляемых по синдромам в строках и столбцах кодов. Показано, что для коррекции стираний кратности $t_c = 3; 5; 7$ достаточно применения кодов C1 и C2 с кодовыми расстояниями соответственно $d_1 = 2; 3; 5$, $d_2 = 2$ при одном идентификационном параметре по обнаружению ошибок и двух параметрах по обнаружению ошибок и идентификации одиночных ошибок кодом C1 для $t_c = 3; 5$ и $t_c = 7$.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертации отражает личный вклад автора. Он заключается в научном обосновании методов и алгоритмов двухканального декодирования данных с исправлением стираний, кодовой идентификации ошибок (определения числа несогласованных стираний) и определения канала с меньшим числом ошибок; разработка устройств коррекции многократных стираний кодами, исправляющими ошибки при одномерном и двумерном кодировании; методы и устройства декодирования с исправлением ошибок малой кратности, постановке и проведении экспериментов по исследованию характеристик, оценке эффективности разработанных алгоритмов и методов, обработке и анализе полученных результатов, формулировке выводов.

Определение целей и задач исследований, интерпретация, обобщение полученных результатов и их публикации проводились совместно с научным руководителем, доктором технических наук В.К. Конопелько, кандидатами технических наук доцентами А.И. Королев и К.И. Пирогов.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах: 48-я, 49-я научная конференция аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (Минск, БГУИР, 2012, 2013); международный научно-технический семинар «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, БГУИР, 2011, 2012, 2013); IX, X, XI Белорусско-российская научно-техническая конференция «Технические средства защиты информации» (Минск, 2011, 2012, 2013); Первая международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем» (Москва, МГТУ МИРЭА, 2013).

Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 15 печатных работ, в том числе 5 статей в научных рецензируемых журналах общим объемом 1,7 авторских листа; 4 доклада, 2 тезиса докладов в сборниках и материалах конференций; 3 патента и одно положительное решение на выдачу патента.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и 7 приложений. Общий объем диссертационной работы составляет 163 страницы, из них 80 страниц текста, 43 рисунка на 10 страницах, 25 таблиц на 14 страницах, 7 приложений на 47 страницах, библиография из 134 наименований на 12 страницах, включая 15 публикаций автора на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* определены основные направления исследований, обоснована актуальность темы диссертации, показана необходимость разработки и исследования методов, алгоритмов и устройств двухканального исправления стираний при одномерном и двумерном кодировании информации, основанных на идентификации канала с меньшим числом несогласованных стираний (ошибок) и коррекции ошибок.

В *первой главе* проведен анализ синдромного декодирования помехоустойчивых кодов при одномерном и двумерном кодировании информации, рассмотрен норменный метод коррекции ошибок БЧХ-кодами, рассмотрены методы исправления стираний одномерными кодами, проведен анализ методов коррекции ошибок двумерными кодами, эффективность их использования, проведен анализ метода неравномерного совместного кодирования информации двумерными кодами, приведено обоснование направлений исследования.

Показано, что повышение надежности передаваемой информации известными методами, алгоритмами и устройствами декодирования помехоустойчивыми кодами с исправлением ошибок требуют больших аппаратных и временных затрат, особенно при росте кратности корректируемых ошибок $t \geq 3$ и длины кода $n \geq 31$ из-за значительного увеличения числа селектируемых комбинаций ошибок при синдромном методе декодирования («проблема селектора») и необходимости выполнять итеративную процедуру для нахождения вектора ошибок при переборных методах коррекции ошибок. Показано, что применение норменного метода коррекции ошибок позволяет в n раз уменьшить сложность декодера по сравнению с синдромным методом. Отмечается, что применение понятия «стирание», при котором имеется дополнительная информация о местоположении и надежности принятых символов, позволяет в два раза увеличить корректирующую способность кодов по сравнению с коррекцией ошибок. Проведенный анализ известных методов коррекции стираний при одномерном и двумерном кодировании информации показывает, что они обладают высокой вычислительной сложностью и низким быстродействием при

декодировании. Показано, что известный метод неравномерного совместного кодирования неприемлем на практике из-за трудности в определении параметров кодов C1 и C2 и высокой информационной избыточности кодовых.

Обоснована необходимость проведения исследований по разработке методов, алгоритмов и устройств декодирования информации с исправлением стираний и ошибок на основе использования двух каналов декодирования и идентификации канала с меньшим числом несогласованных стираний (ошибок) при одномерном и двумерном кодировании информации.

Во *второй главе* предлагается метод двухканального декодирования групповых кодов, корректирующих стирания, сущность которого состоит в организации двух каналов декодирования (прямого A^* и инверсного \bar{A}^*) и выборе для декодирования канала с меньшим числом несогласованных стираний (ошибок) (рисунок 1). Для формирования прямого A^* и инверсного \bar{A}^* каналов (слов) декодирования состояния стертых символов в обоих каналах должны быть одинаковыми, как показано на рисунке 2. При подобном формировании A^* и \bar{A}^* слов число несогласованных стираний $t_{нс}$ (ошибок) в одном из каналов не превышает $t_{нс} \leq \left\lfloor \frac{t_c}{2} \right\rfloor$, где t_c – кратность стираний. Таким образом, возникает задача определения кратности несогласованных стираний в словах A^* и \bar{A}^* .

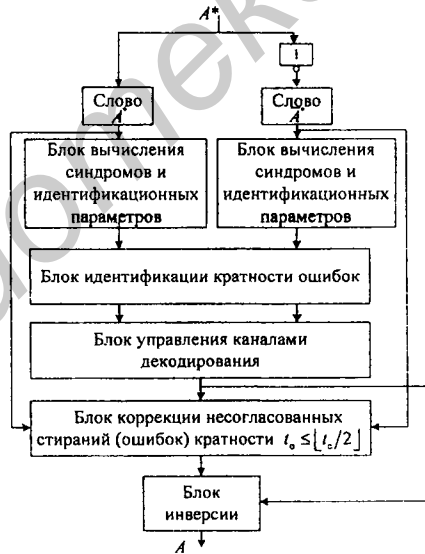


Рисунок 1 – Структурная схема метода двухканального декодирования групповых кодов, корректирующих стирания

В таблице 1 приведено число несогласованных стираний и значения синдромов для A^* и \bar{A}^* при использовании для идентификации трехкратных несогласованных стираний $t_c=3$ удлиненного кода Хэмминга с $d=4$. Анализ данных таблицы 1 показывает, что при использовании двух каналов декодирования для коррекции трехкратных стираний достаточно исправления одной ошибки. При этом кратность несогласованных стираний в обоих каналах можно определить по значению синдромов и разряда контроля четности.

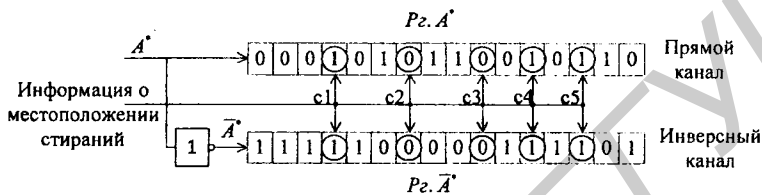


Рисунок 2 – Значения символов в стертых позициях прямого A^* и инверсного \bar{A}^* слов со стираниями

Таблица 1 – Число несогласованных стираний и значения синдромов для прямого и инверсного слов для удлиненного кода Хэмминга с $d=4$ и $t_c=3$

Кодовое слово	Количество несогласованных стираний (ошибок)			
Прямое слово A^*	3	2	1	0
Инверсное слово \bar{A}^*	0	1	2	3
Синдром $S_{A^*}(I_0) / S(I_{кч})$	1/1	1/0	1/1	0/0
Синдром $S_{\bar{A}^*}(\bar{I}_0) / S(\bar{I}_{кч})$	0/0	1/1	1/0	1/1

Предложен синдромный метод идентификации кратности несогласованных стираний в словах A^* и \bar{A}^* , сущность которого состоит в использовании идентификационных параметров, вычисленных по синдромам для A^* и \bar{A}^* : по обнаружению наличия ошибок (неравенства нулю синдромов I_0 ($S \neq 0$)), по значению символов контроля четности $I_{кч}$, наличия одиночных $I_{д1}$, и двукратных несогласованных стираний (ошибок) $I_{д2}$.

Проведен анализ необходимых идентификационных параметров кодов для определения кратности несогласованных стираний в словах A^* и \bar{A}^* при $t_c = \{1 \dots 9\}$. Установлена возможность идентификации кратности несогласованных стираний в словах A^* и \bar{A}^* при использовании кодов с минимальным кодовым расстоянием $d = t_c + 1$ и двухканального метода идентификации ошибок. Установлено, что для коррекции стираний кратности $t_c = (3; 5; 7; 9)$ достаточно использования суммарного числа идентификационных параметров $\Sigma Ип = 2; 3; 4; 5$ соответственно.

На рисунках 3 и 4 приведены алгоритм синдромного двухканального метода декодирования кодов, корректирующих стирания с использованием кодовой идентификации кратности несогласованных стираний в словах (каналах) A^* и \bar{A}^* , и структурная схема устройства двухканального декодирования групповых кодов, корректирующих стирания кратности $t_c = 5$. Декодер содержит: $Pz.A^*$ и $Pz.\bar{A}^*$ – регистры хранения прямого и инверсного слов (A^* и \bar{A}^*) соответственно, БВС – блок вычисления синдрома, БКЧ – блок контроля значения четности, БИОО – блок идентификации одиночных ошибок, БЭИ – блок элементов И [3, 6, 13].

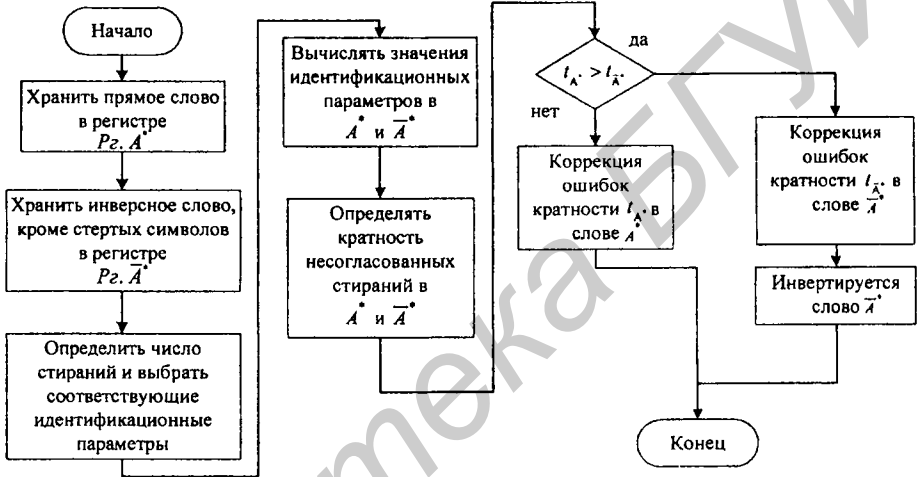


Рисунок 3 – Алгоритм двухканального декодирования групповых кодов, корректирующих стирания при одномерном кодировании информации

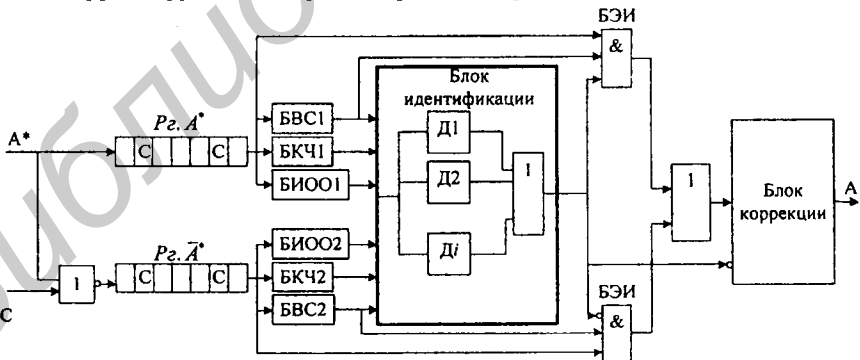
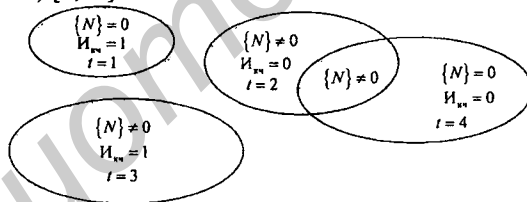


Рисунок 4 – Структурная схема устройства двухканального декодирования групповых кодов, корректирующих стирания

Показано, что с увеличением кратности корректируемых стираний t_c сложность устройства двухканального декодирования групповых кодов, корректирующих стирания, растет. Это связано с увеличением сложности реализации блока коррекции (декодер кода, исправляющий ошибки (несогласованных стираний t_{nc})). Однако быстроедействие предложенного устройства декодирования стираний высокое (на 2^6 тактов выше по сравнению с переборным декодером, поскольку декодирование стираний двухканальным декодером выполняется за один такт).

Для уменьшения сложности блоков коррекции и идентификации одиночных и двукратных ошибок предложен нормальный метод идентификации кратности несогласованных стираний в словах A^* и \bar{A}^* на основе БЧХ-кодов [9]. Сущность данного метода состоит в использовании в качестве идентификационных параметров норм N синдрома, определяющих наличие ошибок кратности $t=1; 2$ по норме синдрома I_{Nd1} и I_{Nd2} . Проведенные эксперименты по вычислению норм N для образующих векторов ошибок (несогласованных стираний) кратности $t_{nc} = \{1...5\}$ для БЧХ-кодов с $n=31$ и $d=6$ показали, что норма тройных ошибок не равна нулю $N_{t=3} \neq 0$ и отличается от нормы для ошибок кратности $t=1$, когда $N_{t=1} = 0$. При $S_1 = 0$ или $S_2 = 0$ норма не вычисляется, в этом случае тройные ошибки можно отличить по синдромам S_1 и S_2 ; по значению контроля четности можно отличать четные ошибки $t=2$ от нечетных $t=1; 3$. Поэтому для определения кратности ошибок достаточно вычислять норму N и контроль четности (рисунок 5) [9,14].



№	Число несогласованных стираний t_{nc} в		I_0	\bar{I}_0	$I_{кч}$	$\bar{I}_{кч}$	I_{Nd1}	\bar{I}_{Nd1}	Корректируемое слово
	A^*	\bar{A}^*							
1	5	0	1	0	1	0	0	0	\bar{A}^*
2	4	1	1	1	0	1	0	1	\bar{A}^*
3	3	2	1	1	1	0	0	0	\bar{A}^*
4	2	3	1	1	0	1	0	0	A^*
5	1	4	1	1	1	0	1	0	A^*
6	0	5	0	1	0	1	0	0	A^*

Рисунок 5 – Разделение множеств ошибок по значениям норм N , контроля четности $I_{кч}$ и неравенства нулю синдрома S_0 для БЧХ-кода с $n=31$ и $d=6$

Это позволяет использовать в качестве идентификационных параметров синдромы для обнаружения наличия ошибок (неравенства нулю синдромов I_0 ($S \neq 0$)), значения символов контроля четности $I_{нч}$, наличия одиночных $I_{н1}$ и двукратных ошибок $I_{н2}$, определяемых по норме синдромов, вычисляемых в словах A^* и \bar{A}^* , для $t_c = 7$ и предложить структурную схему устройства декодирования стираний в двух каналах с использованием норм синдромов (рисунок 6), где БВС1,2 – блоки вычисления синдромов, БКЧ1,2 – блоки контроля четности, БВНМ1,2 – блоки вычисления норм, БИКО1,2 – блоки идентификаций кратности ошибок [9]. Показано, что применение норменной идентификации позволяет в n (n – длина кодового слова) раз уменьшить сложность устройства декодирования по сравнению с использованием синдромного метода идентификации несогласованных стираний групповыми кодами [9].

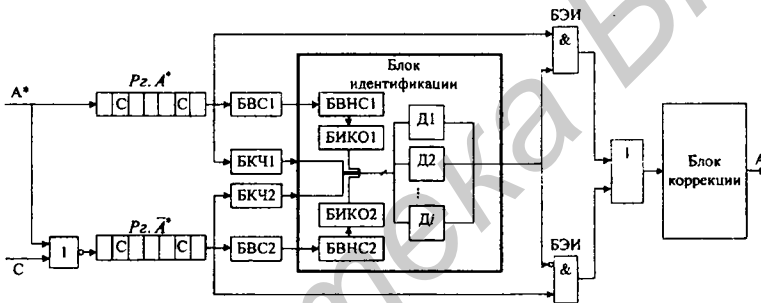


Рисунок 6 – Структурная схема устройства декодирования стираний в двух каналах с использованием норм синдромов

В *третьей главе* анализируются одно - и двухканальный методы исправления стираний при двумерном кодировании информации. Показано, что исправление стираний как ошибок кратности t_c двумерными кодами с одноканальным декодированием неэффективно из-за большой информационной избыточности используемых кодов, что обусловлено наличием некорректируемых комбинаций несогласованных стираний (ошибок), а также большой сложностью блока коррекции ошибок.

Предложено использовать двухканальное исправление стираний двумерными кодами (рисунок 7), которое основано на методе совместного использования идентификационных параметров по строкам и столбцам, для определения кратности несогласованных стираний в двумерных словах A_d^* и \bar{A}_d^* [5, 10, 11].

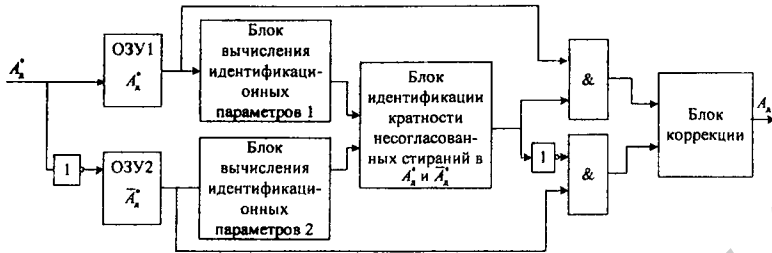


Рисунок 7 – Структурная схема декодера с двухканальным исправлением стираний двумерными кодами

Проведенный анализ [5, 10] показал возможность осуществить выбор слова A_d^* или \bar{A}_d^* с меньшим числом несогласованных стираний при декодировании строчных и столбцовых кодов. Установлено, что в качестве идентификационных параметров можно использовать значения неравенства нулю строчных и столбцовых синдромов ($I_0^{стр}, I_0^{стб}$) и наличие одиночных несогласованных стираний ($I_{d_1}^{стр}, I_{d_2}^{стб}$). Разработана библиотека образов несогласованных стираний в двумерном слове, которая отличается от известной библиотеки образов ошибок тем, что включает в себя библиотеки образов ошибок меньшей кратности [5, 10].

Установлены параметры строчных и столбцовых кодов С1 и С2, число идентификационных параметров двухканального декодера, а также кратность корректируемых несогласованных стираний t_c кодом С1 для исправления стираний кратности $t_c = \{3 \dots 7\}$ (таблица 2). Анализ данных таблицы 2 показывает, что при двухканальном декодировании стираний используются коды С1 и С2 с меньшими кодовыми расстояниями d_1 и d_2 при коррекции стираний кратности t_c по сравнению с одноканальным декодированием стираний двумерными кодами, что приводит к уменьшению избыточности кодов С1 и С2. Для коррекции стираний кратности $t_c = 3; 5$ достаточно использования одного идентификационного параметра при суммарном кодовом расстоянии $d_{\Sigma} = d_1 \cdot d_2 = d_{\Sigma \min} = t_c + 1$ кодов С1 и С2, а при $t_c \geq 7$ число идентификационных параметров $\Sigma ИП \geq 2$ и наблюдается рост суммарного кодового расстояния d_{Σ} [5]. На основе результатов по идентификации несогласованных стираний в прямом A_d^* и инверсном \bar{A}_d^* словах и параметров d_1, d_2 , показана возможность построения блока коррекции (рисунок 8). Достоинство данного метода декодирования заключается в том, что для исправления несогласованных стираний код С1 исправляет ошибки кратности $t_c - 1$ по строкам, а код С2 – одиночные стирания по столбцам. Это приводит к уменьшению вычислительной сложности блока коррекции по сравнению с одномерной коррекцией стираний групповыми кодами с двухканальной идентификацией несогласованных стираний, поскольку

используются коды с меньшей длиной и кратностью корректируемых несогласованных стираний [5, 10].

Таблица 2 – Параметры кодов С1 и С2 при двухканальной коррекции стираний кратности $t_c = \{3 \dots 7\}$ двумерными кодами

Кратность корректируемых стираний t_c и ошибок t_o		$d_{\Sigma \min} = d_1 \cdot d_2$	d_{Σ}	d_1	d_2	Идентификационные параметры и их число
t_c	t_o					
3	–	$4=2 \cdot 2$	4	2	2	$(I_o^{\text{стр}}, I_o^{\text{стб}}); 1$
5	1	$6=3 \cdot 2$	6	3	2	$(I_o^{\text{стр}}, I_o^{\text{стб}}); 1$
7	2	$8=4 \cdot 2$	10	5	2	$(I_o^{\text{стр}}, I_o^{\text{стб}}), (I_{d1}^{\text{стр}}, I_{d1}^{\text{стб}}); 2$

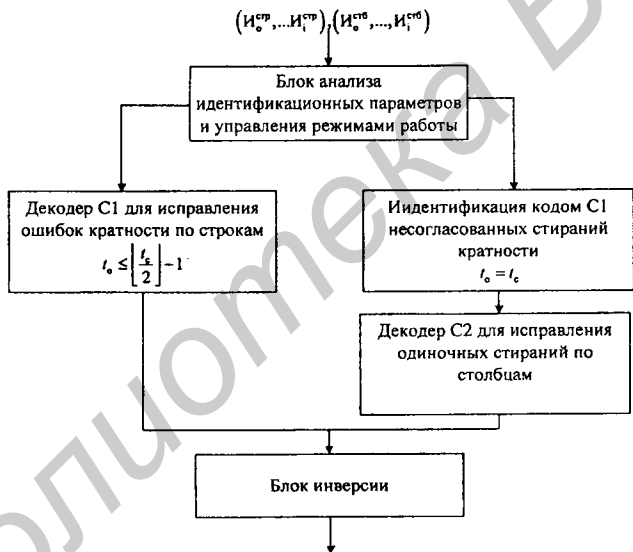


Рисунок 8 – Структурная схема блока коррекции при двухканальном декодировании стираний двумерными кодами при $t_c = \{3 \dots 7\}$

Предложены методы неравномерного двумерного кодирования информации с использованием одного кода для защиты всех зон и независимого кодирования каждой из зон (рисунки 9 и 10). Установлено, что использование метода независимого неравномерного кодирования эффективнее по сравнению с методом

двумерного кодирования информации с использованием одного кода для защиты всех зон, при небольшом увеличении избыточности кодов (1–2 %) позволяет:

1) увеличить количество зон защиты информации в зависимости от потребности применения;

2) при кодировании информации каждой зоны могут быть применены известные алгоритмы декодирования с использованием библиотек образов ошибок, что дает возможность уменьшить аппаратные и временные затраты на реализацию кодека;

3) уменьшить общее количество кодов, при увеличении числа зон защиты информации за счет использования одного и того же кода C_1 при кодировании по одной координате [2, 8].



Рисунок 9 – Двумерное неравномерное кодирование информации с одним кодом для защиты всех зон

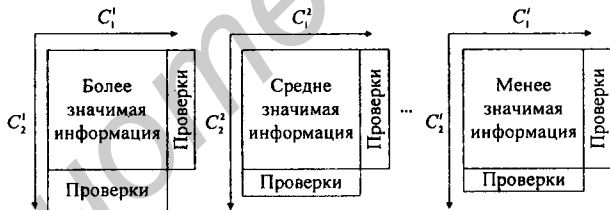


Рисунок 10 – Независимое неравномерное кодирование информации двумерными кодами

В *четвертой главе* рассматривается двухканальный метод мажоритарного декодирования групповых кодов, корректирующих стирания, сущность которого состоит в организации двух каналов (один из каналов состоит из двух подканалов А и Б) декодирования с мажоритарным принципом принятия решения. На вход первого канала декодирования поступают кодовые символы группового кода, сформированные на основе жесткого принятия решения на выходе демодулятора с указанием позиций местоположения стертых символов. На рисунке 11 приведена обобщенная структурная схема канального декодера группового кода. На входы подканалов А и Б второго канала декодирования поступают кодовые символы, сформированные на основе нежесткого (квантованного) принятия решения на выходе демодулятора. Квантование выходных сигналов демодулятора

осуществляется на четыре уровня с равным шагом квантования с объединением второй (II) и третьей (III) зон квантования в одну зону стирания [4, 12].

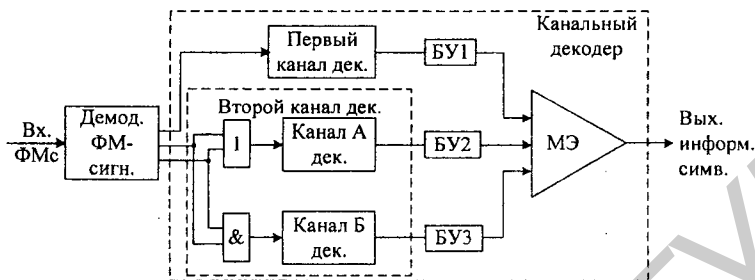
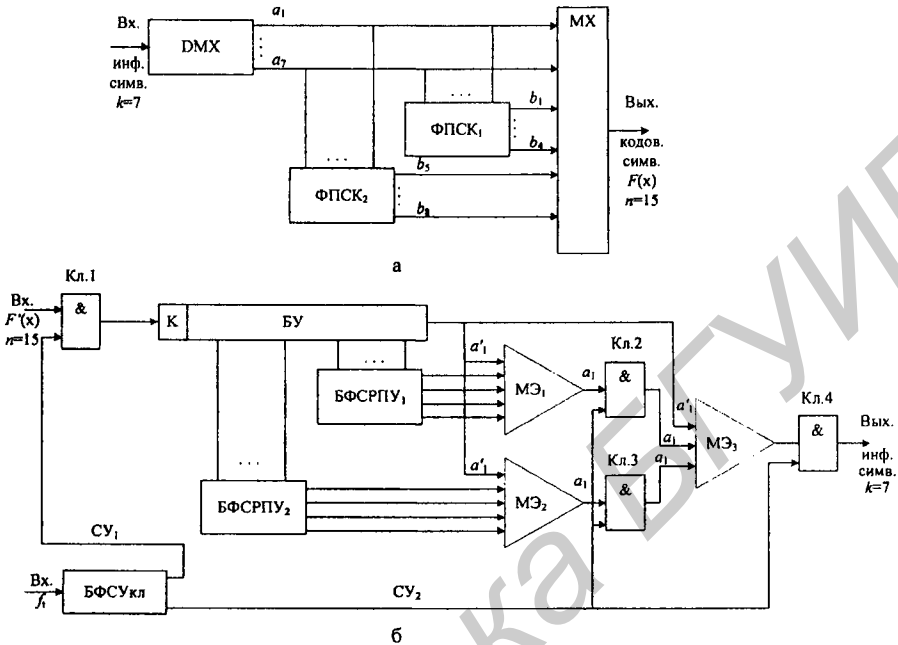


Рисунок 11 – Обобщенная структурная схема декодера, реализующего двухканальный метод мажоритарного декодирования групповых кодов, корректирующих стирания

Установлено, что при использовании двухканального метода мажоритарного декодирования групповых кодов, корректирующих стирания, максимальный энергетический выигрыш от кодирования (ЭВК) равен 3,67 дБ при вероятности ошибок в канале, равной $P_k = 5 \cdot 10^{-3}$. При $P_k = 5 \cdot 10^{-3}$ ЭВК, равные 1,2 дБ и 3,2 дБ, обеспечиваются при использовании соответственно первого канала декодирования и жесткого (неквантованного) принятия решения на выходе демодулятора и второго канала декодирования и квантованного принятия решения на выходе демодулятора [4, 12].

Предложен метод N -канального кодирования и декодирования БЧХ-кодов на основе использования примитивных полиномов (рисунок 12). Сущность данного метода основана на организации $N(N \geq 2)$ – канального кодера БЧХ-кода с возможностью реализации как синдромного, так и мажоритарного алгоритмов декодирования, обеспечивающих высокую достоверность передачи информации и скорость декодирования, при использовании примитивных полиномов $m_i(x) = x^\varepsilon + x^{\varepsilon-1} + \dots + 1, i=1; 2; 5; \dots$, где ε – порядок корней порождающего полинома БЧХ-кода $P(x) = \text{НОК}[m_1(x), m_2(x), \dots, m_{i=(d_0-1)/2}(x)]$ [1, 7].

Результаты моделирования показывают, что при $P_k = 5 \cdot 10^{-3}$ использование мажоритарного алгоритма декодирования N -канального БЧХ-кода обеспечивает вероятность ошибочного декодирования $P_{\text{ош.дек.к}} = 1,43 \cdot 10^{-8}$, а вероятность ошибочного декодирования одноканального декодера с синдромным алгоритмом декодирования $P_{\text{ош}} = 1,62 \cdot 10^{-6}$. Это обеспечивает повышение достоверности передачи информационных символов в $q = P_{\text{ош}} / P_{\text{ош.дек.к}} = 1,16 \cdot 10^2$ раз, или получение дополнительного ЭВК, равного 0,6 дБ (при $P_{\text{ош.дек.к}} = 1,43 \cdot 10^{-8}$) [1, 7].



а – кодер; б – декодер

Рисунок 12 – Структурные схемы двухканального кодера БЧХ-кода

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Предложен метод двухканального декодирования групповых кодов, корректирующих стирания, позволяющий осуществлять коррекцию стираний в прямом A^* или инверсном \bar{A}^* слове с меньшими вычислительными затратами по сравнению с переборным методом коррекции многократных стираний при одномерном и двумерном кодировании информации [3, 5].

2. На основе предложенного метода разработаны алгоритм и устройство двухканального декодирования групповых кодов, корректирующих стирания. Показано, что декодирование выполняется в 2^6 раз быстрее по сравнению с переборным декодером, исправляющим стирания. Предложено для идентификации кратности несогласованных стираний в словах A^* и \bar{A}^* при одномерном кодировании информации использовать БЧХ-код с нормальным методом вычисления идентификационных параметров и декодированием. Это

позволяет уменьшить сложность двухканального декодера в n раз (n – длина кода) по сравнению с синдромным методом вычисления идентификационных параметров групповыми кодами [3, 9, 6, 13, 14, 15].

3. Предложен синдромный метод вычисления идентификационных параметров по обнаружению ошибок, их четности и кратности в прямом A^* и инверсном \bar{A}^* словах. Показана возможность их использования для определения кратности несогласованных стираний групповых кодов с минимальным кодовым расстоянием $d = t_c + 1$ для $3 \leq t_c \leq 7$ [3, 6].

4. Предложен метод совместного использования идентификационных параметров по строкам и столбцам для определения кратности несогласованных стираний в двумерных словах A_n^* и \bar{A}_n^* при двухканальном декодировании групповых кодов. Показано, что для коррекции стираний кратности $t_c = 3; 5; 7$ достаточно применения кодов C1 и C2 с кодовыми расстояниями $d_1 = 2; 3; 5$; $d_2 = 2$. Установлено, что для коррекции стираний кратности $t_c = 3; 5$ достаточно одного идентификационного параметра по обнаружению ошибок, а для $t_c = 7$ – двух: по обнаружению ошибок и идентификации одиночных ошибок кодом C1. Это позволяет уменьшить информационную избыточность и упростить декодер на 40–50 % по сравнению с одноканальной коррекцией стираний групповыми кодами [5, 10, 11].

5. Показано, что при неравномерном двумерном кодировании информации независимое кодирование каждой из зон является предпочтительным, т.к. обеспечивает близкое к оптимальному определение параметров кодов в каждой зоне защиты информации и возможность применения известных методов двумерного декодирования [2, 8].

6. Предложен двухканальный метод мажоритарного декодирования групповых кодов, корректирующих стирания, и мажоритарный декодер с двумя степенями декодирования, обеспечивающие энергетический выигрыш от кодирования в 3,67 дБ и повышение на порядок достоверность передачи данных по сравнению с использованием декодера с одной степенью декодирования [4, 12].

7. Предложен метод N -канального кодирования и декодирования БЧХ-кодов на основе использования примитивных полиномов. Установлено, что при коррекции ошибок предложенным методом обеспечивается более чем на два порядка повышение достоверности передаваемых данных [1, 7].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Установлено, что метод двухканального декодирования групповых кодов на основе идентификации кратности несогласованных стираний в прямом A^* и

инверсном \bar{A} словах и выбора для декодирования слова с меньшим числом ошибок позволяет уменьшить аппаратные и временные затраты на реализацию декодеров, что может быть использовано в телекоммуникационных системах с высокими требованиями к быстродействию схем коррекции и вероятности ошибочного декодирования.

2. Предложенные алгоритмы и устройства для коррекции несогласованных стираний на основе двухканального декодирования при одномерном и двумерном кодировании могут быть использованы в спутниковых и космических системах связи при передаче видеоданных, а также в системах обработки и хранения информации с картами дефектности ячеек памяти и высокими требованиями к вероятности ошибочного декодирования и быстродействию схем коррекции.

3. Предложен гибридный алгоритм декодирования БЧХ-кодов, обеспечивающий высокий ЭВК и скорость обработки информации и может быть использован в современных телекоммуникационных системах.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных рецензируемых журналах

1. Королев, А.И. Мажоритарный декодер циклического кода с двухэтапной оценкой достоверности информационных символов / А.И. Королев, В.К. Конопелько, Н.А. Салас, Е.Г. Макейчик, К.И. Пирогов // Доклады БГУИР. – 2012. – № 1 (63). – С. 86-91.
2. Салас Валор, Нестор Альфредо Схемы неравномерного кодирования информации двумерными кодами / Нестор Альфредо Салас Валор, В.К. Конопелько, А.И. Королев // Доклады БГУИР. – 2012. – № 3 (65). – С. 91-97.
3. Салас, Н.А. Коррекция стираний кодами с общей проверкой четности на основе идентификации кратности ошибок в прямом и инверсном каналах декодирования / Н.А. Салас, В.К. Конопелько, А.И. Королев // Доклады БГУИР. – 2013. – № 1 (71). – С. 33-38.
4. Салас, Н.А. Весовое декодирование циклических кодов с использованием квантованных сигналов демодулятора ФМ-сигналов / Н.А. Салас, А.И. Королев, В.К. Конопелько // Доклады БГУИР. – 2013. – № 6 (76). – С. 48-54.
5. Салас, Н.А. Двумерная коррекция стираний с идентификацией кратности ошибок в прямом и инверсном каналах декодирования / Н.А. Салас, В.К. Конопелько, А.И. Королев // Доклады БГУИР. – 2013. – № 8 (78). – С. 35-39.

Тезисы докладов и материалы конференций

6. Салас, Н.А. Защита данных при помощи кодов, исправляющих стираний как ошибок / Н.А. Салас, А.В. Шкиленок // Технические средства защиты информации: тезисы докладов IX Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 28-29 июня 2011 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиозлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2011. – С. 53-54.
7. Королев, А.И. Кодирование и декодирование БЧХ-кодов на основе использования примитивных полиномов / А.И. Королев, В.К. Конопелько, Н.А. Салас, Е.Г. Макейчик // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы Междунар. науч.-техн. семинара, Минск, январь–декабрь 2011 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиозлектроники; редкол.: В.Ф. Голенков [и др.]. – Минск, 2011. – С. 5-10.
8. Салас Валор, Нестор Альфредо Неравная защита данных при помощи неравномерного двумерного кодирования информации / Нестор Альфредо Салас

Валор // Технические средства защиты информации: тезисы докладов X Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 29-30 мая 2012 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2012. – С. 48-49.

9. Салас, Н.А. Применение норм синдромов для идентификации кратности ошибок при коррекции стираний БЧХ-кодами / Н.А. Салас, В.К. Конопелько, А.И. Королев // Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных: материалы Междунар. науч.-техн. семинара, Минск, январь–декабрь 2012 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: М.Н. Бобов [и др.]. – Минск, 2012. – С. 22-26.

10. Салас Валор, Нестор Альфредо Коррекция стираний при двумерном кодировании информации / Нестор Альфредо Салас Валор, В.К. Конопелько // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем: материалы 1-й Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 28–30 марта 2013 г. / Московский. гос. тех. ун-т радиотехники, электроники и автоматики; редкол.: Г.В. Куликов [и др.]. – М., 2013. – С. 139-142.

11. Салас Валор, Нестор Альфредо Защита данных при помощи итеративных кодов с исправлением стираний / Нестор Альфредо Салас Валор // Технические средства защиты информации: тезисы докладов XI Белорусско-российской науч.-техн. конф., Минск, 5-6 июня 2013 г. / Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники; редкол.: Л.М. Лыньков [и др.]. – Минск: БГУИР, 2013. – С. 45.

Патенты

12. Устройство мажоритарного декодирования с мягким решением на выходе канала связи: пат. № 8653 U РБ, МПК(2006): Н 03М 13/43 / А.И. Королев, В.К. Конопелько, Нестор Альфредо Салас Валор, Хоанг Нгок Зьонг, Е.Г. Макейчик, А.А. Борискевич; заявитель Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – № u 20120089; заявл. 31.01.2012; опубл. 30.10.2012 // Официальный бюллетень / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 5. – С. 248.

13. Устройство коррекции многократных стираний: пат. № 9428 U РБ, МПК(2006): Н 03М 13/00 / Нестор Альфредо Салас Валор, В.К. Конопелько, А.И. Королев, Хоанг Нгок Зьонг; заявитель Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – № u 20130022; заявл. 30.01.2013; опубл. 30.08.2013 // Официальный бюллетень / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 4. – С. 278.

14. Устройство норменного декодирования двукратных ошибок БЧХ-

кодами: пат. № 9436 УРБ, МПК(2006): Н 04L 1/10 / Хоанг Нгок Зьонг, В.К. Конопелько, А.И. Королев, Нестор Альфредо Салас Валор; заявитель Беларус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – № u 20130032; заявл. 10.01.2013; опубл. 30.08.2013 // Официальный бюллетень / Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 4. – С. 278.

15. Устройство коррекции многократных стираний: положительное решение на выдачу патента № 9961 У. РБ, МПК(2006): Н 03М 13/00 / Салас Валор Нестор Альфредо, В.К. Конопелько, А.И. Королев, Хоанг Нгок Зьонг; заявитель Беларус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники. – № u 20130528; заявл. 18.06.2013.



РЭЗІЮМЭ

Салас Валор Нестар Альфрэда ДВУХКАНАЛЬНАЯ КАРЭКЦЫЯ СЦІРАННЯЎ І ПАМЫЛАК ПЕРАШКОДАЎСТОЙЛІВЫМІ КОДАМІ

Ключавыя словы: двухканальнае дэкадаванне, ідэнтыфікацыя памылак, выпраўленне сціранняў, ідэнтыфікацыйныя параметры, прамое слова, інверснае слова.

Мэтай з'яўляецца распрацоўка метадаў, алгарытмаў і ўстройстваў двухканальнай карэкцыі сціранняў кодамі, выпраўляючымі памылкі пры аднамернай і двухмернай апрацоўцы інфармацыі для павышэння памехаўстойлівасці тэлекамунікацыйных сістэм і сетак.

Распрацован метадаў дэкадавання групавых кодаў, карэкціруючых сціранні, які дазваляе ажыццяўляць карэкцыю сціранняў у прамым A^* ці інверсным \bar{A}^* слове ў 2^k разоў хутчэй у параўнанні з пераборным метадам карэкцыі шматразовых сціранняў. Распрацован сіндромны метадаў вылічэння ідэнтыфікацыйных параметраў па выяўленні памылак, іх цотнасці і кратнасці ў прамым A^* і інверсным \bar{A}^* словах. Распрацаваны алгарытм і ўстройства двухканальнага дэкадавання групавых кодаў, карэкціруючых сціранні. Прапанаваны нормены метадаў дэкадавання ідэнтыфікацыі кратнасці няўзгодненых сціранняў, які дазваляе паменшыць складанасць двухканальнага дэкодэра ў n разоў (n – даўжыня кода) у параўнанні з сіндромным метадам вылічэння ідэнтыфікацыйных параметраў групавымі кодамі. Распрацаваны метадаў сумеснага выкарыстання ідэнтыфікацыйных параметраў па радках і слупках для вызначэння кратнасці няўзгодненых сціранняў у двухмерных словах A_n^* і \bar{A}_n^* пры двухканальным дэкадаванні групавых кодаў. Паказана, што для карэкцыі сціранняў кратнасці $t_c = 3; 5; 7$ досыць прымянення кодаў C_1 і C_2 з кодавымі адлегласцямі $d_1 = 2; 3; 5$ і $d_2 = 2$, якія дазваляюць паменшыць інфармацыйны лішак на 40–50 % у параўнанні з аднаканальнай карэкцыяй сціранняў групавымі кодамі пры двухмерным кадаванні. Распрацаваны двухканальны метадаў мажорытарнага дэкадавання групавых кодаў, карэкціруючых сціранні, які забяспечвае энергетычны выйгрыш ад дэкадавання ў 3,67 дБ. Распрацаваны метадаў N -канальнага кадавання і дэкадавання БЧХ-кодаў на аснове выкарыстання прымітыўных поліномаў. Устаноўлена, што алгарытм дэкадавання прапанаванага метадаў забяспечвае больш чым на два парадкі павышэнне дакладнасці перадачы даных.

РЕЗЮМЕ

Салас Валор Нестор Альфредо ДВУХКАНАЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ СТИРАНИЙ И ОШИБОК ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫМИ КОДАМИ

Ключевые слова: двухканальное декодирование, идентификация ошибок, исправление стираний, идентификационные параметры, прямое слово, инверсное слово.

Целью работы является разработка методов, алгоритмов и устройств двухканальной коррекции стираний кодами, исправляющими ошибки при одномерной и двумерной обработке информации для повышения помехоустойчивости телекоммуникационных систем и сетей.

Разработан метод двухканального декодирования групповых кодов, корректирующих стирания, позволяющий осуществлять коррекцию стираний в прямом A^* или инверсном \bar{A}^* слове в 2^c раз быстрее по сравнению с переборным методом коррекции многократных стираний. Разработан синдромный метод вычисления идентификационных параметров по обнаружению ошибок, их четности и кратности в прямом A^* и инверсном \bar{A}^* словах. Разработаны алгоритм и устройство двухканального декодирования групповых кодов, корректирующих стирания. Предложен норменный метод двухканальной идентификации кратности несогласованных стираний, позволяющий уменьшить сложность двухканального декодера в n раз (n – длина кода) по сравнению с синдромным методом вычисления идентификационных параметров групповыми кодами. Разработан метод совместного использования идентификационных параметров по строкам и столбцам для определения кратности несогласованных стираний в двумерных словах A_n^* и \bar{A}_n^* при двухканальном декодировании групповых кодов. Показано, что для коррекции стираний кратности $t_c = 3; 5; 7$ достаточно применение кодов C1 и C2 с кодовыми расстояниями $d_1 = 2; 3; 5$ и $d_2 = 2$, позволяющие уменьшить информационную избыточность на 40–50 % по сравнению с одноканальной коррекцией стираний групповыми кодами при двумерном кодировании. Разработан двухканальный метод мажоритарного декодирования групповых кодов, корректирующих стирания, обеспечивающий энергетический выигрыш от декодирования 3,67 дБ. Разработан метод N -канального кодирования и декодирования БЧХ-кодов на основе использования примитивных полиномов. Установлено, что алгоритм декодирования предложенного метода обеспечивает более чем на два порядка повышение достоверности передачи данных.

SUMMARY

Salas Valor Nestor Alfredo

TWO CHANNELS ERRORS AND ERASURES CORRECTION BY ERROR CORRECTIONS CODES

Key words: two-channel decoding, error identification, erasure correction, identification parameters, direct codeword, inverse codeword.

The object of this work is development methods, algorithms and devices for two-channel erasures correction by forward error correction codes at one-dimensional and two-dimensional information processing to increase the noise immunity of the telecommunication systems and networks.

A method for two-channel decoding of group codes, for correcting erasure, which allow the correction in the forward A^* or reverse \bar{A}^* codewords of erasures 2^l times faster than the linear search method for correcting multiple erasures is developed. Syndromic method for identification parameters calculations by the detection of errors, their parity, and multiplicity in the forward A^* and inverse \bar{A}^* words is developed. Algorithm and device for two-channel decoding of group codes for erasures correction are developed. Norm method for two-channel identification of error multiplicity, which allows to reduce the complexity of the dual-channel decoder n times (n – code length), compared with the syndromic method of identification parameters calculation by group codes is proposed. A method of simultaneous uses of rows and columns identification parameters to determine the multiplicity of error in two-dimensional codewords A_n^* and \bar{A}_n^* at two-channel decoding of group codes is developed. It is shown that for correcting erasures multiplicity $t_e = 3; 5; 7$ enough use codes C1 and C2 with code-distances $d_1 = 2; 3; 5$ and $d_2 = 2$, which reduce information redundancy in 40–50 % compared to the single-channel erasure correction of group codes in two-dimensional decoding. A two-channel method for majority decoding of group codes with erasure correction, which provides gain decoding energy equal 3.67 dB and improves reliability of data transmission procedure, compared with the use of a decoder with a single stage of decoding is developed. A method of N-channel coding and decoding of BCH codes based on the use of primitive polynomials is developed. Found that the decoding algorithm of proposed method provides more than two orders of magnitude increase in reliability of data transmission.

Научное издание

САЛАС ВАЛОП Нестор Альфредо

**ДВУХКАНАЛЬНАЯ КОРРЕКЦИЯ СТИРАНИЙ И ОШИБОК
ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫМИ КОДАМИ**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 19.02.2014.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,63.
Уч.-изд. л. 1,5.	Тираж 60 экз.	Заказ 51.

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. Бровка, 6