

На правах рукописи



КРИВОНОС АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕТОДЫ, АЛГОРИТМ И УСТРОЙСТВО
КОРРЕКЦИИ ОШИБОК В
ОПТИЧЕСКОЙ ПАМЯТИ ЭВМ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства
вычислительной техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

КУРСК – 2018

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»
на кафедре вычислительной техники

Научный руководитель: **Егоров Сергей Иванович**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Назаров Лев Евгеньевич**
доктор физико-математических наук, старший
научный сотрудник,
Фрязинский филиал Федерального государственного
бюджетного учреждения науки «Институт
радиотехники и электроники им В.А. Котельникова»
Российской академии наук, лаборатория
инструментальных и информационных методов
исследования окружающей среды средствами
дистанционного зондирования, главный научный
сотрудник

Макаров Константин Сергеевич
кандидат технических наук,
Федеральное государственное унитарное
предприятие «18 Центральный научно-
исследовательский институт» Министерства обороны
Российской Федерации, научно-исследовательский
центр, инженер научно-исследовательского отдела

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Рязанский государственный радиотехнический
университет»

Защита диссертации состоится 27 декабря 2018 г. в 16:00 часов в конференц-зале
на заседании диссертационного совета Д 212.105.02 при ФГБОУ ВО «Юго-
Западный государственный университет» по адресу: г. Курск, ул. 50 лет Октября,
94.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Юго-Западного
государственного университета и на сайте www.swsu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.105.02

Титенко Евгений Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время цифровая техника находит своё применение во многих сферах человеческой деятельности. Одним из таких применений является хранение и передача информации, при этом наиболее распространенным оптическим носителем информации является многоцелевой оптический диск DVD. Достоинством этих дисков является их низкая стоимость и возможность хранения достаточно большого объёма информации. Однако для них также характерен относительно высокий уровень ошибок, основной причиной которых являются микродефекты регистрирующего слоя, возникающие в процессе производства, хранения и эксплуатации.

Методы защиты от ошибок информации, хранимой на оптических дисках, включают в себя повторное чтение, динамический обход дефектов, дублирование данных и др., однако наиболее эффективным методом является коррекция ошибок с помощью помехоустойчивых кодов. В оптических дисках DVD используются помехоустойчивые коды Рида-Соломона (РС-коды), объединенные в кодовую конструкцию, называемую произведением кодов Рида-Соломона (Reed Solomon Product Code, RSPC). Значительный вклад в разработку алгоритмов декодирования РС-кодов внесли: I. Reed, G. Solomon, E. Berlekamp, Y. Sugiyama, R. Blahut, В.В. Афанасьев, А.В. Давыдов, С.В. Федоренко, П.В. Трифионов. Устройства декодирования для оптической памяти исследовались такими учёными как А.П. Типикин, Б.А. Савельев, С.И. Егоров, Н.С. Chang, N. Glover.

На практике в контроллерах оптической памяти для декодирования произведения кодов Рида-Соломона используется метод, предусматривающий выполнение двух этапов. На первом этапе исправляются ошибки в строках блока данных сектора (горизонтальных кодовых словах). На втором этапе исправляются ошибки и стирания в столбцах блока данных (вертикальных кодовых словах).

Используемый метод хорошо исправляет протяженные пакеты ошибок, но его эффективность падает при наличии в данных небольших пакетов ошибок, характерных для оптических дисков в целом, и дисков DVD в частности. Здесь и далее под эффективностью понимается отношение вероятности ошибок на входе декодера к вероятности ошибок на его выходе.

В последнее время предлагаются итеративные методы декодирования произведения кодов Рида-Соломона, обладающие более высокой исправляющей способностью. Недостаток этих методов - высокая сложность реализации.

Таким образом, можно сделать вывод о наличии **противоречия** между необходимостью эффективного декодирования произведения РС-кодов, применяемого в оптических дисках DVD и отсутствием методов, алгоритмов и аппаратных средств, которые обеспечивали бы высокую корректирующую способность и одновременно обладали бы приемлемой для практической реализации аппаратной сложностью.

Ввиду вышеизложенного, **актуальной научно-технической задачей** является создание методов, алгоритмов и аппаратных средств коррекции ошибок, возникающих в каналах чтения/записи оптической памяти ЭВМ одновременно обеспечивающих высокую корректирующую способность и приемлемый уровень аппаратных затрат, необходимых для их реализации.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности коррекции ошибок в оптической памяти ЭВМ путём разработки методов, алгоритмов и устройства, реализуемого с приемлемыми аппаратными затратами.

В процессе исследования предстоит решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ наиболее широко используемых методов, алгоритмов и аппаратных средств коррекции ошибок, возникающих в каналах чтения/записи оптической памяти ЭВМ.
2. Создать методы и алгоритмы декодирования произведения РС-кодов с высокой исправляющей способностью.
3. Разработать структурно-функциональную организацию устройства коррекции ошибок, возникающих в каналах чтения/записи оптической памяти ЭВМ.
4. Провести исследование устройства коррекции ошибок, возникающих в каналах чтения/записи оптической памяти ЭВМ с использованием метода имитационного моделирования на ЭВМ.

Объект исследований – декодеры помехоустойчивых кодов, используемые в качестве средств коррекции ошибок, возникающих при записи, хранении и эксплуатации оптических дисков DVD.

Предмет исследований – методы, алгоритмы и устройства коррекции ошибок, возникающих в каналах чтения/записи оптической памяти ЭВМ, и использующие произведения кодов Рида-Соломона.

Методы исследования. Поставленные задачи решаются с использованием теории помехоустойчивого кодирования, теории вероятностей, теории проектирования устройств ЭВМ, а также методов математического аппарата высшей алгебры, комбинаторики и имитационного моделирования на ЭВМ.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту:

1. Метод декодирования произведения РС-кодов, отличительной особенностью которого является введение этапа финального исправления стираний, обеспечивающий значительное повышение эффективности коррекции ошибок при небольшом увеличении сложности.
2. Аппаратно-ориентированный алгоритм итеративного декодирования, отличительной особенностью которого является конвейерный принцип обработки блоков данных, позволяющий обеспечить высокую пропускную способность устройства коррекции ошибок при приемлемой аппаратной сложности.
3. Вертикально-настойчивый метод декодирования произведения кодов Рида-Соломона, отличительной особенностью которого является приоритетная коррекция ошибок в вертикальных кодовых словах, обеспечивающий большую эффективность коррекции ошибок и меньшую вычислительную сложность.
4. Структурно-функциональная организация устройства коррекции ошибок, реализующего предложенный алгоритм и позволяющего эффективно исправлять ошибки с приемлемой аппаратной сложностью; отличительной особенностью которой является конвейерное включение декодеров итераций и использование в них блоков модификации синдромов.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- Созданные методы и алгоритмы декодирования произведения РС-кодов позволяют повысить эффективность коррекции ошибок в оптических дисках DVD в 2-4,2 раза.
- Предложенная структурно-функциональная организация устройства коррекции ошибок, возникающих в каналах чтения/записи оптической памяти ЭВМ может быть

реализована с приемлемой аппаратной сложностью (1 млн. вентиляей и 1,9 Мбайт памяти).

Результаты работы могут найти своё применение при создании новых контроллеров оптической памяти ЭВМ, а также в средствах коррекции ошибок для оптических каналов передачи данных.

Реализация и внедрение.

Основные научные результаты, полученные в работе, используются в АО «Курский завод «Маяк», а также нашли применение в учебном процессе на кафедре вычислительной техники Юго-Западного Государственного Университета в рамках дисциплины «Технические средства защиты и сжатия информации».

Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечена корректным применением положений математического аппарата высшей алгебры, теории вероятностей и теории помехоустойчивого кодирования. Аппаратная реализация методов и алгоритмов выполнена в соответствии с нормами и правилами проектирования устройств ЭВМ. Кроме того, достоверность результатов исследования подтверждается совпадением теоретических выводов и результатов, полученных в процессе имитационного моделирования на ЭВМ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание диссертации соответствует п. 2 «Теоретический анализ и экспериментальное исследование функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления в нормальных и специальных условиях с целью улучшения технико-экономических и эксплуатационных характеристик» в части разработки аппаратно-ориентированного алгоритма и устройства коррекции ошибок в оптической памяти ЭВМ и п. 4 «Разработка научных подходов, методов, алгоритмов и программ, обеспечивающих надежность, контроль и диагностику функционирования элементов и устройств вычислительной техники и систем управления» паспорта специальности 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления в части создания методов коррекции ошибок в оптической памяти ЭВМ, обеспечивающих повышение надежности хранения данных.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были заслушаны и получили одобрение на Международных и Российских научно-технических конференциях: МНТК «Новые информационные технологии и системы (НИТиС – 2014)» (г. Пенза, 2014 г.), МНТК «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA 2015» (г. Москва, 2015 г.), МНТК «Распознавание – 2015» (г. Курск, 2015 г.), ВНТК «Интеллект – 2015» (г. Тула, 2015 г.), МНТК «Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2016)» (г. Тольятти, 2016 г.), МНТК «Диагностика – 2016» (г. Курск, 2016 г.), МНТК «Распознавание – 2017» (г. Курск, 2017 г.), ВНТК «Интеллект – 2017» (г. Тула, 2017 г.), МНТК «Распознавание – 2018» (г. Курск, 2018 г.), а также на научных семинарах кафедры вычислительной техники ЮЗГУ с 2014 по 2018 г.

Публикации. Представленные в работе результаты отражены в 14 публикациях, в числе которых 4 статьи, опубликованные в научных изданиях рекомендуемых ВАК. По

результатам работы подана заявка на изобретение РФ №2017128110, дата приоритета от 07.08.2017.

Личный вклад соискателя. Все научные результаты, выносимые соискателем на защиту, получены им лично в процессе диссертационного исследования. Опубликованные работы, выполненные в соавторстве, содержат следующие предложения соискателя: в [1, 5, 6, 13] метод и алгоритм декодирования произведения кодов Рида-Соломона с финальным исправлением стираний, в [4] вертикально-настойчивый метод декодирования произведения кодов Рида-Соломона, в [3] структурно-функциональная организация устройства коррекции ошибок.

Объём и структура работы. Объём диссертационного исследования составляет 111 страницы, включая введение, четыре раздела, заключение и список используемых источников. Работа иллюстрируется 32 рисунками и содержит 17 таблиц. Перечень используемых источников включает 74 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проводится анализ выбранной темы, в результате которого обосновывается её актуальность и формулируется противоречие, которое ложится в основу научно-технической задачи. На основе научно-технической задачи ставится цель исследования, задачи, решение которых необходимо для достижения поставленной цели. Кроме этого во введении приводится научная новизна и практическая значимость исследования и перечисляются основные результаты, полученные в ходе работы и выносимые на защиту.

Первый раздел посвящён поиску и анализу известных методов, алгоритмов и аппаратных средств для коррекции ошибок, возникающих в каналах чтения/записи оптической памяти ЭВМ.



Рис. 1 Структура блока данных DVD

В настоящее время для коррекции ошибок в оптической памяти ЭВМ используется произведение кодов Рида-Соломона (РС-кодов), определенных над конечным полем Галуа $GF(q = 2^8)$. Кодовое слово произведения может быть представлено в виде матрицы:

$$C = \begin{bmatrix} C_{n_{v-1}, n_{h-1}} & C_{n_{v-1}, n_{h-2}} & \dots & C_{n_{v-1}, 0} \\ C_{n_{v-2}, n_{h-1}} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ C_{0, n_{h-1}} & \dots & \dots & C_{0, 0} \end{bmatrix}$$

Строками матрицы являются слова кода Рида-Соломона с параметрами (n_h, k_h, d_h) . Столбцы матрицы представляют собой слова РС-кода с параметрами (n_v, k_v, d_v) . Тройка (n, k, d) определяет длину кода (n), его размерность (k) и минимальное кодовое расстояние (d).

Число гарантированно исправляемых символов РС-кодом равно $t_c = \lfloor (d - 1)/2 \rfloor$.

Каждый сектор оптической памяти содержит блок данных, закодированный произведением РС-кодов. Структура блока данных DVD представлена на рисунке 1.

На рисунке: j_v – номер вертикального кодового слова; j_h – номер горизонтального кодового слова; i_v – номер символа вертикального кодового слова; i_h – номер символа горизонтального кодового слова.

Информационные символы блока данных сначала кодируются РС-кодом с параметрами (208, 192, 17) по вертикали, а затем осуществляется кодирование РС-кодом (182, 172, 11) по горизонтали.

Используемый в контроллерах накопителей DVD метод коррекции ошибок (метод декодирования произведения РС-кодов) предусматривает сначала декодирование строк, а затем столбцов блока данных. Неудачное декодирование строк учитывается при декодировании столбцов введением стираний. Недостаток метода заключается в невысокой эффективности исправления небольших пакетов ошибок, вызванных дефектами оптического диска.

Описанный метод используется, например, в устройствах декодирования, предложенных Т. Arisaka, Т. Ohyama и Н. Yamauchi и Н.С. Chang, С.В. Shung и С.У. Lee.

Известен также итеративный метод декодирования произведения РС-кодов, на каждой итерации которого исправляются сначала горизонтальные (вертикальные) кодовые слова, затем вертикальные (горизонтальные) кодовые слова. Этот метод обладает высокой эффективностью коррекции ошибок при выполнении достаточно большого числа итераций. Однако, внедрению метода в контроллеры накопителей DVD препятствует высокая сложность его реализации.

Вариант аппаратной реализации итеративного декодирования предложен С. Zook, однако в предложенном им устройстве невозможно обеспечить высокопроизводительный потоковый режим работы.

Второй раздел посвящен разработке методов и алгоритмов декодирования произведения кодов Рида-Соломона, используемого в DVD, с приемлемой вычислительной сложностью.

Первый предлагаемый метод декодирования произведения кодов Рида-Соломона, особенностью которого является финальное исправление стираний, основан на модификации стандартного двухэтапного метода декодирования и предусматривает выполнение трех этапов следующим образом:

1. На первом этапе последовательно декодируются все строки блока данных (горизонтальные кодовые слова). В каждой строке исправляется до пяти байтовых ошибок. Если в строке искажено более 5 символов, коррекция завершается либо ошибочным исправлением, либо обнаружением шести и более неисправимых ошибок. В последнем случае неисправленные кодовые слова помечаются флагом отказа от декодирования.

2. На втором этапе декодирования исправляются ошибки в вертикальных кодовых словах, при этом стирания не используются. В этом случае в вертикальных кодовых словах возможно исправление до восьми независимых ошибок. При исправлении ошибочных символов модифицируются синдромы горизонтальных кодовых слов, к которым эти символы относятся. Если число ошибок больше восьми, фиксируется отказ от декодирования (при отсутствии ложной коррекции, вероятность которой для РС-кода с параметрами (208, 192, 17) весьма мала). Соответствующие вертикальные кодовые слова маркируются флагами в специальном массиве.

3. В процедуру декодирования добавляется третий этап, на котором исправляются ошибки в решетчатой конфигурации горизонтальных и вертикальных кодовых слов, помеченных флагами отказов от декодирования, с использованием стираний.

Финальное исправление стираний может выполняться как по вертикали решетки, так и по горизонтали. Исправляются стирания и ошибки в неисправленных ранее кодовых словах (горизонтальных или вертикальных), которые имеют большой запас кодового расстояния. Ниже приведен алгоритм финального исправления стираний по горизонтали (алгоритм исправления стираний по вертикали аналогичен).

1. Обнуление счетчика горизонтальных кодовых слов $j_h = 0$.

2. Если значение флага отказа от декодирования горизонтального кодового слова $DecFailHor[j_h] = 1$, то выполняются п. 3 – 7, в противном случае осуществляется переход к п. 8.

3. На вход алгоритма Берлекэмп-Месси передаются синдром j_h -го горизонтального кодового слова и позиции стираний, сформированные в соответствии с содержимым массива флагов неудачного декодирования вертикальных кодовых слов $DecFailVer$. С использованием алгоритма Берлекэмп-Месси находятся позиции и значения ошибок в этом слове.

4. Если число ошибок больше 0, выполняются п. 5 – 7, в противном случае осуществляется переход к п. 8.

5. Исправляются ошибки в j_h -м горизонтальном кодовом слове. При исправлении всех ошибок значение счетчика неудачно декодированных горизонтальных кодовых слов уменьшается.

6. Если счетчик числа неудачно декодированных горизонтальных кодовых слов равен нулю, осуществляется переход к п. 9, в противном случае – к п. 7.

7. Выполняется модификация синдромов вертикальных кодовых слов, в которые входят исправленные символы j_h -го горизонтального кодового слова. Проверяются значения модифицированных синдромов, если они равны нулю, соответствующие ячейки массива флагов неудачного декодирования вертикального кодового слова $DecFailVer$ сбрасываются в нуль. При получении нулевого значения синдрома кодового слова счётчик числа неудачно декодированных вертикальных кодовых слов уменьшается на единицу.

8. $j_h = j_h + 1$, Если $j_h = n_v$ (обработаны все горизонтальные кодовые слова), декодирование завершается неудачей, в противном случае переход к п. 2.

9. Финальное исправления стираний завершено.

В описании используются следующие переменные:

j_h – номер горизонтального кодового слова;

n_v – количество символов в вертикальных кодовых словах;

$DecFailHor[0:n_v - 1]$ и $DecFailVer[0:k_h - 1]$ – флаги отказа от декодирования вертикальных и горизонтальных кодовых слов.

Вычислительная сложность третьего этапа гораздо меньше сложности первого и второго этапов предлагаемого метода коррекции ошибок с финальным исправлением стираний и составляет 0,3% при $P_{be} = 0,0015$ (вероятности возникновения ошибки в бите). Это определяется тремя факторами: 1) число декодируемых горизонтальных и вертикальных кодовых слов на третьем этапе (с отказами от декодирования) на порядок меньше числа кодовых слов, декодируемых на первых двух этапах; 2) вместо

вычисления синдромов используется их модификация; 3) финальное исправление стираний выполняется редко.

Использование третьего этапа позволяет эффективно исправлять протяженные пакеты ошибок в закодированном блоке данных.

На рисунке 2 приводятся кривые помехоустойчивости, полученные в результате имитационного моделирования, для стандартного двухэтапного метода и предложенного метода декодирования с финальным исправлением стираний. Исследование проводилось для двоичного симметричного канала без памяти. Результаты приведены в виде графика зависимости логарифма вероятности ошибки в блоке данных на выходе декодера $\log BIER$ (Block Error Rate) от P_{be} (вероятности ошибки в бите данных на входе декодера). Цифрой 1 обозначена кривая помехоустойчивости стандартного двухэтапного метода. Цифрой 2 – кривая помехоустойчивости метода с финальным исправлением стираний.

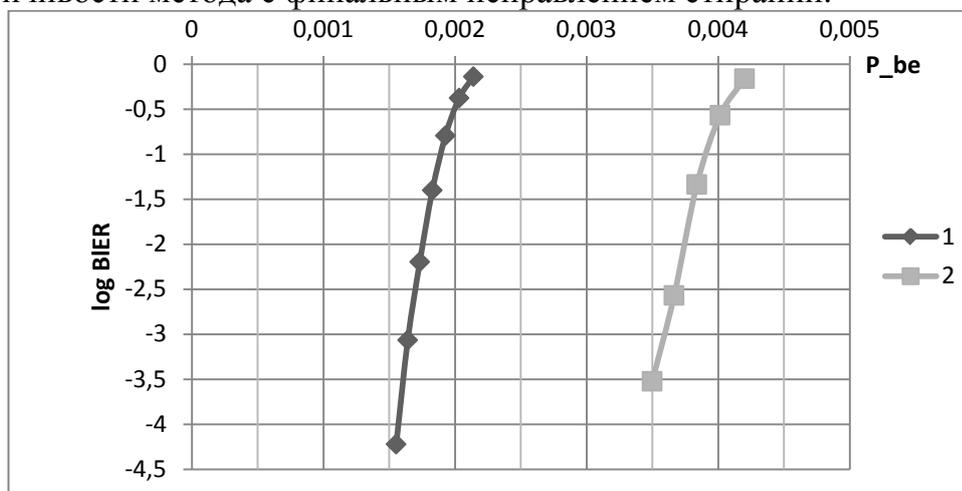


Рис. 2 Зависимость BIER от P_{be} для стандартного двухэтапного метода и предложенного метода с финальным исправлением стираний

Предложенный метод решает проблему недостаточно высокой эффективности исправления независимых ошибок стандартным двухэтапным методом декодирования путём уменьшения числа ложных стирания символов на втором этапе декодирования. Его применение позволяет допустить увеличение уровня битовых ошибок в считанных данных в 2 раза.

Во второй части раздела предложен аппаратно-ориентированный алгоритм итеративного декодирования произведений кодов Рида-Соломона для устройств оптической памяти ЭВМ.

Декодирование начинается с вертикальных кодовых слов, при этом исправляются кодовые слова с количеством ошибок 8 и меньше, которые помечаются флагом отсутствия ошибок. Неисправленные кодовые слова не модифицируются, но помечаются флагом отказа от декодирования. После прохождения всех вертикальных кодовых слов, декодируются строки блока данных. Коррекция горизонтальных кодовых слов происходит аналогичным образом. При этом также устанавливаются флаги отсутствия ошибок для исправленных кодовых слов, и флаги отказа от декодирования, для кодовых слов, содержащих больше 5 ошибок. Если исправление производится в символе, принадлежащем кодовому слову, помеченному флагом отсутствия ошибок – флаг снимается, и слово декодируется повторно на следующей итерации. Одной

итерации соответствует декодирование всех вертикальных и горизонтальных кодовых слов. Каждая итерация предусматривает выполнение следующих этапов:

1. Вычисление полиномов синдромов вертикальных и горизонтальных кодовых слов S_v и S_h .
2. Получение полиномов локаторов $\Lambda_v(x)$ и значений $\Omega_v(x)$ ошибок вертикальных кодовых слов. Формирование отказов от декодирования при превышении степени полинома локаторов значения t_{c_v} .
3. Вычисление значений полиномов локаторов и ошибок, нахождение позиций x_v и значений y_v ошибок в вертикальных кодовых словах.
4. Исправление ошибок в вертикальных кодовых словах $r_v = r_v + y_v$.
5. Вычисление значений модификации синдромов горизонтальных кодовых слов ΔS_h , символы которых были исправлены в п. 4.
6. Модификация синдромов горизонтальных кодовых слов $S_h = S_h + \Delta S_h$.
7. Обнуление синдромов вертикальных кодовых слов в которых были исправлены все ошибки.
8. Получение полиномов локаторов $\Lambda_h(x)$ и значений $\Omega_h(x)$ ошибок горизонтальных кодовых слов. Формирование отказов от декодирования при превышении степени полинома локаторов значения t_{c_h} .
9. Вычисление значений полиномов локаторов и ошибок, нахождение позиций x_h и значений y_h ошибок в горизонтальных кодовых словах.
10. Исправление ошибок в горизонтальных кодовых словах $r_h = r_h + y_h$.
11. Вычисление значений модификации синдромов вертикальных кодовых слов ΔS_v , символы которых были исправлены в п. 10.
12. Модификация синдромов вертикальных кодовых слов $S_v = S_v + \Delta S_v$.
13. Обнуление синдромов горизонтальных кодовых слов в которых были исправлены все ошибки.
14. Повторение с п. 2 до достижения заданного числа итераций.

Данный алгоритм не предусматривает принятия дополнительного решения в случае обнаружения противоречия между значением ошибки, определенным при декодировании вертикального кодового слова и горизонтального кодового слова. Подобные ситуации приводят к закликиванию, выход из которого осуществляется при достижении предела числа итераций.

Предложенный алгоритм позволяет реализовать конвейерный принцип обработки блоков данных, позволяющий обеспечить высокую пропускную способность устройства коррекции ошибок.

Во втором предлагаемом методе декодирования произведения кодов Рида-Соломона, названном вертикально-настойчивым методом, приоритет отдаётся декодированию вертикальных кодовых слов, так как минимальное кодовое расстояние у вертикальных кодовых слов $d_v = 17$ выше, чем у горизонтальных кодовых слов $d_h = 11$. Коррекцию ошибок в горизонтальных кодовых словах предлагается осуществлять только в случае невозможности декодирования вертикальных, при этом отдавать приоритет тем горизонтальным кодовым словам, в которых на этапе декодирования вертикальных было исправлено максимальное количество ошибок.

Описанный метод предусматривает выполнение следующих этапов:

1. На первом этапе декодируются все вертикальные кодовые слова блока данных. В случае успешного декодирования – устанавливаются флаги отсутствия ошибок, в противном случае – флаги отказа от декодирования.

2. На втором этапе начинается последовательное декодирование горизонтальных кодовых слов. При первом удачном исправлении ошибок в горизонтальном кодовом слове происходит проверка на непротиворечивость со значением флагов, установленных в результате декодирования вертикальных кодовых слов и, в случае отсутствия противоречий, происходит модификация синдромов и возврат к декодированию вертикальных кодовых слов, которые содержат исправленные символы горизонтального кодового слова. В случае обнаружения противоречия фиксируется попытка ложной коррекции кодового слова. В процессе исправления ошибок в символах вертикальных кодовых слов подсчитывается количество исправленных символов для всех горизонтальных кодовых слов, содержащих эти символы.

3. На третьем этапе происходит переход к декодированию горизонтального кодового слова, в котором было исправлено максимальное количество ошибок на втором этапе. Если номер горизонтального кодового слова, в котором было исправлено максимальное количество ошибок меньше, чем номер текущего горизонтального кодового слова, то запоминается текущее положение и происходит возврат к декодированию горизонтального кодового слова с максимальным количеством ошибок. В случае успешного исправления ошибок в горизонтальном кодовом слове, аналогично второму этапу, происходит модификация синдромов и возврат к декодированию вертикальных кодовых слов. Процесс продолжается до достижения последнего горизонтального кодового слова.

4. На четвертом этапе проверяется наличие в блоке данных неисправленных кодовых слов, помеченных флагами отказа от декодирования и флагами ложной коррекции. В случае обнаружения таких слов, выполняется финальное исправление стираний.

Блок схема алгоритма определения номера горизонтального кодового слова, к которому осуществляется возврат в вертикально-настойчивом методе декодирования, представлена на рисунке 3.

В блок схеме используются следующие переменные:

up_flag – флаг возврата к декодированию горизонтального кодового слова;

j_h – номер горизонтального кодового слова;

n_v – количество символов в вертикальных кодовых словах;

$MinNumMaxTCH$ – минимальный номер j_h горизонтального кодового слова с наибольшим количеством исправленных ошибок. При инициализации переменная устанавливается равной n_v . Повторно переопределяется при каждом обращении к массиву TCH с помощью функций $IncTCH$ (инкремент элемента массива) или $DeleteTCH$ (обнуление элемента массива);

j_{h_last} – номер последнего декодированного горизонтального кодового слова.

На рисунке 4 приведены результаты исследования эффективности коррекции ошибок в соответствии с итеративным и вертикально-настойчивым методами.

Цифрами обозначены: 1 – итеративное декодирование с числом итераций равным 4; 2 – итеративное декодирование с числом итераций равным 6; 3 – итеративное декодирование с числом итераций равным 8; 4 – итеративное декодирование с числом итераций равным 10; 5 – вертикально-настойчивый метод декодирования.

Из рисунка видно, что наибольшую корректирующую способность показывает вертикально-настойчивый метод. Корректирующая способность итеративного метода приближается к корректирующей способности вертикально-настойчивого метода при увеличении числа итераций.

Вычислительная сложность вертикально-настойчивого метода меньше сложности итеративного метода с десятью итерациями на 15% при $P_{be} = 0,0061$.

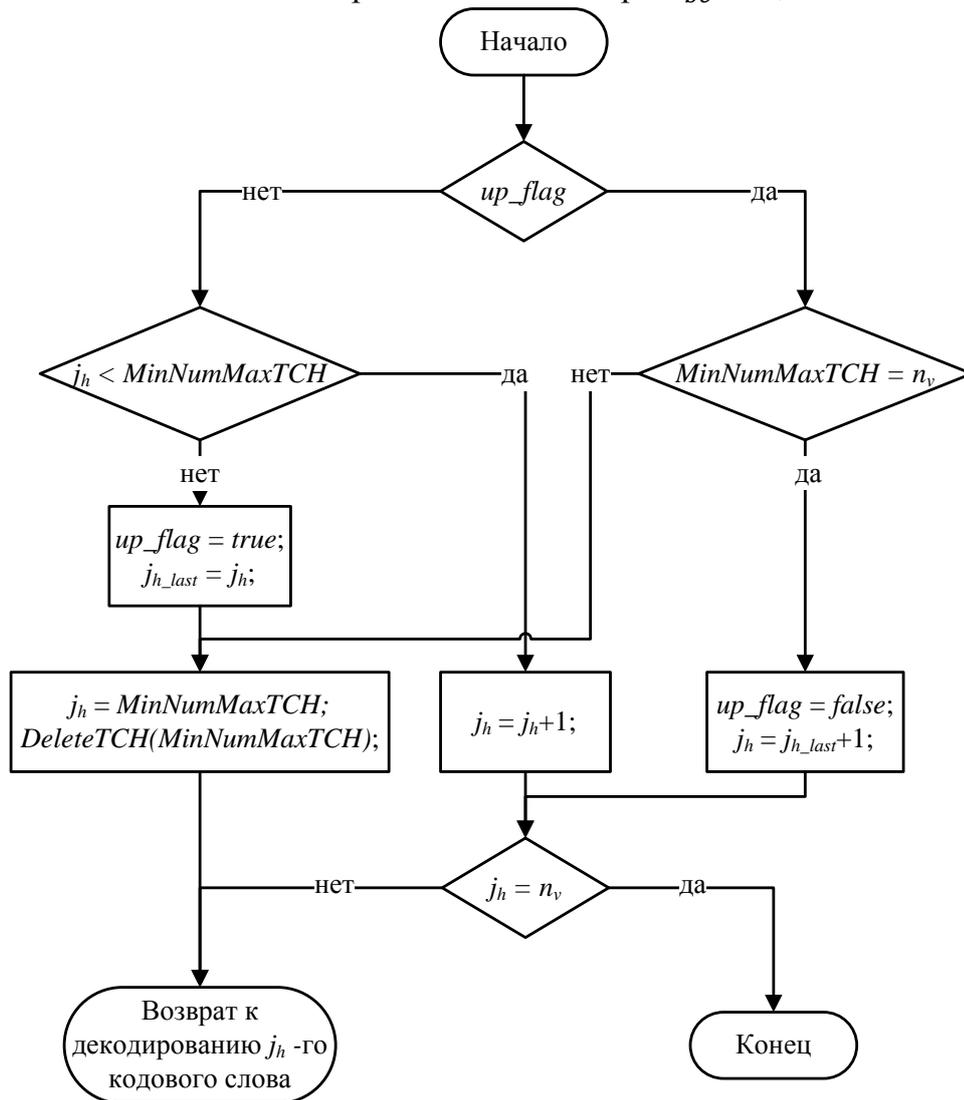


Рис. 3 Блок-схема алгоритма возврата к декодированию горизонтального кодированного слова

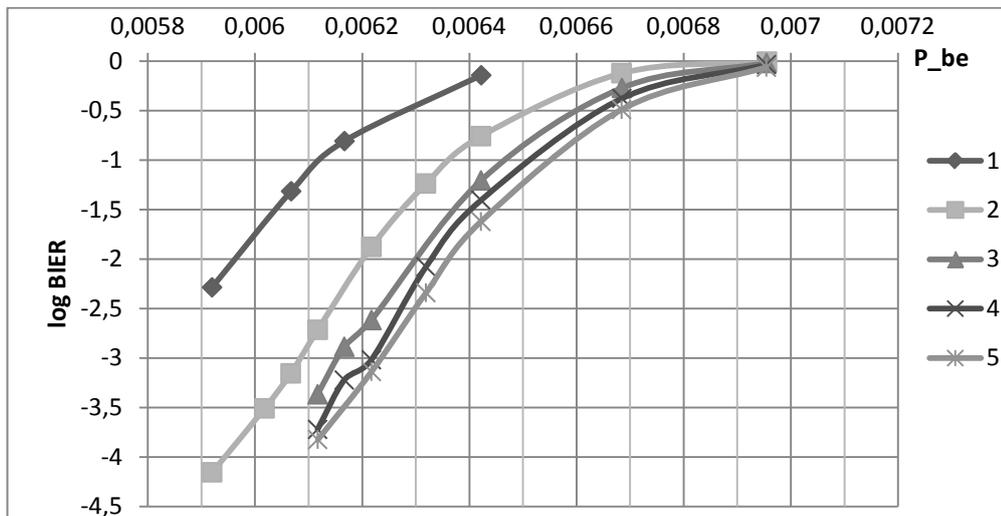


Рис. 4 Зависимость BIER от P_{be} для итеративного и вертикально-настойчивого методов декодирования

Третий раздел посвящен разработке структурно-функциональной организации устройства коррекции ошибок оптической памяти ЭВМ.

Разработанное устройство реализует предложенный аппаратно-ориентированный алгоритм итеративного декодирования. Итеративное декодирование реализуется последовательностью декодеров итераций, каждый из которых исправляет ошибки сначала в вертикальных кодовых словах, затем в горизонтальных. Каждый декодер при исправлении ошибок в вертикальных кодовых словах модифицирует синдромы горизонтальных кодовых слов. При исправлении ошибок в горизонтальных кодовых словах модификацию синдромов вертикальных кодовых слов осуществляет следующий декодер.

Устройство коррекции ошибок работает по конвейерному принципу. Все составляющие его декодеры итераций работают параллельно, обрабатывая последовательно принятые из канала различные блоки данных. Каждый декодер выполняет итерацию алгоритма декодирования, соответствующую его номеру (1-ый декодер выполняет первую итерацию, 2-ой декодер - вторую и т.д.). Структурная схема устройства представлена на рисунке 5

Устройство содержит: 1-ый декодер итерации **1000**, 2-ой декодер итерации **2000**, ..., N -ый декодер итерации **N000**.

На вход 1-го декодера итерации **1000** в течение одного кадра построчно поступают символы блоков данных, принимаемых из канала. На вход второго декодера итерации передаются исправленные блоки данных, модифицированные синдромы горизонтальных кодовых слов $HM-syn_del$, номера вертикальных кодовых слов, в которых происходило исправление ошибок j_v , эти же номера с задержкой на один такт j_v_del , значения модификаций синдромов вертикальных кодовых слов ΔS_v и синдромы вертикальных кодовых слов $VM-syn_del$.

Вторым и последующими декодерами итераций выполняются вторая и последующие итерации алгоритма декодирования.

На выходе ($DBOut$) последнего декодера итерации **N000** формируются исправленные блоки данных ($CorDB$).

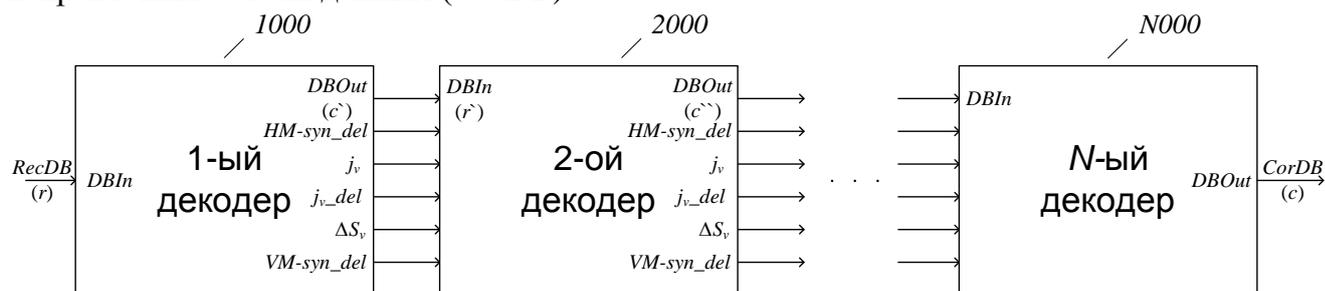


Рис. 5 Структурная схема устройства коррекции ошибок

Первый декодер итерации **1000** (рисунок 6) содержит: буферную память **1001**, сумматор элементов поля Галуа **1002**, сумматор элементов поля Галуа **1003**, блок вычисления синдромов горизонтальных кодовых слов **1100**, блок хранения и модификации синдромов горизонтальных кодовых слов **1200**, блок вычисления полиномов локаторов и значений ошибок горизонтальных кодовых слов **1004**, блок нахождения локаторов и значений ошибок горизонтальных кодовых слов **1300**, блок вычисления значений модификаций синдромов горизонтальных кодовых слов **1400**, блок вычисления значений модификаций синдромов вертикальных кодовых слов **1500**, блок вычисления и хранения синдромов вертикальных кодовых слов **1600**, блок

вычисления полиномов локаторов и значений ошибок вертикальных кодовых слов **1005**, блок нахождения локаторов и значений ошибок вертикальных кодовых слов **1700**, блок хранения значений ошибок вертикальных кодовых слов **1800**.

Блок нахождения локаторов и значений ошибок вертикальных кодовых слов **1700** выполняет дискретное преобразование Фурье полиномов $\Lambda_v(x)$, $\Omega_v(x)$, а также формальной производной $\Lambda'_v(x)$. При этом для всех возможных значений локаторов ошибок вычисляются значения полиномов $\Lambda_v(x)$, $\Omega_v(x)$, $\Lambda'_v(x)$. Выполняется проверка равенства значения полинома локаторов ошибок нулю и, в случае положительного прохождения проверки, фиксируется локатор ошибки x_v и для него вычисляется значение ошибки y_v по формуле Форни. Кроме этого блок **1700** формирует управляющие сигналы "запись модифицированных синдромов (wr_SM)" и "чтение модифицированных синдромов (rd_SM)", а также передает номера горизонтальных кодовых слов j_h и j_{h_del} , в которых были обнаружены ошибки для последующей модификации их синдромов блоком хранения и модификации синдромов горизонтальных кодовых слов **1200**.

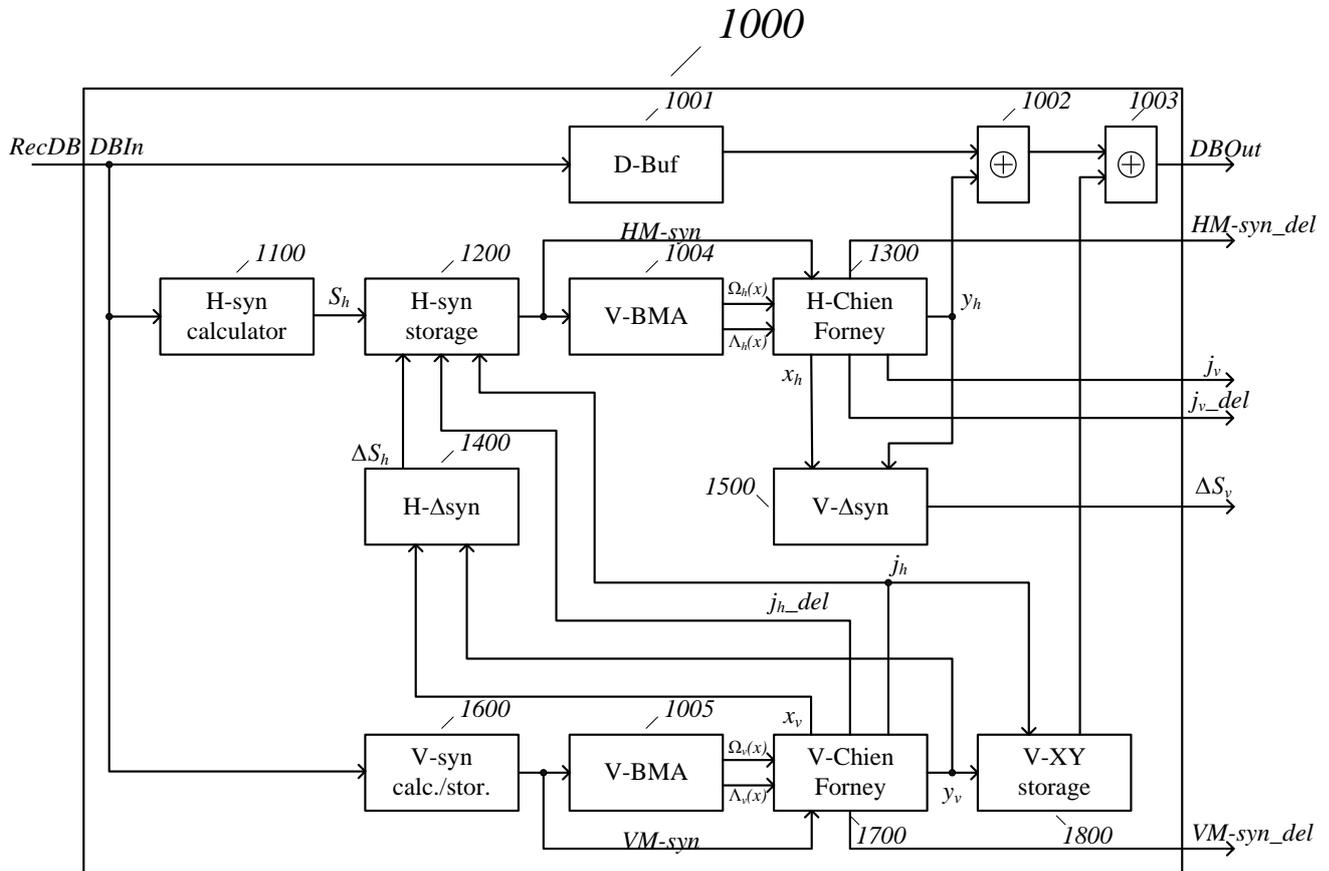


Рис. 6 Структурная схема первого декодера итерации

Блок нахождения локаторов и значений ошибок горизонтальных кодовых слов **1300** выполняет преобразование Фурье многочленов $\Lambda_h(x)$, $\Omega_h(x)$, а также формальной производной $\Lambda'_h(x)$. При этом для всех возможных значений локаторов ошибок вычисляются значения полиномов $\Lambda_h(x)$, $\Omega_h(x)$, $\Lambda'_h(x)$. Выполняется проверка равенства значения полиномов локаторов ошибок нулю и, в случае положительного прохождения проверки, фиксируется локатор ошибки x_h и для него вычисляется значение ошибок y_h по формуле Форни. Управляющие блоком модификации синдромов

сигналы формируются аналогичным с блоком **1700** образом. При этом модификация синдромов выполняется при условии $i_v < k_v$.

Блоки 2-го декодера итерации **2000** идентичны блокам 1-го декодера итерации, за исключением одного блока.

Блок хранения и модификации синдромов вертикальных кодовых слов **2600** модифицирует полиномы синдромов вертикальных кодовых слов на основе данных, полученных от 1-го декодера итерации.

Устройство и работа последующих декодеров итераций аналогична устройству и работе второго декодера итерации.

В конце раздела приводится оценка аппаратной сложности и быстродействия устройства коррекции ошибок оптической памяти ЭВМ.

Аппаратная сложность устройства зависит от количества декодеров итераций и может быть рассчитана по формулам:

$$\begin{aligned} \chi_B &= \chi_B^{dl1} + (N - 1) * \chi_B^{dl2}, \\ \chi_{\Pi} &= \chi_{\Pi}^{dl1} + (N - 1) * \chi_{\Pi}^{dl2} \end{aligned}$$

где χ_B^{dl1} – сложность первого декодера в вентилях; χ_B^{dl2} – сложность второго и последующих декодеров в вентилях, χ_{Π}^{dl1} – количество бит памяти (RAM) в первом декодере; χ_{Π}^{dl2} – количество бит памяти во втором и последующих декодерах, N – число итераций декодирования.

Для реализации первого декодера итерации необходимо 90752 вентиля (χ_B^{dl1}) и 1255424 бит памяти (χ_{Π}^{dl1}). Для реализации второго и последующего декодеров необходимо 89968 вентиля (χ_B^{dl2}) и 1255424 бит памяти (χ_{Π}^{dl2}) на каждый декодер.

При реализации декодера на современных БИС (ASIC) с тактовой частотой 500 МГц, пропускная способность устройства составит 2 Гбит/сек.

В четвертом разделе приводится описание программной модели устройства коррекции ошибок. Здесь же приводится обоснование выбора числа итераций. Кроме этого в разделе представлены результаты исследования разработанного устройства путём имитационного моделирования на ЭВМ с учетом группирования ошибок.

Программная модель, используемая для исследования предлагаемого устройства, разработана с использованием языка программирования C++. Оценка эффективности коррекции ошибок даётся в виде вероятности обнаружения ошибки в блоке данных после его декодирования, а оценка сложности – в виде количества операций в конечных полях по этапам процедуры декодирования.

В программной модели использовалась модель канала Беннета-Фройлиха. Используемая модель канала позволяет учесть группирование ошибок воспроизведения в пакеты, характерные для оптических дисков DVD. Модель Беннета-Фройлиха задается двумя параметрами P_{be} и l_{cp} (средней длины пакета ошибок). Вместо l_{cp} можно использовать параметр геометрического распределения g , связанный с l_{cp} следующим отношением $l_{cp} * (1 - g) = 1$.

С помощью имитационного моделирования исследовалась зависимость эффективности коррекции ошибок итеративным алгоритмом от числа итераций. Результаты моделирования при $P_{be} = 0,0061$ представлены на рисунке 7.

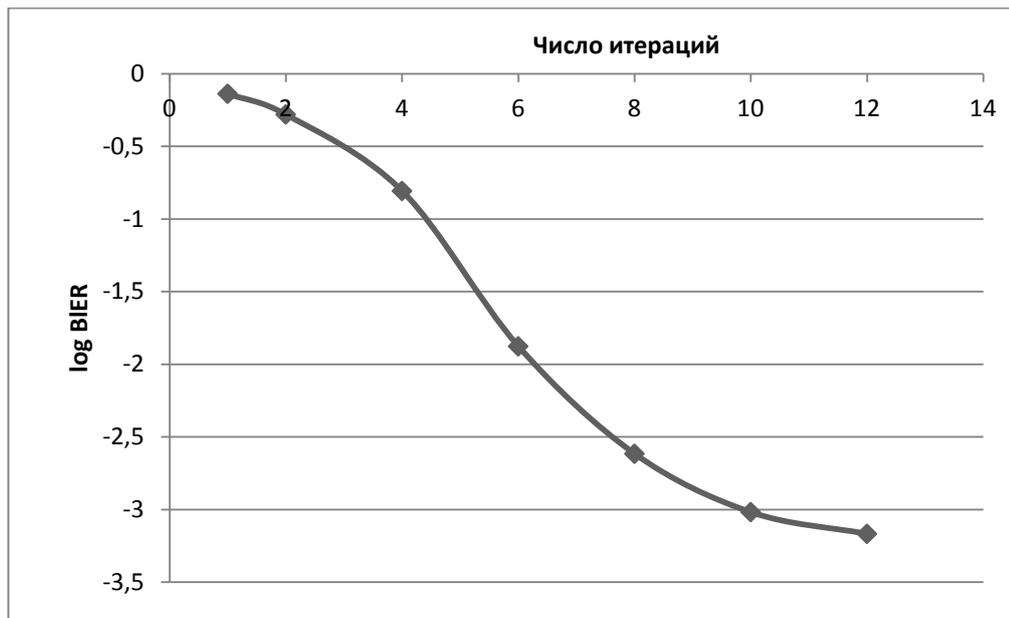


Рис. 7 Зависимость BIER от числа итераций для итеративного алгоритма

Оценки аппаратной сложности разработанного устройства коррекции ошибок для разного числа итераций приведены в таблице 1.

Таблица 1 Сложность и эффективность устройства коррекции ошибок

Число итераций (декодеров)	4	6	8	10	12
Сложность χ_B (вентилей)	360656	540592	720528	900464	1080400
Сложность χ_D (бит памяти)	5021696	7532544	10043392	12554240	15065088
log BIER	-0,81	-1,88	-2,62	-3,02	-3,17
$\Delta \log \text{BIER}$	-	1,07	0,74	0,4	0,15

Аппаратная сложность устройства растёт линейно относительно числа итераций, при этом прирост эффективности $\Delta \log \text{BIER}$ уменьшается, и для 12 итераций его величина падает до 0,15.

Отсюда следует, что наилучшее соотношение эффективности коррекции ошибок и сложности устройства обеспечивает число итераций равное десяти. Для аппаратной реализации устройства коррекции ошибок необходимо 1 млн. вентилей и 1,9 Мбайт памяти, что не выходит за рамки сложности широко используемых в настоящее время декодеров..

На рисунке 8 приведены результаты исследования эффективности коррекции ошибок, возникающих в каналах воспроизведения оптической памяти ($g = 0,5$), разработанным устройством. Цифрами обозначены: 1 – стандартный двухэтапный метод декодирования произведения РС-кодов; 2 – модифицированный метод с финальным исправлением стираний; 3 – итеративный алгоритм с числом итераций равным 10, реализованный в устройстве; 4 – вертикально-настойчивый метод.

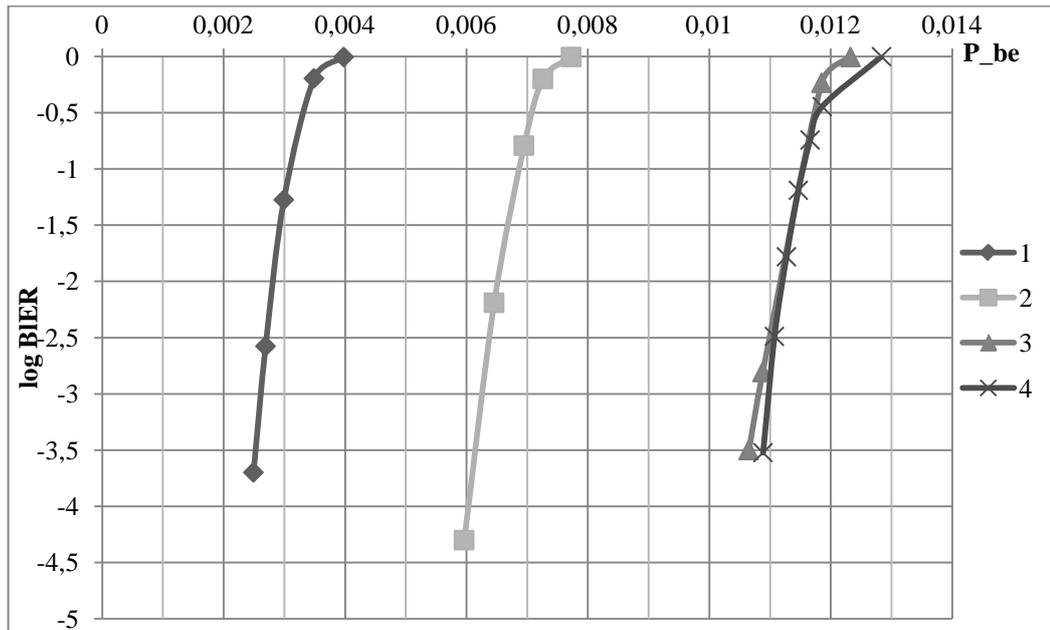


Рис. 8 Зависимость BIER от P_{be} для предложенных методов коррекции ошибок в каналах воспроизведения оптической памяти ЭВМ ($g = 0,5$)

Из рисунка следует, что разработанное устройство обеспечивает увеличение эффективности коррекции ошибок воспроизведения в оптической памяти ЭВМ в 4,2 раза. Это позволяет обеспечить надёжное хранение информации на дисках DVD при увеличении вероятности ошибки в считанных данных также в 4,2 раза.

Оценка основных параметров аппаратной реализации предлагаемых методов и алгоритмов декодирования приведена в таблице 2. Результаты приведены для канала с параметром группирования $g = 0,5$ при величине $\log BIER = -3,5$.

Таблица 2 Основные параметры аппаратной реализации методов декодирования

Метод декодирования	P_{be}	$\frac{1}{P_{be}}$	Сложность X_v (вентилей)	Сложность X_n (бит памяти)	Вычислительная сложность	Задержка декодирования
Стандартный двухэтапный метод	0,0025	1	90752	1255424	$9,78 * 10^8$	0,3 мс
Модифицированный метод с финальным исправлением стираний	0,006	2,4	91136	1260730	$9,81 * 10^8$	0,32 мс
Итеративный алгоритм (10 итераций)	0,0105	4,2	900464	12554240	$9,92 * 10^8$	3 мс
Вертикально-настойчивый метод	0,011	4,4	-	-	$8,5 * 10^8$	-

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приведены данные, полученные в ходе имитационного моделирования, акты внедрения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В диссертационной работе решена научно-техническая задача, заключающаяся в разработке методов, алгоритма и аппаратных средств коррекции ошибок, возникающих в каналах чтения/записи оптической памяти ЭВМ, с повышенной корректирующей способностью и приемлемыми аппаратными затратами.

В ходе решения этой задачи получены следующие основные результаты:

1. Проведён анализ существующих методов, алгоритмов и аппаратных средств коррекции ошибок, возникающих в каналах чтения/записи оптической памяти ЭВМ. В результате данного анализа определены наиболее широко используемые методы коррекции ошибок в оптической памяти ЭВМ и выявлены их недостатки, главным из которых является сложность одновременного обеспечения высокой эффективности исправления небольших пакетов ошибок, свойственных оптической памяти ЭВМ, и приемлемой сложности их аппаратной реализации.

2. Разработан метод декодирования произведения кодов Рида-Соломона, отличительной особенностью которого является финальное исправление стираний. Метод обеспечивает увеличение эффективности коррекции ошибок в считанных с оптического диска данных в 2,4 раза при увеличении вычислительной сложности на 0,3%.

3. Разработан аппаратно-ориентированный алгоритм итеративного декодирования, отличительной особенностью которого является конвейерный принцип обработки блоков данных, обеспечивающий высокую пропускную способность. Реализация алгоритма в устройстве коррекции ошибок обеспечивает увеличение эффективности коррекции ошибок в считанных данных в 4,2 раза.

4. Разработан вертикально-настойчивый метод декодирования произведения кодов Рида-Соломона, отличительной особенностью которого является приоритетная коррекция ошибок в вертикальных кодовых словах. Приведена формализация предлагаемого метода в виде алгоритма декодирования. Метод обеспечивает большую эффективность коррекции ошибок и уменьшение вычислительной сложности на 15% по сравнению с итеративным декодированием.

5. Разработана структурно-функциональная организация устройства коррекции ошибок оптической памяти ЭВМ, реализующего предложенный итеративный алгоритм декодирования; отличительной особенностью которого является конвейерное включение декодеров итераций и использование в них блоков модификации синдромов. Предложенная структурно-функциональная организация обеспечивает высокую пропускную способность устройства – 2 Гбит/сек. Сложность первого декодера итераций составляет 90752 вентилей и 1255424 бит памяти. Сложность второго и последующих декодеров итераций составляет 89968 вентилей и 1255424 бит памяти.

6. С помощью имитационного моделирования на ЭВМ получены зависимости эффективности коррекции ошибок и сложности разработанного устройства от числа итераций декодирования. Показано, что высокая эффективность и приемлемая аппаратная сложность обеспечивается десятью итерациями. При использовании предложенного устройства увеличение эффективности коррекции ошибок воспроизведения в оптической памяти ЭВМ составит 4,2 раза. Это позволит обеспечить надёжное хранение информации на дисках DVD при увеличении вероятности ошибки в считанных данных также в 4,2 раза. Аппаратная сложность устройства составит 1 млн. вентилей и 1,9 Мбайт памяти.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Егоров, С.И. Процедуры коррекции ошибок для оптической памяти [Текст] / С.И. Егоров, А.О. Сазонов, Д.В. Цвелик, **А.В. Кривонос** // Известия вузов. Приборостроение. – 2015. - №2. – С. 109-114.
2. **Кривонос, А.В.** Алгоритм коррекции ошибок для оптической памяти массового применения [Текст] / **А.В. Кривонос** // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2017. – Т. 7. - №3(24). – С. 36-45.
3. Егоров, С.И. Устройство коррекции ошибок для оптической памяти массового применения [Текст] / С.И. Егоров, **А.В. Кривонос** // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2017. – Т. 21. – №6(75). – С. 22-31.
4. Егоров, С.И. Декодирование произведений кодов Рида-Соломона в каналах с группированием ошибок [Текст] / С.И. Егоров, **А.В. Кривонос**, В.С. Титов // Телекоммуникации. – 2018. – №11. С. 15-22.

В других изданиях:

5. Егоров, С.И. Алгоритмы коррекции ошибок для оптических дисков [Текст] / С.И. Егоров, **А.В. Кривонос** // Новые информационные технологии и системы (НИТиС-2014). Сборник научных статей XI Международной научно-технической конференции. – Пенза. – 2014. – С. 128-133.
6. Егоров, С.И. Алгоритмы декодирования произведения кодов Рида-Соломона [Текст] / С.И. Егоров, **А.В. Кривонос** // Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2015: доклады 17-й Международной конференции – М. – 2015. – выпуск XVII. – С.48-52.
7. Егоров, С.И. Алгоритмы декодирования произведения кодов Рида-Соломона для оптических дисков DVD [Текст] / С.И. Егоров, А.О. Сазонов, **А.В. Кривонос** // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обраб. изображ. и символьной информ. Распознавание - 2015: сборник материалов. - Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2015. - С.122-124.
8. **Кривонос, А.В.** Итеративное декодирование произведения кодов для оптических дисков DVD [Текст] / **А.В. Кривонос** // Интеллектуальные и информационные системы. Интеллект – 2015: Материалы Всероссийской научно-технической конференции - Тула: Тульский государственный университет, 2015. – С. 80-84.
9. **Кривонос, А.В.** Алгоритм декодирования произведений кодов Рида-Соломона для оптических дисков DVD с повышенной исправляющей способностью [Текст] / **А.В. Кривонос** // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2016): Сборник статей VI международной заочной научно-технической конференции – Тольятти: Поволжский государственный университет сервиса, 2016. – С. 321-326.
10. **Кривонос, А.В.** Новые алгоритмы декодирования произведения кодов Рида-Соломона для устройств оптической памяти массового применения [Текст] / **А.В. Кривонос** // Информационно-измерительные диагностические и управляющие системы. Диагностика - 2016. Сборник материалов IV региональной научно-технической конференции - Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2016. - С. 71-80.

11. **Кривонос, А.В.** Вычислительная сложность алгоритмов декодирования произведения кодов Рида-Соломона для устройств оптической памяти массового применения [Текст] / **А.В. Кривонос** // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обраб. изображ. и символьной информ. Распознавание - 2017: сборник материалов. - Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2017. – С. 205-207.

12. **Кривонос, А.В.** Устройство коррекции ошибок для оптических дисков DVD [Текст] / **А.В. Кривонос** // Интеллектуальные и информационные системы. Интеллект – 2017: Материалы Всероссийской научно-технической конференции - Тула: Тульский государственный университет, 2017. – С. 209-213.

13. Егоров, С.И. Методы декодирования произведения кодов Рида-Соломона [Текст] / С.И. Егоров, **А.В. Кривонос**, Титов В.С. // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обраб. изображ. и символьной информ. Распознавание – 2018: сборник материалов. – Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2018. – С. 107-110.

14. **Кривонос, А.В.** Эффективность декодирования произведения кодов Рида-Соломона в каналах с группированием ошибок [Текст] / **А.В. Кривонос** // Оптико-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обраб. изображ. и символьной информ. Распознавание – 2018: сборник материалов. – Курск: Юго-Западный гос. ун-т, 2018. – С. 149-151.

Подписано в печать «__» _____ 2018 г.

Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ _____.

Юго-Западный государственный университет.

Издательско-полиграфический центр

Юго-Западного государственного университета.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.