

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАТИКИ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»

УДК 621.391. (075.8)

СМОЛЯКОВА Ольга Георгиевна

**КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК И СТИРАНИЙ
ПРИ ДВУМЕРНОМ КОДИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.13.13 – «Телекоммуникационные системы и
компьютерные сети»

Минск 2009

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 Станислав Феликсович**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, ГНУ «Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси»

Захаров Владимир Владимирович, кандидат технических наук, директор ЗАО «Творческая лаборатория»

Оппонирующая организация: учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится 4 марта 2010 года в 14 : 00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.06 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, ауд. 232-1, e-mail: dissovet@bsuir.by, тел. 293-89-89.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан « 3 февраля 2010 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент

А.А.Борискевич

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Двумерное кодирование информации находит широкое применение в цифровых телекоммуникационных системах и компьютерных сетях благодаря возможности коррекции многократных ошибок. Однако, существующие двухэтапные методы обработки используемых кодов при двумерном кодировании не позволяют полностью реализовать их корректирующие возможности и требуют высоких вычислительных затрат на схемы коррекции. Необходимость коррекции многократных ошибок в телекоммуникационных системах и компьютерных сетях для повышения информационной надежности обуславливает актуальность темы диссертации. В работе исследуются методы и алгоритмы исправления многократных ошибок и стираний, позволяющие реализовать достаточно простые и быстродействующие схемы коррекции на основе формирования библиотеки образов ошибок, их идентификации и коррекции.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами

Исследования проводились в рамках Государственной комплексной программы научных исследований «Национальная безопасность» (2006 г. –наст. вр. № г. р. 20066846), по НИР ГБЦ 06-3106 «Исследование особенностей и разработка алгоритмов функционирования и программно-технических средств для силовых ведомств с целью их использования в телекоммуникационных системах с общим и санкционированным доступом», а также в рамках научно-исследовательской госбюджетной темы ГБ 06-2033 «Разработка методов обработки, передачи и распределения мультимедийной информации».

Цель и задачи исследования

Целью настоящей диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов коррекции ошибок и стираний при двумерном кодировании информации на основе формирования библиотек образов ошибок, их идентификации и коррекции для повышения информационной надежности телекоммуникационных систем и компьютерных сетей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методы, алгоритмы и библиотеку образов случайных ошибок при двумерном кодировании;
- разработать идентификационные параметры для библиотек образов ошибок в зависимости от свойств применяемых кодов;
- разработать методы, алгоритмы, библиотеки правил и устройства коррекции ошибок и стираний.

Предметом исследования является двумерная обработка информации, основанная на применении образов ошибок. Объектами исследования настоящей работы являются методы и средства коррекции ошибок и стираний на основе библиотек образов ошибок, идентификационных параметров и правил коррекции. Выбор перечисленных объектов исследования обусловлен актуальностью проблемы повышения информационной надежности телекоммуникационных систем и компьютерных сетей. Эффективным подходом к решению этой проблемы является применение библиотечных методов и алгоритмов коррекции многократных ошибок и стираний при двумерном кодировании информации, позволяющие перенести наиболее затратные по времени операции при декодировании на подготовительный этап.

Положения, выносимые на защиту

1. Методы и алгоритмы определения образов ошибок, представляющих собой таблицы местоположения ошибок, при двумерном кодировании, позволяющие вычислять безызбыточные библиотеки образов ошибок, независимые от длины обрабатываемых кодов. Для кратности ошибок $t=2÷6$ число образов ошибок равно 3;6;16;34;90 соответственно, что в $10^3 ÷ 10^{14}$ раз меньше числа векторов ошибок по сравнению с одномерным кодированием информации для длин кодов $n=127÷1023$.

2. Метод и алгоритмы идентификации образов ошибок, которые в зависимости от размерности идентификационного вектора и кодовых расстояний (d_1, d_2) кодов C_1, C_2 позволяют распознавать образы ошибок и их группы. Наилучшие результаты идентификации образов ошибок достигаются для кратности ошибок $t=3÷6$, когда $(d_1, d_2)=(4;2),(3;3),(6;3),(7;4)$ соответственно.

3. Методы, алгоритмы и правила библиотечной коррекции ошибок и стираний, позволяющие реализовать наиболее затратные по времени операции на подготовительном этапе, что на этапе коррекции ошибок и стираний дает возможность иметь небольшие вычислительные затраты, уменьшить число отказов от декодирования от пяти до нуля при возможности коррекции ошибок или только стираний в зависимости от кодовых расстояний кодов C_1, C_2 .

4. Метод, алгоритмы и устройство норменного декодирования кодов, основанного на применении циклотомических классов, позволяющее использовать для селективного только одну норму из множества норм синдромов.

Личный вклад соискателя

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад автора. В совместно опубликованных работах автору принадлежат: разработка методов, алгоритмов вычисления образов ошибок; методов и алгоритмов идентификации и коррекции ошибок и стираний, правил декодирования ошибок. Соавтором основных публикаций автора является научный руководитель, профессор, д.т.н.

В.К. Конопелько, который осуществлял определение целей и постановку задач исследования, выбор методов исследований, принимал участие в планировании работ и обсуждении результатов.

Апробация результатов диссертации

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: международной научно-технической конференции, посвященной 45-летию МРТИ-БГУИР (2009 г.), международной школе-семинаре аспирантов, магистрантов и студентов (Минск: 2007, 2008); международном научно-техническом семинаре: «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных» (Минск, БГУИР: 2007, 2008, 2009 г.), VI, VII белорусско-российской научно-технической конференции «Технические средства защиты информации» (Минск: 2008, 2009).

Опубликованность результатов диссертации

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликовано 7 печатных работ, в том числе: 4 статьи в научных журналах общим объемом 1,8 авторских листа; 1 тезисы доклада в материалах международной научно-технической конференции; 1 статья в материалах международного научно-технического семинара; получено положительное решение на выдачу патента.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. В первой главе проведен анализ проблем коррекции ошибок и стираний в телекоммуникационных системах и компьютерных сетях. Во второй главе предложены методы и алгоритмы вычисления образующих векторов образов ошибок, метод и алгоритмы формирования безызыточной библиотеки образов ошибок, вычислена библиотека образов ошибок для $t=2\div 6$. В третьей главе предложены параметры, используемые для идентификации образов ошибок, представлены методы и алгоритмы идентификации образов ошибок с фиксированными и избыточными параметрами, а также разработана библиотека идентификационных параметров образов ошибок для $t=2\div 6$. В четвертой главе предложены метод и алгоритмы жесткого и адаптивного трехэтапного декодирования кодов, метод и алгоритмы коррекции образов ошибок с фиксированными и избыточными параметрами, метод и устройство норменного декодирования с использованием циклотомических классов. Общий объем диссертационной работы составляет 187 страниц, из которых 60 страниц текста, 72 рисунка на 29 страницах, 29 таблиц на 13 страницах, 5 приложений на 73 страницах, библиография из 165 наименований на 12 страницах, включая 7 публикаций автора на 1 странице.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе проведен анализ повышения информационной надежности в телекоммуникационных системах и компьютерных сетях с помощью методов и алгоритмов обработки, основанных на помехоустойчивом кодировании информации. Показано, что при использовании одномерного кодирования информации с ростом длины кода n и кратности корректируемых ошибок t возникает «проблема сложности селектора», когда по вычисленному синдрому необходимо найти вектор ошибок. Уменьшить сложность селектора в n раз можно при использовании норменного декодирования, однако, при этом множество норм синдромов увеличивается с ростом кратности корректируемых ошибок.

Показано, что уменьшение сложности селектора также возможно при применении двумерного кодирования, при котором информация представляется в виде таблицы, строки и столбцы которой кодируются кодами $C1$ и $C2$ с кодовыми расстояниями $d1$ и $d2$ (суммарное кодовое расстояние при двумерном кодировании $d_{\Sigma} = d1 \cdot d2$, что позволяет гарантированно исправить $t = d-1/2$ ошибок). Отмечается, что применение двухэтапного декодирования с коррекцией многократных ошибок и стираний дает возможность уменьшить вычислительные затраты на реализацию схем коррекции за счет увеличения вводимой информационной избыточности наряду с невозможностью коррекции отдельных «конфигураций» (образов) ошибок в пределах d_{Σ} (под «стиранием» понимается ошибка, местоположение которой известно, но не известно ее истинное состояние «0» или «1»; это позволяет при применении одного и того же кода исправить в два раза больше стираний, чем ошибок). Показывается необходимость проведения исследований по созданию библиотек образов случайных ошибок, их идентификации, правил обработки кодов $C1$ и $C2$, корректирующих ошибки и стирания при двумерном кодировании информации.

Во второй главе определяются методы, правила и алгоритмы вычисления безызбыточной библиотеки образов ошибок, что позволяет уменьшить число селектируемых образов. Образ ошибок определяется как двумерное табличное изображение ошибок, получаемое из одномерного вектора ошибок (E) путем его представления в виде таблицы и вычеркивания безошибочных строк и столбцов (рисунок 1).

$$E = (00100 : 00000 : 00100 : 10000)$$

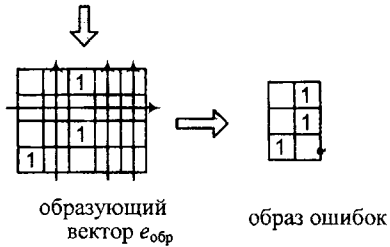


Рисунок 1 – Образ ошибок

Показано, что один и тот же образ ошибок может образовываться из нескольких векторов ошибок с различным местоположением ошибок одинаковой кратности. Так, например, для кратности ошибок $t=2;6$ существуют соответственно 6 и 1947792 образов ошибок, которые являются избыточными. Два или более образов ошибок являются одинаковыми, если их можно преобразовать к одному путем перестановки строк и столбцов, благодаря чему можно сформировать безыбыточную библиотеку образов ошибок. Нахождение безыбыточной библиотеки образов ошибок осуществляется с использованием образующих векторов двумерных ошибок $e_{обp}$ и распределению их на множества, которые формируют одинаковые образы.

Предложено правило формирования образов ошибок, с помощью которого образующие вектора распределяются по группам, содержащим образы с одинаковым числом строк, и классам внутри группы, содержащим образующие вектора, являющиеся циклическими сдвигами друг друга, но без нулевых блоков кратности t .

Определено правило сравнения образов разных классов для определения, являются ли образы типичными или нетипичными. Два образа ошибок называются нетипичными, если сумма ошибочных позиций по строкам и столбцам таких образов без учета порядка следования одинакова, однако, один образ нельзя получить из другого путем перестановки строк и столбцов; в случае типичных образов один образ образуется из другого путем перестановки строк и столбцов. Сравнивая образы между классами и оставляя любой один из нескольких типичных формируется безыбыточная библиотека образов ошибок.

Показано, что скорость вычисления безыбыточной библиотеки образов ошибок зависит числа обрабатываемых образующих векторов. Предложены переборный, быстрый и позиционный методы генерации образующих векторов ошибок. Согласно переборному методу получить полное множество образующих векторов для ошибок кратности t можно, перебрав все возможные перестановки t ошибок на длине $n_j=t \cdot t$. При быстром методе формирования образующих векторов ошибок используется правило генерации образующих векторов, при котором

вектора генерируются в определенном порядке (рисунок 2), и использовании только первых $(n_1-1)!/(t-1)!/(n_1-t)!$ образующих векторов ошибок. Анализ показывает, что при применении правила быстрой генерации образующих векторов увеличение быстродействия происходит в t раз. При позиционном методе генерации образующих векторов ошибок исключаются из множества всех векторов те вектора, сгенерированные при использовании быстрого метода, порядковый номер которых равен $1, x/2+1 \dots x/2+x/4+1$ (x – число векторов сокращаемого набора). В таблице 1 приведено число образующих векторов ошибок в зависимости от кратности ошибок t и метода формирования.

```

(111000000)
110100000
...
110000001
...
101100000
101010000
...
000000111)
    
```

Рисунок 2 – Правило генерации образующих векторов ошибок ($t=3$)

Таблица 1 – Число образующих векторов ошибок в зависимости от кратности ошибок при применении методов формирования $e_{обр}$.

Методы формирования $e_{обр}$	Число $e_{обр}$ в зависимости от кратности ошибки t				
	2	3	4	5	6
Переборный	6	84	1820	53120	1947792
Быстрый	3	28	455	10626	324632
Порядковый	3	10	117	2660	81161

Предложен метод формирования библиотеки образов ошибок, сущность которого состоит в классификации образующих векторов ошибок $e_{обр}$ по группам и классам, разделении на типичные и нетипичные образы, исключении повторяющихся типичных образов ошибок; оставшиеся образы классов формируют безызбыточную библиотеку образов ошибок кратности t . Алгоритм формирования библиотеки образов ошибок приведен на рисунке 3.

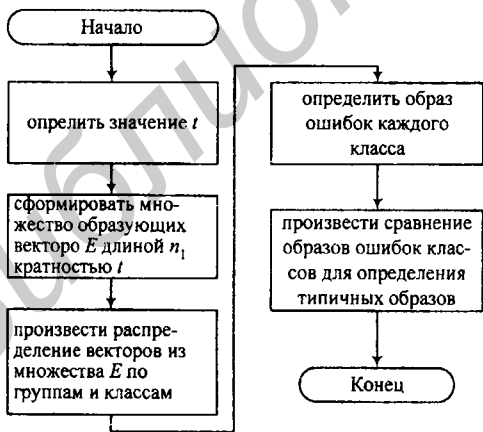


Рисунок 3 – Алгоритм формирования библиотеки образов ошибок

Для составления библиотеки образов ошибок проведен вычислительный эксперимент, в результате чего была получена безызбыточная библиотека образов ошибок. Библиотеки образов, полученные с

помощью трех вышеперечисленных методов формирования образующих векторов совпали. В таблице 2 приведено число селективируемых синдромов при одномерном кодировании и число образов ошибок в зависимости от кратности ошибок t .

Таблица 2 – Число образов ошибок в зависимости от кратности ошибок t

t	Число селективируемых комбинаций при одномерном кодировании информации		число образов ошибок
	$n=127$	$n=1023$	
2	8 001	522 753	3
3	333 375	177 910 271	6
4	10 334 625	45 367 119 105	16
5	254 231 775	9 245 818 873 599	34
6	5 169 379 425	1 568 707 268 887 297	90

Анализ данных таблицы 2 показывает, что число образов не зависит от длины кода и в $10^3=10^{14}$ раз меньше по сравнению с селективированием синдромов при одномерном кодировании информации.

В главе 3 исследуется идентификация библиотечных образов ошибок. Вводятся понятия одно-, двух- и трехмерных идентификационных векторов образов ошибок $I=(I_1)$, $I=(I_1, I_2)$, $I=(I_1, I_2, I_3)$, где $I_1=(w_1, w_2)$ $I_2=(w_3, w_4)$ $I_3=(w_5, w_6)$, $((w_1, w_2)$ – число ошибочных строк и столбцов, (w_3, w_4) – число строк и столбцов с четным/нечетным количеством ошибок, (w_5, w_6) – число строк и столбцов в которых содержится одиночная ошибка). Так для образа ошибок кратностью $t=4$, представленного на рисунке 4, идентификационный вектор $I = (I_1, I_2, I_3) = ((3,4), (1,0), (2,4))$.

1	1		
		1	
			1

Рисунок 4 – Образ ошибок ($t=4$)

Вычислены значения идентификационных векторов $I=(I_1)$, $I=(I_1, I_2)$ и $I=(I_1, I_2, I_3)$ без учета кодовых свойств кодов C1, C2. В таблице 3 приведены значения идентификационных векторов $I=(I_1, I_2, I_3)$ для образов ошибок кратности $t=5$. Анализ полученных данных показывает, что образы делятся на однозначно идентифицируемые, которым соответствует единственный вектор I , и образы ошибок, идентифицируемые в группе, когда образы ошибок не распознаются внутри группы, к которой принадлежат, но идентифицируются ко всем остальным, в том числе, и однозначно идентифицируемым. В таблице 3 образы идентифицируются (ID – идентификатор образа ошибок) в группах (T5-13, T5-14), (T5-15, T5-16).

Таблица 3 – Значения идентификационного вектора $I = (I_1, I_2, I_3)$, $t=5$

ID образа	$I=(I_1, I_2, I_3)$	ID образа	$I=(I_1, I_2, I_3)$
T5-01	(1,5),(1,5),(0,5)	T5-02	(2,3),(1,1),(0,1)
T5-05	(2,5),(1,5),(1,5)	T5-06	(2,5),(1,5),(0,5)
T5-09	(3,3),(3,3),(2,2)	T5-10	(3,3),(1,1),(1,1)
T5-13	(3,4),(3,3),(2,3)	T5-14	(3,4),(3,3),(2,3)
T5-17	(3,5),(3,5),(2,5)	T5-18	(3,5),(1,5),(1,5)
ID образа	$I=(I_1, I_2, I_3)$	ID образа	$I=(I_1, I_2, I_3)$
T5-03	(2,4),(1,3),(1,3)	T5-04	(2,4),(1,3),(0,3)
T5-07	(3,2),(1,1),(1,0)	T5-08	(3,3),(3,1),(2,1)
T5-11	(3,3),(1,3),(1,2)	T5-12	(3,3),(1,1),(1,1)
T5-15	(3,4),(1,3),(1,3)	T5-16	(3,4),(1,3),(1,3)
T5-19	(4,2),(3,1),(3,1)

Как показали вычисления при кратности ошибок $t=4\div 6$ все образы безыбыточной библиотеки распознаются как однозначно идентифицируемые образы и группы идентифицируемых образов, число которых равно соответственно 5;10;19. На рисунке 5 представлены зависимости числа однозначно идентифицируемых образов ошибок от кратности ошибок.

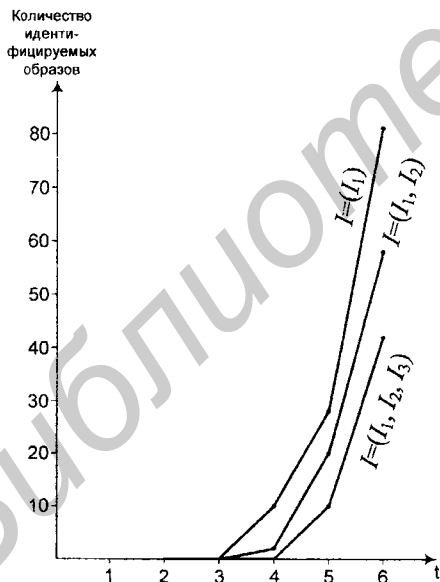
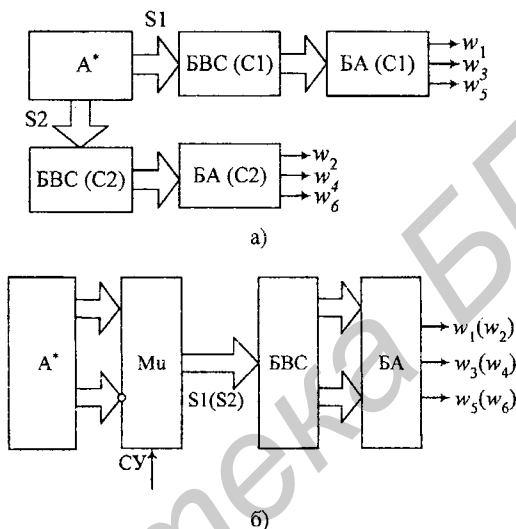


Рисунок 5 – Зависимость числа идентифицируемых образов ошибок от кратности корректируемых ошибок

Анализ зависимостей рисунка 5 показывает, что число идентифицируемых образов уменьшается в два раза для $t=6$ при увеличении размерности идентификационного вектора I . Распределение неидентифицируемых образов по идентифицируемым группам позволяет для кратности ошибок $t=4\div 6$ идентифицировать все образы безыбыточной библиотеки. Кроме того, из анализа данных следует, что увеличение кодового расстояния d_2 не всегда приводит к улучшению идентификационных возможностей кода, а иногда даже их ухудшает. Например, для образов ошибок кратности $t=4$ увеличение кодового расстояния до $d_2=5$ не приводит к уменьшению числа неидентифицируемых образов; то же самое наблюдается и для образов ошибок с кратностью ошибок $t=5$.

Установлено, что наилучшие результаты по идентификации образов ошибок достигаются для $t=3;4;5;6$, когда кодовые расстояния (d_1, d_2) равны соответственно $(4,3), (3,3), (6,3), (7,4)$. Вместе с тем показано, что при увеличении кодового расстояния до $d_2=d_1$ имеется возможность уменьшить сложность блока идентификации за счет мультиплексирования выходов с таблицы декодирования (рисунок 6), где A^* – принятая с ошибками информация, БВС – блок вычисления синдрома, БА – блок анализа, СУ – сигнал управления, Му – мультиплексор.



а – кодовые расстояния $d_1 \neq d_2$
 б – кодовые расстояния $d_1 = d_2$

Рисунок 6 – Структурные схемы блока идентификации

Предложен метод идентификации образов ошибок, который содержит следующие этапы: для двумерного кодового слова определяется размерность идентификационного вектора I ; вычисляются значения параметров вектора I ; происходит поиск вектора I в библиотеке идентификационных параметров и соответствующего ему образа ошибок. Принятие решения об образе ошибок зависит от однозначности или неоднозначности распознавания образа по параметрам вектора I . Алгоритм принятия решения об образе ошибок представлен на рисунке 7.

В четвертой главе предложены метод и алгоритмы жесткого и адаптивного трехэтапного декодирования итеративных кодов на основе двумерной кодовой идентификации произошедших ошибок в таблице кодирования. Сущность метода трехэтапного декодирования итеративных кодов состоит в получении на начальном этапе декодирования информации о числе ошибочных слов (w_1, w_2) по двум

координатам таблицы кодирования кодами $C1$, $C2$ и использования этих данных на следующих этапах декодирования (рисунок 8).

Предложенные методы позволяют снизить количество некорректируемых конфигураций ошибок при двумерном кодировании, однако, 18-25% ошибок этими методами не корректируются.

Предложен метод библиотечной коррекции ошибок и стираний, сущность которого состоит в обработке кодов $C1$, $C2$ на трех этапах: предварительном, подготовительном и основном (собственно, когда происходит декодирование кодов $C1$, $C2$). На предварительном этапе происходит выбор кодовых расстояний (d_1 , d_2) кодов $C1$, $C2$ (в зависимости от кратности корректируемых ошибок t), а также соответствующей библиотеки, по которой будет происходить коррекция ошибок и стираний; на втором этапе происходит вычисление идентификационных параметров,

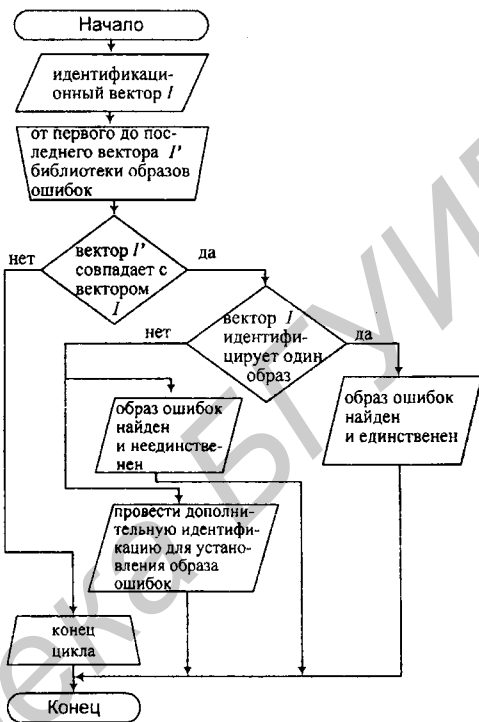


Рисунок 7 – Алгоритм принятия решения об образе ошибок

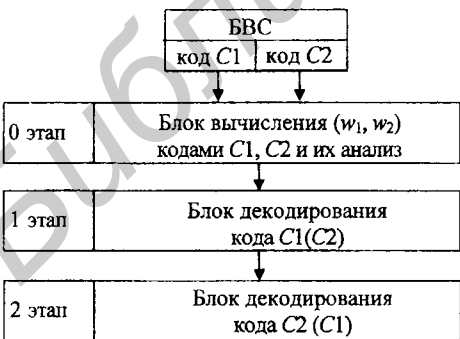


Рисунок 8 – Метод трехэтапного декодирования итеративных кодов

определяется образ ошибок и правило его коррекции, на третьем этапе осуществляется исправление ошибок и/или стираний кодами $C1$, $C2$ или происходит отказ от коррекции (рисунок 9). Разработаны методы коррекции ошибок и стираний с фиксированными ($d_2=2$, $d_1d_2=d_2$) и избыточными ($d_1 \geq d_2 > 2$) параметрами, вычислены соответствующие библиотеки правил коррекции. Число отказов от декодирования в зависимости от кратности ошибок t при применении декодирования с фиксированными и

избыточными параметрами представлено в таблицах 4, 5.

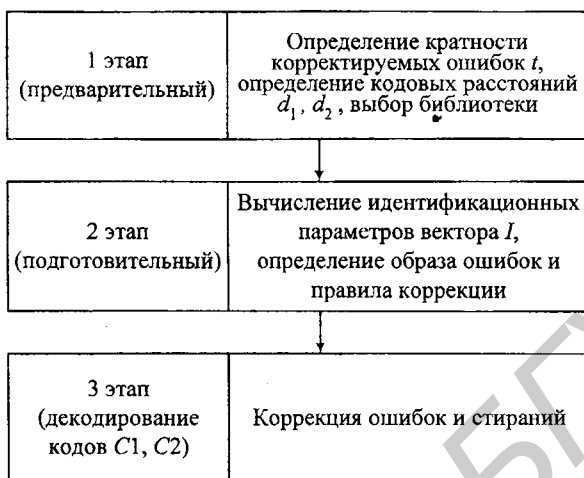


Рисунок 9 – Структурная схема метода библиотечного декодирования при двумерном кодировании информации

Анализ данных таблиц 4 и 5 показывает, что число отказов от декодирования не превышает 9% от общего числа образов ошибок при применении декодирования с фиксированными параметрами и в 99% случаев используется коррекция ошибок кодом $C1$. При коррекции ошибок и стираний с избыточными параметрами при изменении кодового расстояния до $d_2=3;4$ кода $C2$ число отказов от декодирования становится равным нулю, наряду с увеличением числа образов, исправляемых как стирания. При $d_2=d_1$, все двумерные образы ошибок могут быть исправлены как стирания.

Таблица 4 – Число отказов от коррекции в зависимости от кратности ошибок t при применении обработки с фиксированными параметрами

t	(d_1, d_2)	Число отказов от коррекции	Число образов ошибок, корректируемых как	
			стирания	ошибки
2	$d_1=3, d_2=2$	0	1	2
3	$d_1=4, d_2=2$	0	1	5
4	$d_1=5, d_2=2$	2	1	13
5	$d_1=6, d_2=2$	3	6	25
6	$d_1=7, d_2=2$	7	1	82

Таблица 5 – Число отказов от коррекции в зависимости от кратности ошибок t при применении обработки с избыточными параметрами

t	(d_1, d_2)	Общее число образов	Число отказов от коррекции	Количество образов, корректируемых как	
				стирания	ошибки
4	$d_1=5, d_2=3$	16	0	6	10
	$d_1=5, d_2=4$			11	5
	$d_1=5, d_2=5$			16	0
5	$d_1=6, d_2=3$	34	0	6	28
	$d_1=6, d_2=4$			18	16
	$d_1=6, d_2=5$			27	7
	$d_1=6, d_2=6$			34	0
6	$d_1=7, d_2=4$	90	0	33	57
	$d_1=7, d_2=5$			62	28
	$d_1=7, d_2=6$			79	11
	$d_1=7, d_2=7$			90	0

Структурная схема устройства коррекции при применении библиотечного метода декодирования представлена на рисунке 10. В зависимости от выбранного правила декодирования на этапе 3 может быть использовано устройство коррекции, исправляющее только ошибки или совместно ошибки и стирания, или только стирания.

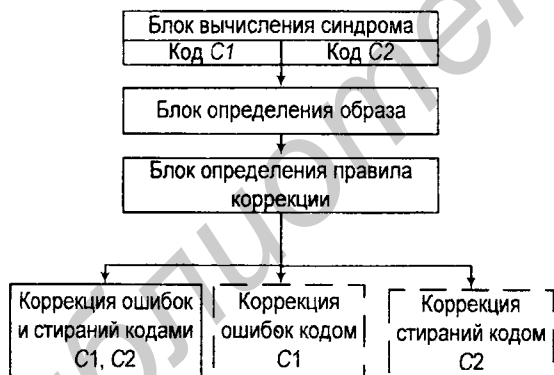
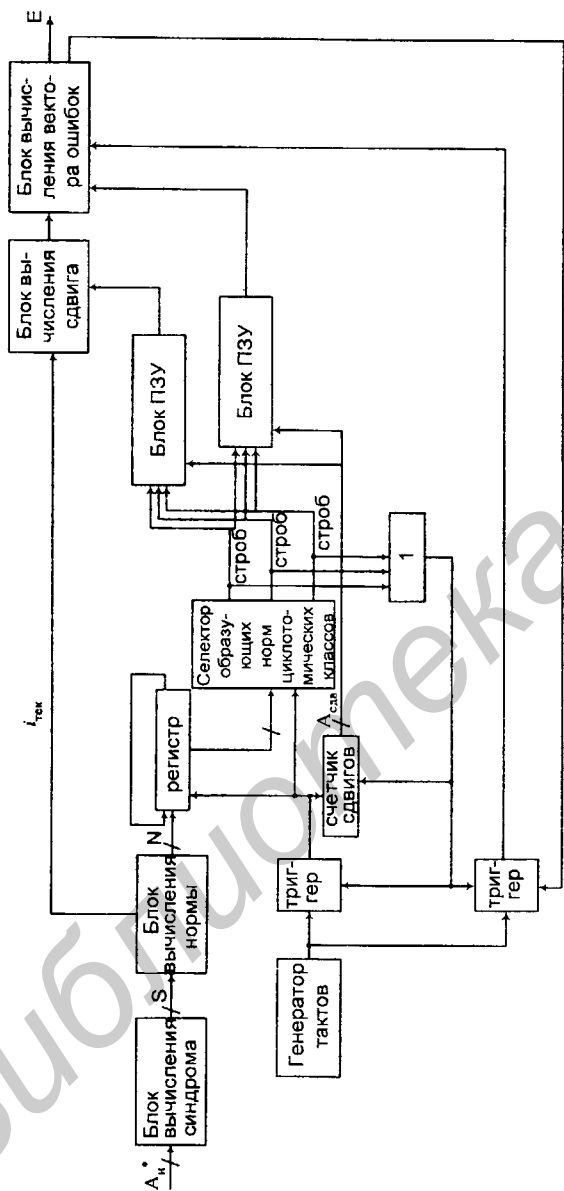


Рисунок 10 - Структурная схема устройства коррекции при использовании библиотечного метода декодирования

произвольному элементу из каждого циклотомического класса, благодаря чему количество селектируемых комбинаций уменьшается до числа нормальных циклотомических классов. Структурная схема устройства коррекции двукратных ошибок на основе нормальных циклотомических классов представлена на рисунке 11.

Показано, что с помощью норм синдромов упрощается вычисление идентификационных параметров, а нормы синдромов принадлежат различным циклотомическим классам и полностью покрывают все множество элементов (норм), входящих в них, образуя нормальные циклотомические классы.

Разработано устройство коррекции двойных ошибок на основе нормальных циклотомических классов, в котором селектируются только по одному



A_n^* - принятое кодовое слово

S - синдром

N - норма синдрома

$i_{тек}$ - значение элемента $a_{i_{тек}}^{тек} = S$ в поле Гауа

1 - логический элемент ИЛИ

E - вектор ошибок

Рисунок 11 – Структурная схема устройства коррекции двукратных ошибок на основе норменных циклотомических классов

Предложен метод декодирования с пошаговой обработкой норменных циклотомических классов, основанный на использовании выбора определенных образующих норм N_a, N_b, N_c из выражения $N_{с.обр} = (N_{b.обр} - \Delta) \bmod n = (N_{a.обр} - \Delta) \bmod n$, где Δ вычисляется аналитическим образом так, чтобы выполнялось соотношение $|N_a - N_b| = |N_b - N_c|$ и позволяет переходить из одного класса в другой путем сложения с образующей нормой, что позволяет свести число селективируемых комбинаций до одной, а остальные комбинации вычисляются из первой согласно правил, описанных выше. На рисунке 12 приведена структурная схема алгоритма, реализующего метод декодирования с пошаговой обработкой норменных циклотомических классов для кодов с $d=7$.

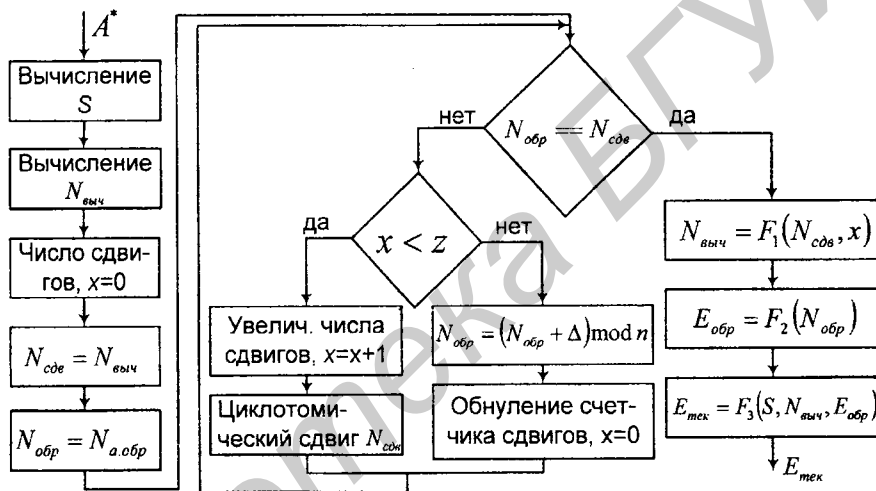


Рисунок 12 – Структурная схема алгоритма, реализующего метод декодирования с пошаговой обработкой норменных циклотомических классов

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Введено понятие образа ошибок, представляющего собой таблицу местоположения ошибок, на основе которого разработаны методы и алгоритмы формирования библиотек образов ошибок, идентификации и правил декодирования кодов, позволяющие осуществлять эффективную коррекцию многократных ошибок и стираний при двумерном кодировании информации [3-А, 6-А].

2. Установлено, что число образов не зависит от длин используемых кодов $C1$, $C2$, и для кратности ошибок $t=2\div 6$ число образов постоянно и составляет 3,6,16,34,90 соответственно, что в $10^3\div 10^{14}$ раз меньше по сравнению с числом синдромов при одномерном кодировании для длин кодов $n=127\div 1023$. Показано, что время формирования безыбыточной библиотеки для $t=2;3;4$ составляет менее 1с, а при $t=5;6$ возрастает от 2 часов до 2,5 суток [3-А, 6-А].

3. Разработаны метод и алгоритм идентификации образов ошибок, на основе одно-, двух- и трехмерных идентификационных векторов. Показано, что размерность идентификационного вектора влияет на число распознаваемых образов ошибок. Установлено, что нераспознаваемые образы ошибок группируются в группы, которые идентифицируются между собой [2-А, 3-А, 4-А].

4. Показано, что повысить распознавание образов ошибок можно путем выбора соответствующих кодовых расстояний (d_1, d_2) используемых кодов. Наилучшие результаты по идентификации образов ошибок достигаются для $t=3;4;5;6$, когда кодовые расстояния соответственно равны $(d_1, d_2) = (4,3),(3,3),(6,3),(7,4)$ [3-А, 4-А].

5. Предложен метод библиотечной коррекции ошибок и стираний при двумерном кодировании информации с фиксированными и избыточными параметрами, реализующий наиболее затратные по времени операции по вычислению вектора ошибок по синдрому на подготовительном этапе. Определено, что при применении коррекции с фиксированными параметрами в 99% случаев используется декодирование образов ошибок кодом $C1$, причем число отказов от декодирования не превышает $1\div 6$ образов от их общего числа. При коррекции с избыточными параметрами число отказов декодирования сокращается до нуля при возможности коррекции всех образов как стираний кодом $C2$ [2-А, 5-А].

6. Предложены метод, устройство декодирования и алгоритмы, уменьшающие вычислительную сложность при коррекции двукратных и трехкратных ошибок, основанные на использовании норменных циклотомических классов и параллельно-последовательного алгоритма декодирования, позволяющие применять только одно множество норм для нахождения вектора ошибок [2-А, 7-А].

7. Разработаны библиотеки образов ошибок, идентификационных параметров и правил коррекции для кратности ошибок $t=2\div 6$ [3-А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Установлено, что метод библиотечной коррекции многократных ошибок и стираний позволяет уменьшить вычислительные затраты на реализацию декодера, что может быть использовано в распределенных системах и компьютерных сетях передачи и хранения информации с высокими требованиями к вероятности ошибочного декодирования и быстродействия схем коррекции [6-А].

2. Предложенные методы и алгоритмы для идентификации и коррекции образов ошибок могут быть использованы в системах хранения информации для идентификации ошибочных блоков, исправления ошибок и стираний, в частности, в RAID системах и системах видеонаблюдения [3-А].

3. Показано, что в телекоммуникационных системах и компьютерных сетях, где требуется высокая информационная надежность, быстродействие и малые затраты на схемы коррекции, следует использовать декодирование с помощью кодов с высокой избыточностью, позволяющее исправлять ошибки как стирания [4-А, 7-А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи в научных журналах

1-А. Фам, Хак Хоан, Кодовая и двухмерная идентификация ошибок в декодировании итеративных кодов / Хак Хоан Фам, О.Г.Смолякова // Доклады БГУИР. – 2008. – 1(31). – С.70-75

2-А. Конопелько, В.К. Норменное декодирование помехоустойчивых кодов на основе циклотомических перестановок / В.К.Конопелько, О.Г.Смолякова // Доклады БГУИР. – 2008. – 4(34). – С. 28-34.

3-А. Смолякова, О.Г. Классификация векторов ошибок при двухмерном кодировании информации / О.Г.Смолякова, В.К.Конопелько // Доклады БГУИР. – 2008 – 7(37). – С.19-28

4-А. Конопелько, В.К. Оптимизация параметров итеративных кодов при адаптивном трехэтапном декодировании / В.К.Конопелько, Хак Хоан Фам, О.Г.Смолякова // Доклады БГУИР. – 2009. – 1(39). – С.86-92.

Материалы семинаров и тезисы конференций

5-А. Конопелько, В.К. Анализ возможности применения БЧХ кодов для коррекции зависимых ошибок / В.К.Конопелько, О.Г.Смолякова, А.В. Шкиленок // Международный научно-технический семинар «Телекоммуникации: сети и технологии, алгебраическое кодирование и безопасность данных», Доклады БГУИР. – №5, 25 октября 2007 г. – С.17-22.

6-А. Конопелько, В.К. Алгоритмы вычисления классифицированных ошибок при двухмерном кодировании информации / В.К. Конопелько, О.Г. Смолякова, Аль-Алем Ахмед Саид // Международная научно-техническая конференция, посвященная 45-летию МРТИ-БГУИР: тез. докл. Междунар. научн.-техн. конф., Минск, 19 марта 2009 года. – Минск: БГУИР, 2009. – С. 71-72.

Патенты

7-А. Положительное решение на выдачу патента Устройство норменной коррекции двойных ошибок: / В.К. Конопелько, О.Г.Смолякова, Аль-алем Ахмед Саид; заявитель: Белорус. гос. ун-т информатики и радиоэлектроники – № и 20090380; заявл. 11.05.2009 // Нац. центр інтэлектуал. уласнасці. – 2009.

КАРЭКЦЫЯ ПАМЫЛАК І СЦІРАННЯЎ ПРЫ ДВУХМЕРНЫМ КАДАВАННІ ІНФАРМАЦЫІ

Ключавыя словы: коды, двухмернае кадаванне, дэкадаванне, кратнасць, вектар і выява памылкі, сціранне, сіндром, ідэнтыфікацыя, фіксаваныя і залішнія параметры, норма, цыклічныя і цыклатамічныя класы.

Мэтай працы з'яўляецца распрацоўка метадаў і алгарытмаў карэкцыі памылак і сціранняў пры двухмерным кадаванні інфармацыі на аснове фармавання бібліятэк выяў памылак, іх ідэнтыфікацыі і карэкцыі для падвышэння інфармацыйнай надзейнасці тэлекамунацыйных сістэм і кампютарных сетак.

Распрацаваны метады, алгарытмы карэкцыі памылак і сціранняў пры двухмерным кадаванні інфармацыі на аснове фармавання бібліятэк выяў памылак, іх ідэнтыфікацыі і карэкцыі ўлучальныя: метады і алгарытмы фармавання бязлішкавай бібліятэкі выяў памылак; метады і алгарытмы ідэнтыфікацыі выяў памылак; метады і алгарытмы карэкцыі памылак і сціранняў пры двухмерным кадаванні інфармацыі з фіксаванымі і залішнімі параметрамі; метады дэкадавання з пакрокавай апрацоўкай нармовых цыклатамічных класаў. Складанасць распрацаваных метадаў і алгарытмаў карэкцыі памылак і сціранняў пры двухмерным кадаванні інфармацыі не залежыць ад даўжыні выкарыстоўваных кодаў; лік сельякціруемых камбінацый пры сіндромным дэкадаванні ўвесь час і адпаведна роўна $3;6;16;34$ і 90 для кратнасці памылак $2=6$. Пры ўжыванні карэкцыі памылак і сціранняў з фіксаванымі параметрамі лік адмоў ад дэкадавання не перавышае 9% , пры павелічэнні кодавай адлегласці d_2 лік адмоў ад дэкадавання становіцца роўным нулю, прычым павялічваецца і лік выяў, якія дэкадуецца з дапамогай выпраўлення сціранняў. У выпадку, калі кодавыя адлегласці кодаў $C1, C2$ становяцца роўнымі ($d_1=d_2$), усе двухмерныя выявы памылак могуць быць выпраўлены як сціранні. Пры ўжыванні метаду з пакрокавай апрацоўкай нармовых цыклатамічных класаў досыць адселектаваць толькі адно мноства нормаў для знаходжання вектару памылак.

Прапанаваны ў працы метады і алгарытмы для ідэнтыфікацыі і карэкцыі выяў памылак могуць быць скарыстаны ў сістэмах захоўвання інфармацыі для ідэнтыфікацыі хібных блокаў, выпраўленні памылак і сціранняў (у RAID сістэмах і сістэмах відэаназірання), а таксама ў размеркаваных сістэмах і кампютарных сетках перадачы і захоўвання інфармацыі з высокімі патрабаваннямі да верагоднасці хібнага дэкадавання і хуткадзейнасці схем карэкцыі.

РЕЗЮМЕ

Смолякова Ольга Георгиевна

КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК И СТИРАНИЙ ПРИ ДВУМЕРНОМ КОДИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ

Ключевые слова: коды, двумерное кодирование, декодирование, кратность, вектор и образ ошибок, стирание, синдром, идентификация, фиксированные и избыточные параметры, норма, циклические и циклотомические классы.

Целью работы является разработка методов и алгоритмов в коррекции ошибок и стираний при двумерном кодировании информации на основе формирования библиотек образов ошибок, их идентификации и коррекции для повышения информационной надежности телекоммуникационных систем и компьютерных сетей.

Разработаны методы и алгоритмы коррекции ошибок и стираний при двумерном кодировании информации на основе формирования библиотек образов ошибок, их идентификации и коррекции включающие: методы и алгоритмы формирования безизбыточной библиотеки образов ошибок; метод и алгоритм идентификации образов ошибок; метод и алгоритмы коррекции ошибок и стираний при двумерном кодировании информации с фиксированными и избыточными параметрами; метод декодирования с пошаговой обработкой норменных циклотомических классов. Сложность разработанных методов и алгоритмов коррекции ошибок и стираний при двумерном кодировании информации не зависит от длины используемых кодов; число селектируемых комбинаций при синдромном декодировании постоянно и соответственно равно 3;6;16;34 и 90 для кратности ошибок 2÷6. При применении коррекции ошибок и стираний с фиксированными параметрами число отказов от декодирования не превышает 9%, при увеличении кодового расстояния d_2 число отказов от декодирования становится равным нулю, причем увеличивается и число образов, декодируемых с помощью исправления стираний. В случае, когда кодовые расстояния кодов C_1 , C_2 становятся равными ($d_1=d_2$), все двумерные образы ошибок могут быть исправлены как стирания. При применении метода с пошаговой обработкой норменных циклотомических классов достаточно отселектировать только одно множество норм для нахождения вектора ошибок.

Предложенные в работе методы и алгоритмы для идентификации и коррекции образов ошибок могут быть использованы в системах хранения информации для идентификации ошибочных блоков, исправления ошибок и стираний (в RAID системах и системах видеонаблюдения), а также в распределенных системах и компьютерных сетях передачи и хранения информации с высокими требованиями к вероятности ошибочного декодирования и быстродействия схем коррекции.

SUMMARY

Smolyakova Olga Georgievna

CORRECTION OF ERRORS AND DELETINGS IN TWO-DIMENSIONAL CODING OF THE INFORMATION

Keywords: codes, two-dimensional coding, decoding, frequency rate, a vector and an image of an error, deleting, a syndrome, the identification, the fixed and superfluous parametres, norm, cyclic and cyclotomic classes.

The work purpose is working out of methods and algorithms of correction of errors and deletings at two-dimensional coding of the information on the basis of formation of libraries of images of errors, their identification and correction for increasing information reliability of telecommunication systems and computer networks.

Methods, algorithms of correction of errors and deletings at two-dimensional coding of the information on the basis of formation of libraries of images of errors, their identification and correction including are developed: methods and algorithms of formation not surplus libraries of images of errors; a method and algorithm of identification of images of errors; a method and algorithms of correction of errors and deletings at two-dimensional coding of the information with the fixed and superfluous parametres; a method of decoding with step-by-step processing norming cyclotomic classes. Complexity of the developed methods and algorithms of correction of errors and deletings at two-dimensional coding of the information does not depend on length of used codes; the number selected combinations at syndromic decoding is constant and is accordingly equal 3; 6; 16; 34 and 90 for frequency rate of errors $2 \div 6$. At application of correction of errors and deletings with the fixed parametres the number of refusals of decoding does not exceed 9 %, at increase in code distance d_2 the number of refusals of decoding becomes equal to zero, and the number of the images decoded by means of correction of deletings increases also. In a case when code distances of codes C_1, C_2 become equal ($d_1=d_2$), all two-dimensional images of errors can be corrected as deleting. At application of a method with step-by-step processing norming cyclotomic classes it is enough selected only one set of norms for a finding a vector of errors.

The methods offered in work and algorithms for identification and correction of images of errors can be used in systems of storage of the information for identification of erroneous blocks, correction of errors and deletings (in RAID systems and video observation systems), and also in the distributed systems and computer networks of transfer and storage of the information with high requirements to probability of erroneous decoding and speed of schemes of correction.

Научное издание

СМОЛЯКОВА Ольга Георгиевна

**КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК И СТИРАНИЙ
ПРИ ДВУМЕРНОМ КОДИРОВАНИИ ИНФОРМАЦИИ**

Специальность 05.13.13 – «Телекоммуникационные системы и компьютерные сети»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 26.01.2010.	Формат 60x84 ¹ / ₁₆ .	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 1,4.
Уч.-изд. л. 1,4.	Тираж 60 экз.	Заказ 117.

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.