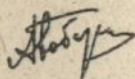


На правах рукописи

УДК 681.083.84



БОБАРЧУК АЛЕКСАНДР АНТОНОВИЧ

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ КАНАЛЬНЫХ И КОМБИНИРОВАННЫХ КОДОВ В
ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИХ ИНФОРМАЦИОННЫХ
СИСТЕМАХ

Специальность 05.09.08 - Электроакустика и звукотехника

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени кандидата
технических наук

Киев, 1992

Работа выполнена в Киевском
и НИИ электромеханических

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00819926 (Z)

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Геранин В. А.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Стахов А. П.,
кандидат технических наук,
доцент Шишкин А. В.

Ведущее предприятие - Киевский НИИ "Марс"

Защита состоится 21 декабря 1992 г. в 15⁰⁰ час. на заседании
Специализированного Совета К 068.14.19 при Киевском политехническом
институте по адресу: 252056, Киев-56, пр. Победы, 37.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Киевского
политехнического института.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный печатью,
просим направлять в адрес института.

Автореферат разослан "12" 11 1992 г.

Учёный секретарь
Специализированного совета
канд. техн. наук, доцент

И. А. Крыжановский

АННОТАЦИЯ

Цель диссертационной работы является развитие ключевых положений современной теории анализа спектральной структуры канальных кодов, совершенствование методов синтеза канальных кодов с зарядовым ограничением, оценка потенциальных возможностей канальных кодов обнаруживать ошибки и обоснование возможности изменения стратегии борьбы с ошибками, сущность которого - возложить на канальные коды функцию обнаружения ошибок.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

разработка инженерного метода расчета строгого замкнутого выражения энергетического спектра канального кода, кодер которого представлен в форме абстрактного автомата Мура при произвольных вероятностях символов на входе кодера;

разработка метода синтеза графа (d,k,c)-последовательности и на его основе метода синтеза (d,k,c)-кода с фиксированной длиной слов;

разработка метода рационального использования избыточности канальных кодов для обнаружения ошибок структуры кодовой последовательности (метод синтеза декодера, обнаруживающего ошибки);

исследование степени обнаружения ошибок канальными и комбинированными кодами.

На заглавие выносятся следующие результаты:

инженерный метод расчета энергетического спектра канального кода, кодер которого представлен в форме абстрактного автомата Мура с записью выходных символов в форме БЭН при произвольных вероятностях символа на входе кодера;

метод синтеза графа (d,k,c)-последовательности и разработанный на его основе метод синтеза (d,k,c)-кодов с фиксированной длиной слов;

инженерный метод синтеза декодеров канальных и комбинированных кодов, реализующий потенциальные возможности обнаружения ошибок и ввод в синхронизм;

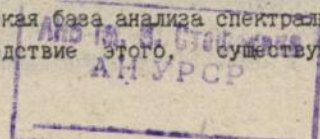
сравнительная оценка эффективности обнаружения ошибок различными версиями декодеров канальных и комбинированных кодов.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Прогресс в цифровой магнитной записи акустических сигналов тесно связан с развитием теории и техники канальных кодов. Известно, что канальный код - обязательный компонент цифровой системы передачи и регистрации информации. Однако на сегодняшний день использование высокоэффективных канальных кодов сдерживается рядом причин.

1. Не до конца разработана аналитическая база анализа спектральной структуры канальных кодов и, как следствие этого, существующий



инженерный метод расчета спектров не всегда адекватен реальной физической ситуации. Кроме того, информации об известных спектрах в справочной литературе явно недостаточно.

2. Из-за специфики тракта магнитной записи (не пропускает "постоянную составляющую" и значительно ослабляет нижние частоты) прогресс в области ЦМЗ невозможен без применения т. н. (d, k, c) -кодов, т. е. кодов, контролирующих величину постоянной составляющей и форму спектра в области нижних частот. Однако на сегодняшний день не существует инженерных методов синтеза канальных кодов с гарантированным значением параметра c - зарядового ограничения.

3. Традиционная структура канала ЦМЗ такова, что в ней обязательно присутствует кодек корректирующего кода. Канальный код в силу избыточности ему присущей также способен контролировать ошибки. Однако стратегия совместной работы декодеров канального и корректирующего кодов с точки зрения контроля ошибок не разработана.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА основных результатов диссертационной работы заключается в следующем.

1. Получено строгое замкнутое выражение энергетического спектра канального кода применительно к кодеру в форме абстрактного автомата Мура для произвольной вероятности символа на входе кодера.

2. Установлено, что множество известных канальных кодов разделяется на два подмножества с ярко и слабо выраженной зависимостью спектральной структуры от вероятности информационного символа.

3. Введены условия, при которых возможны переходы из одного состояния (d, k, c) - последовательности в другое, и на их основе получено выражение, связывающее число состояний минимального графа с численными значениями параметров d, k, c .

4. Введено понятие декодера канального кода, реализующего потенциальные возможности обнаружения ошибок.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ РАБОТЫ

1. Разработаны: инженерный метод расчета спектров канальных кодов ЦМЗ для произвольных вероятностей информационного символа и пакет прикладных программ, позволяющий автоматизировать процесс расчета. На этой основе внесен вклад в банк спектральных характеристик канальных и комбинированных кодов, заложенный Г. Н. Розориновым.

2. Разработаны рекомендации, заключающиеся в том, что применение канального или комбинированного кода с ярко выраженной зависимостью спектральной структуры от вероятности информационных символов должно проводиться с ее учетом. В противном случае необходимо использовать в канале устройства выравнивания вероятности символов (рандомизаторы).

3. Разработан инженерный метод синтеза (d, k, c) -кода с фиксирован-

ной длиной слов на основе графа (d,k,c)-последовательности. Кроме этого полученный граф позволяет рассчитать предельную информативность символа (d,k,c)-последовательности и разработать методы синтеза (d,k,c)-кодов с переменной длиной слов и кодов, зависящих от будущего и кодов с ограниченной задержкой.

4. Разработан инженерный метод преобразования максимального декодера канального и комбинированного кода в декодер, реализующий потенциальные возможности обнаружения ошибок и ввода в синхронизм.

5. Предложен критерий катастрофичности комбинированного кода.

6. Установлено, что применение полного декодера канального и комбинированного кода в режиме обнаружения ошибок и ввода в синхронизм обеспечивает, примерно, на порядок уменьшение вероятности необнаружения ошибки по сравнению с минимальной версией декодера.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ Результаты работы внедрены в НИИ "Марс", г. Киев и Саратовском специализированном конструкторско-технологическом бюро "Видео". Акты о внедрении приведены в приложении к диссертации.

АПРОВАЦИЯ РАБОТЫ Основные научные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- VIII, IX, X, XI, XII, XIII научно-технических конференциях молодых ученых и специалистов Киевского НПО "Маяк", г. Киев, 1985-1990 гг.;

- XIX и XX научно-технических конференций молодых специалистов ПО ВЭФ, г. Рига, 1988, 1989 гг.;

- Всесоюзной научно-технической конференции "Проектирование внешних запоминающих устройств на подвижных носителях", г. Пенза, 1988г.;

- Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов "Молодые ученые в решении комплексной программы НТП стран-членов СЭВ", г. Киев, 1989 г.;

- IX научно-технической конференции молодых ученых и специалистов Центрального НИИ связи, г. Москва, 1990 г.;

- Третьей Всесоюзной научно-технической конференции "Совершенствование технической базы, организации и планирования телевидения и радиовещания", г. Москва, 1990 г.;

- научно-технической конференции "Совершенствование систем магнитной записи", г. Киев, 1990 г.;

- Всесоюзном семинаре, посвященном памяти В. Г. Королькова "Проблемы магнитной записи", г. Москва, 1991 г.

Работа в целом докладывалась на заседаниях кафедр акустики и акустоэлектроники (АИАЭ) и звукотехники и регистрации информации (ЗТРИ) Киевского политехнического института, научно-технического совета НИИ электромеханических приборов, г. Киев.

ПУБЛИКАЦИИ. По основным результатам диссертации опубликовано 19 работ.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Работа состоит двух томов. В первом томе содержатся введение, четыре главы, заключение (140 страниц основного текста, 70 рисунков, 34 таблицы), списка литературы из 140 наименований на 14 страницах. Во втором томе приведены приложения на 148 страницах.

СО Д Е Р Ж А Н И Е

В **ПЕРВОЙ** главе проведен обзор литературных источников по тематике диссертационной работы.

Одной из наиболее важных задач канального кодирования является согласование спектра передаваемого цифрового сигнала с АЧХ канала. Решить ее можно лишь при условии овладения методами расчета энергетических спектров канальных кодов.

В настоящее время известны два подхода к расчету спектров канальных кодов ЦМЗ - на основе состояний кодера и на основе состояний кодовых слов. Итальянскими исследователями во главе с Кариоларо (G. L. Carriolago) получено строгое замкнутое выражение спектра при произвольной вероятности "нулей" и "единиц" на входе кодера в форме автомата Мили, что соответствует первому подходу.

Применительно к модели кодера в форме автомата Мура, соответствующей второму подходу, расчетная формула получена отечественными учеными во главе с Г. Н. Розориновым. Однако при расчете спектра они исходили из предположения, что все слова на входе кодера равновероятны, чем лишили себя возможности учесть произвольную вероятность информационных символов. Следует отметить, что данное допущение не всегда верно, поскольку информация на кодер канального кода обычно поступает с выхода кодера корректирующего кода, который в общем случае изменяет вероятность "нулей" и "единиц" даже тогда, когда на его входе символы равновероятны.

В результате автомат Мура и произвольное распределения вероятности символов оказалось неисследованным. Это и обусловило первую задачу работы - получить выражение энергетического спектра канального кода применительно к автомату-кодеру Мура при любых вероятностях символов на его входе.

В системах связи, цифровой оптической и магнитной записи, где каналы значительно ослабляют низкочастотные спектральные составляющие сигнала, помимо (d, k) ограничений вводят еще одно ограничение - на максимум модуля цифрового заряда. Канальные коды с зарядовым ограничением называют (d, k, c) -кодами.

Наиболее остро проблема зарядового ограничения стоит перед специалистами в области цифровой звукозаписи, особенно наклонно-строчной.

Однако успехи здесь ограничиваются лишь несколькими конкретными кодами, синтезированными интуитивно. Поэтому задача разработки метода синтеза (d, k, c) -кода одна из основных в настоящей диссертационной работе.

Канальные коды неизбежно обладают избыточностью и не использовать ее с целью контроля ошибок, возникающих в канале, по меньшей мере расточительно.

Ситуация в этой области ЦМЗ парадоксальна. С одной стороны, специалисты в области канального кодирования вносят конкретные частные предложения, направленные на обнаружение ошибок. Судят об этом по нарушению структуры (d, k) -последовательности, либо зарядового ограничения. Мало того, канальные коды трансформируют таким образом, чтобы привить им способность обнаруживать ошибки. Такие коды именуются комбинированными кодами.

С другой стороны, специалисты в области корректирующего кодирования решают задачи повышения достоверности ЦМЗ независимо от разработчиков систем канального кодирования. Традиционно задача корректирующего кодирования в ЦМЗ из-за пакетного характера ошибок решается итеративно (каскадно). Первый каскад (внутренний) лишь обнаруживает ошибки, а второй (внешний) - исправляет их.

Естественным было бы желание возложить функцию обнаружения ошибок на канальные коды. Для этого необходимо оценить потенциальные возможности канальных кодов обнаруживать ошибки и если результат окажется достаточно весомым, то следует изменить стратегию борьбы с ошибками: поручить канальным кодам обнаруживать ошибки, а корректирующим кодам - их исправлять. Конечная цель этих усилий - уменьшение аппаратных затрат.

Однако, для этого, прежде всего, нужен декодер канального кода, реализующий потенциальные возможности канальных кодов обнаруживать ошибки. Отсюда третья задача работы - ввести в теорию и практику канального кодирования понятие "декодер канального кода, реализующий потенциальные возможности кода обнаруживать ошибки" и разработать регулярный метод его синтеза.

Практическая значимость возможности обнаружения ошибок за счет избыточности, присущей канальным кодам, может быть оценена если вероятность обнаружения ошибки будет столь велика, что цена, которую необходимо заплатить за усложнение декодера, вполне допустима. Ответ на этот вопрос можно получить поставив содержательный эксперимент, результатом которого была бы потенциальная вероятность обнаружения ошибок канальным кодом. И это, конечно, должен быть машинный эксперимент. Разработка тактики такого эксперимента и проведение его на ЭВМ - четвертая задача работы.

Альтернативой традиционным канальным кодам являются комбинированные коды, которые в силу наличия (d, k) ограничений выступают как канальные коды, а в силу наличия расстояния Хэмминга способны полностью исправлять некоторые одиночные ошибки и даже множественные ошибки невысокой кратности. На пути развития совершенной теории комбинированных кодов стоят, по меньшей мере, три проблемы.

Первая проблема связана с установлением обоснованной системы дистанционных параметров комбинированных кодов. В работах исследователя из ЮАР Феррейры (H. C. Ferreira) введены три параметра - D_{rem} , D_{min} , D_{free} . Однако не установлена взаимосвязь между ними и не определено, какой параметр отвечает за потенциальную и реальную корректирующие способности комбинированного кода.

Вторая проблема связана с поиском предельной информативности символа (ПИС) кодов с (d, k) или (d, k, c) -ограничениями и требуемой контролирующей способностью. Применительно к комбинированным (d, k) -кодам она решена в диссертационной работе Ли (P. J. Lee). Для (d, k, c) -кодов, контролирующих ошибки, эту задачу еще предстоит решить.

Третья проблема обозначена как разработка регулярного метода синтеза комбинированного кода с заданными параметрами d , k , c , скоростью R и контролирующей способностью.

На пути к ее решению прослеживаются

два подхода, которые условно можно обозначить так: "от корректирующего кода к комбинированному" и "от канального кода к комбинированному".

Первый разработан в цикле статей Феррейры с соавторами, опубликованных в 1983 - 1987 гг., где комбинированные коды синтезированы на основе диаграмм состояний выколотых сверточных кодов, принимаемых в качестве базовых.

В диссертационной работе поставлена задача полностью решить первую проблему - завершить разработку системы дистанционных параметров комбинированных кодов, по крайней мере в рамках метрики Хэмминга, а в пределах третьей проблемы модернизировать синтез комбинированных кодов Феррейры в целях уменьшить длину кодового слова.

Во второй главе получено строгое замкнутое выражение спектра применительно к кодеру в форме автомата Мура при произвольной вероятности информационного символа на входе кодера, а также получены спектральные характеристики канальных и комбинированных кодов ЦМЭ.

Разработаны два метода расчета энергетических спектров на основе состояний кодера (автомата Мили) и на основе состояний кодовых слов (автомата Мура). В обоих методах предусматривается учет влияния закона распределения информационных символов на энергетический спектр кодированного сигнала. Считается, что информационные символы на входе ка-

нального кодера независимы.

Разработан и отлажен пакет прикладных программ, реализующий оба метода. Программы написаны на препроцессоре фортрана - ратфоре и реализованы на ЭВМ типа СМ-1420 под управлением РАФОС. Тексты программ приведены в приложении к диссертационной работе. На этой основе решена задача автоматизации процесса расчета спектров. Исходными данными для расчетов является кодер в форме абстрактного автомата с представлением кодовых слов способом БВН, результатом - семейство графиков спектров, соответствующих различным вероятностям информационного символа.

Рассчитаны спектры 22-х канальных и комбинированных кодов, используемых в ЦМЗ, причем впервые получены спектры кодов, которые несмотря на то, что приняты в качестве международных стандартов (например, коды НДМ-1, Миллер-квадрат, код (2,7)), инженеры могли видеть лишь на экране спектроанализатора. На рис. 1 приведены спектральные характеристики канальных кодов Френч (2,10), (2,7), НДМ-1 и комбинированного кода Феррейры (0,3,2) с $R=3/6$.

Установлен научный факт, имеющий важное прикладное значение. Оказалось, что коды можно разделить на две характерные группы, отличительным признаком которых является чувствительность формы спектра к распределению вероятности информационных символов. Одна группа инвариантна к изменению вероятности информационных символов, а другая нет. Для инженера важно знать к какой группе принадлежит код: во втором случае учет вероятностной структуры информационных символов обязателен.

В ТРЕТЬЕЙ главе вначале рассмотрена процедура удлинения (d,k) -последовательности на один и несколько символов. Для (d,k) -последовательности характерно, что смежные символы "1" разделены не менее d и не более k подряд следующими символами "0". Графическая интерпретация процедуры удлинения (d,k) -последовательности на один символ - ориентированный граф (рис. 2). Он имеет $k+1$ состояний, соединенных направленными дугами, которые нагружены символами, переводящими одно состояние в другое.

Основологающим понятием, применяемым для описания модели (d,k) -последовательности, является понятие окончания последовательности двояких символов, введенное Б. М. Раковым - совокупности последних символов "0", начинающихся с последней "1". Окончание обозначается Φ_j , где $j = (0, 1, \dots, k)$ - число символов "0" в окончании.

Аналитически (d,k) -последовательность описывается двумя матрицами - матрицей смежности D и матрицей выходных слов A . Обе матрицы имеют размерность $(k+1) \times (k+1)$. Элемент $D(i, j)$ первой матрицы - число дуг, выходящих из состояния Φ_i и входящих в Φ_j . Элемент $A(i, j)$ второй мат-

рицы - символ, нагружающий адекватную дугу графа. Граф, матрицы D и A формализуют процедуру удлинения (d, k)-последовательности на один такт. Удлинение последовательности на n тактов описывается n-й степенью графа и матриц.

Часто к каналному коду предъявляют требования нулевой "постоянной составляющей" в спектре сигнала записи. Они выполняются если в канальном коде помимо d и k ограничений имеется ограничение на рост модуля цифрового заряда. В этом случае кодированные последовательности именуется (d, k, c)-последовательностями, а адекватные им коды - (d, k, c)-кодами.

Искомый граф (d, k, c)-последовательности представляет собой объединение подграфов вида, изображенного на рис. 2 с соблюдением зарядового ограничения.

Если обозначить каждое состояние графа тройкой символов $[\Phi_j, f, g]$, где Φ_j - окончание последовательности, $f = \{-c, -c+1, \dots, c\}$ - заряд, накопленный последовательностью, $g = \{+1, -1\}$ - приращение заряда при переходе в данное состояние, нетрудно сообразить, что правило перехода из одного состояния в другое выглядит следующим образом:

$$[\Phi_j, f, g] \rightarrow \begin{cases} [\Phi_{j+1}, f+g, g], & \text{если } j < k-1 \text{ и } |f+g| < c \\ [\Phi_0, f-g, -g], & \text{если } j >= d \text{ и } |f-g| < c. \end{cases} \quad (1)$$

Поскольку состояния $[\Phi_j, f, g]$ и $[\Phi_j, -f, -g]$ изоморфны в смысле символов, удлиняющих последовательность, исходный граф минимизируется. Правило (1) можно переписать в следующем виде (для $g=+1$):

$$[\Phi_j, f] \rightarrow \begin{cases} [\Phi_{j+1}, f+1], & \text{если } j < k-1 \text{ и } |f+1| < c \\ [\Phi_0, -f+1], & \text{если } j >= d \text{ и } |-f+1| < c. \end{cases} \quad (2)$$

Состояния с Φ_0 назовем рестартовыми. В работе выведено расчетное соотношение, связывающее число состояний L минимального графа (d, k, c)-последовательности с численными значениями d, k и c:

$$L = 2c-d+k(2c-k-1)+(k+1-d)(k+d)/2. \quad (3)$$

Метод синтеза графа (d, k, c)-последовательности формулируется следующим образом.

1. Рассчитывается число состояний графа по формуле (3).
2. Выявляются все рестартовые состояния для заданного зарядового

ограничения. Из них выбираются лишь те, которые удовлетворяют d -ограничению.

3. Формируются оставшиеся нерестартовые состояния для каждого из допустимых рестартовых состояний исходя из k и s ограничений.

4. Устанавливаются переходы между состояниями графа в соответствии с (2).

На рис. 3 и 4 приведены графы $(0,1,1)$ и $(1,2,2)$ -последовательностей, синтезированные разработанным методом.

На основе графа (d,k,c) -последовательности разработан метод синтеза (d,k,c) -кодов с фиксированной длиной слов. Он является обобщением известного метода Франашека синтеза (d,k) -кодов на (d,k,c) -коды.

Последовательность действий при синтезе (d,k,c) -кода такова.

1. По заданным значениям d , k и c синтезировать минимальный граф (d,k,c) -последовательности и адекватные ему матрицы D и A .

2. Из таблиц, либо по формулам найти значение предельной информативности символа I_p для заданного сочетания d , k и c .

3. Выбрать минимальные длины информационного M и кодового слов N , чтобы максимизировать значение R/I_p , где $R=M/N$.

4. Возводить матрицу D последовательно в степени N , $2N$, $3N$ и т. д. до появления так называемых базовых состояний. Установить тем самым значения m и n .

5. Возвести матрицу A в степень n . Сформировать множества кодовых слов для каждого из состояний кодера.

6. Составить таблицу кодирования, установив соответствие кодовых слов информационным.

В работе синтезированы два кода - $(0,1,1)$ -код с кодовой скоростью $R=1/2$, известный в литературе как код ОФМ, и новый $(1,2,2)$ -код с кодовой скоростью $R=1/4$. Достоинства нового кода - свобода от "постоянной составляющей", малая интервальность кода (разность между k и d равна 1) и, как следствие этого, узкополосный спектр.

Последующие три параграфа главы посвящены развитию теории комбинированных кодов. Вначале разработана система дистанционных параметров комбинированных кодов. Показано, что исчерпывающим образом комбинированный код характеризуется четырьмя минимальными расстояниями Хэмминга: столбцовым D_1 , свободным D_{free} , минимальным D_{min} и расстоянием слияния кодовых путей D_{gem} . Установлено, что ключевым из них является столбцовое расстояние D_1 , которое порождает расстояния D_{free} и D_{min} .

В следующем параграфе разработан критерий катастрофичности комбинированного кода, позволяющий на этапе выбора избегать применения кода с катастрофическим размножением ошибок.

Затем предложено усовершенствование метода Феррейры синтеза комби-

нированного кода с заданными $R=m/n$, D_{min} , свободного от "постоянной составляющей" с ненормируемыми значениями параметров d и k с целью уменьшения длины кодового слова.

В работе синтезированы два комбинированных кода: (0,3,4)-код с $R=2/4$, $D_{free}=3$ и (0,3,2)-код с $R=2/6$, $D_{rem}=6$. Для синтеза первого кода применены специальные методы ограничения цифрового заряда.

В последнем параграфе главы введено понятие "декодер канального кода, реализующего потенциальные возможности обнаружения ошибок" канальными и комбинированными кодами и разработан метод построения такого декодера.

Сущность введенного понятия заключается в том, что декодер в форме абстрактного конечного автомата Мили часто получается не полностью определенным: переходы из некоторых состояний определены не для всех входных букв. Это означает, что соответствующее сочетание входной буквы и состояния автомата несовместимо со структурой кодовой последовательности. Возможное наступления такого случайного события может быть лишь следствием ошибки в канале.

Для того, чтобы декодер мог обнаруживать ошибки такого рода предлагается следующий метод.

1. Дополнить автомат-декодер инициальным автоматом, в начальное состояние которого будет переходить декодер всякий раз при обнаружении несовместимой со структурой входной последовательности. Основное назначение инициального автомата - вводить автомат-декодер в синхронизм в начале работы, после сбоя или в результате обнаружения ошибки.

2. Каждый прочерк в таблице переходов автомата-декодера доопределить переходом в начальное состояние.

3. Дополнить множество входных букв декодера до полного набора всех n -разрядных букв. По буквам, не являющимся разрешенными, переходы определить в начальное состояние.

4. Расширить множество выходных букв декодера буквой "ERR", которую в совмещенной таблице переходов и выходов совместить с переходом автомата в начальное состояние и нахождением его в инициальной части при вхождении декодера в синхронизм.

В работе метод получения декодера с обнаружением ошибок проиллюстрирован на примере построения автомата-декодера кода НДМ-1. Синтезированы также автоматы-декодеры канальных и комбинированных кодов различной сложности: с минимальным числом состояний, полный с обнаружением ошибок без ввода в синхронизм, полный с обнаружением ошибок и вводом в синхронизм.

Данный метод использован при разработке макетного образца устройства записи и воспроизведения цифровой информации на бытовой видео-

магнитофон. Работа выполнена для Саратовского СКТБ "Видео". В устройстве применен каналный код 8/10, декодер которого синтезирован как обнаруживающий ошибки, что позволило упростить алгоритм помехоустойчивого декодирования и, примерно, на 30% сократить аппаратные затраты на построение всего устройства при сохранении заданной достоверности записанной информации.

Аналогичный декодер синтезирован для кода (2,7), применяемому в соответствии с международным стандартом ISO/IEC/DIS 9171-2 в устройстве записи-воспроизведения цифровой информации на оптический диск. Работа выполнена по заказу Киевского НИИ "Марс".

ЧЕТВЕРТАЯ глава в целом посвящена проблеме оценки потенциальных способностей обнаружения ошибок различными версиями декодеров каналных и комбинированных кодов.

Был реализован машинный эксперимент, основа которого - аргументированная математическая модель ошибок в канале ЦМЗ и обоснованный метод обнаружения ошибок. Методом Монте-Карло моделировались процедуры генерирования информационного потока данных и возникновения ошибок. Кодирование каналным кодом и декодирование избыточным декодером осуществлялось в соответствии с алгоритмом кодирования и декодирования. В результате исследований получены зависимости вероятности необнаруженных ошибок от вероятности ошибок в канале.

При исследовании указанных свойств кодов использовались две модели источника ошибок - независимых и пакетных.

Модель источника независимых ошибок представлена автоматом с одним состоянием, графоид которого представлен на рис. 5. Параметром модели является вероятность появления ошибки P . Модель источника пакетных ошибок - автомат с двумя состояниями. Первое состояние соответствует "хорошему" состоянию канала (в котором в данный момент нет ошибок), второе - "плохому" состоянию канала (пораженному ошибкой). Графоид модели приведен на рис. 6. Модель имеет два параметра - вероятность перехода из "хорошего" состояния - P_1 и вероятность нахождения в "плохом" состоянии - $P_2=1/2$.

Проведено исследование каналных и комбинированных кодов ЦМЗ. На рис. 7 приведены результаты, полученные для некоторых кодов.

Исследования различных версий декодеров при наличии ошибок в канале привели к выводам, что вероятность необнаруженных ошибок различна для различных версий декодеров и обратно пропорциональна сложности декодера (числу состояний автомата-декодера). При переходе от минимальной версии к версии с обнаружением ошибок без ввода в синхронизм и затем к версии с обнаружением ошибок и вводом в синхронизм вероятность необнаруженных ошибок уменьшается, в среднем, в 5-10 раз для каналных

и в 10-100 раз для комбинированных кодов.

Таким образом, гипотеза, выдвинутая вначале, полностью подтвердилась и дает основание считать, что возможно изменение стратегии борьбы с ошибками: обнаружение ошибок возложить на каналный код, а исправление поручить корректирующему коду. Такое распределение функций приводит к тому, что система кодирования в целом упрощается на 30...50% за счет отказа от внутреннего корректирующего кода, либо упрощения его декодера при сохранении той же достоверности передачи информации.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ сформулированы основные результаты работы.

ПРИЛОЖЕНИЯ включают некоторые вспомогательные методики и результаты, тексты и структурные схемы алгоритмов основных программ, а также акты о внедрении результатов работы.

Основные результаты диссертации изложены в работах:

1. Геранин В. А., Жила Н. И., Бобарчук А. А., Смирнов Ю. М. Строгое замкнутое выражение спектра каналного кода ЦМЗ // Техника средств связи, сер. Общетеchnическая. - 1985. - Вып. 2. - С. 30-45.
2. Куля В. И., Смирнов Ю. М., Бобарчук А. А. Автоматное описание преобразователей каналных кодов ЦМЗ // Там же. - 1986. - вып. 2. - С. 24-29.
3. Геранин В. А., Смирнов Ю. М., Бобарчук А. А., Дяченко Е. Б. Составление трех вариантов каналного кода Миллер-квадрат // Там же. - 1989. - N 4. - С. 10-20.
4. Геранин В. А., Бобарчук А. А., Горошко С. П., Богданов Н. Г. Канальные коды, контролирующие ошибки - шаг к единой теории кодирования (состояние проблемы) // Там же. - 1990. - N 4. - С. 21-39.
5. Геранин В. А., Жила Н. И., Бобарчук А. А., Смирнов Ю. М. Метод расчета спектров каналных кодов ЦМЗ при произвольных вероятностях информационных символов // Вестник Киев. политехн. ин-та. Электроакустика и звукотехника. - 1987. - вып. 11. - С. 21-29.
6. Автоматы-преобразователи форм кодеров каналных кодов. / В. А. Геранин, Ю. М. Смирнов, А. А. Бобарчук и др. // Там же. - 1990. - Вып. 14. - С. 3-14.
7. Бобарчук А. А. Учет влияния закона распределения информационных символов на энергетический спектр кодированной последовательности в цифровой магнитной записи // VIII науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов предприятия, 23-26 апреля 1985. - М.: ЦОИТИ "Экос". - 1985. - С. 8.
8. Бобарчук А. А., Забиров Ю. И. Пакет прикладных программ для анализа спектральной структуры каналных кодов ЦМЗ // Межд. науч.-техн. конф. студ., молод. уч. и спец.: Молодые ученые в решении комплексной программы научно-технического прогресса стран-членов СЭВ, 19-20 апреля 1989. - Киев: КПИ. - 1989. - С. 173.

9. Устройство цифрового кодирования звуковых сигналов в системе "Компакт диск"/ А. А. Вобарчук, Ю. М. Смирнов, С. П. Горошко и др. //XII науч.-техн. конф. молод. уч. и спец.: Методы и средства записи и воспроизведения сигналов в системах передачи и обработки информации, 26-29 сент. 1989. - М.: ЦООНТИ "Экос". - 1989. - С. 10-11.

10. Смирнов Ю. М., Вобарчук А. А. Об одном способе аппаратурной реализации кодера канального кода EFM в стандарте "Компакт диск"/Там же. - С. 15-16.

11. Вобарчук А. А., Забиров Ю. И. Анализ спектральной структуры канальных кодов// XX науч.-техн. конф. молодых спец. ПО ВЭФ. - Рига, 1989. - С. 33-34.

12. Геранин В. А., Вобарчук А. А., Горошко С. П., Богданов Н. Г. Комбинированные коды (обзор)//XIII науч.-техн. конф. молод. уч. и спец. Киев. НПО "Маяк": Методы и средства записи и воспроизведения сигналов в системах передачи и обработки информации, 18-21 сент. 1990. - Киев, 1990. - С. 20-21.

13. Геранин В. А., Вобарчук А. А., Горошко С. П., Богданов Н. Г. Дистанционные свойства комбинированных кодов ЦМЗ//Там же. - С. 22-23.

14. Геранин В. А., Вобарчук А. А., Горошко С. П., Богданов Н. Г. Синтез комбинированного кода для ЦМЗ//Там же. - С. 23-24.

15. Система помехоустойчивого кодирования для накопителя на базе бытового видеомэгнитофона/ Ю. М. Смирнов, А. А. Вобарчук, С. П. Горошко и др. //Там же. - С. 41-42.

16. Геранин В. А., Вобарчук А. А., Горошко С. П. Комбинированные коды в цифровой магнитной записи//Семинар, посв. памяти В. Г. Королькова: Проблемы магнитной записи, 17-19 апреля 1991. - М.: ВНИИТР, 1991. - С. 55-56.

17. Геранин В. А., Вобарчук А. А., Горошко С. П. Метод синтеза канальных кодов с зарядовым ограничением//Там же. - С. 53-55.

18. Вобарчук А. А., Горошко С. П. Влияние зарядового ограничения на структуру спектра кодированной последовательности//Там же. - С. 56.

19. Смирнов Ю. М., Вобарчук А. А., Дележа В. В. и др. Анализ возможных путей построения систем помехоустойчивого и канального кодирования цифровой информации на оптический носитель//Там же. - С. 51-52.

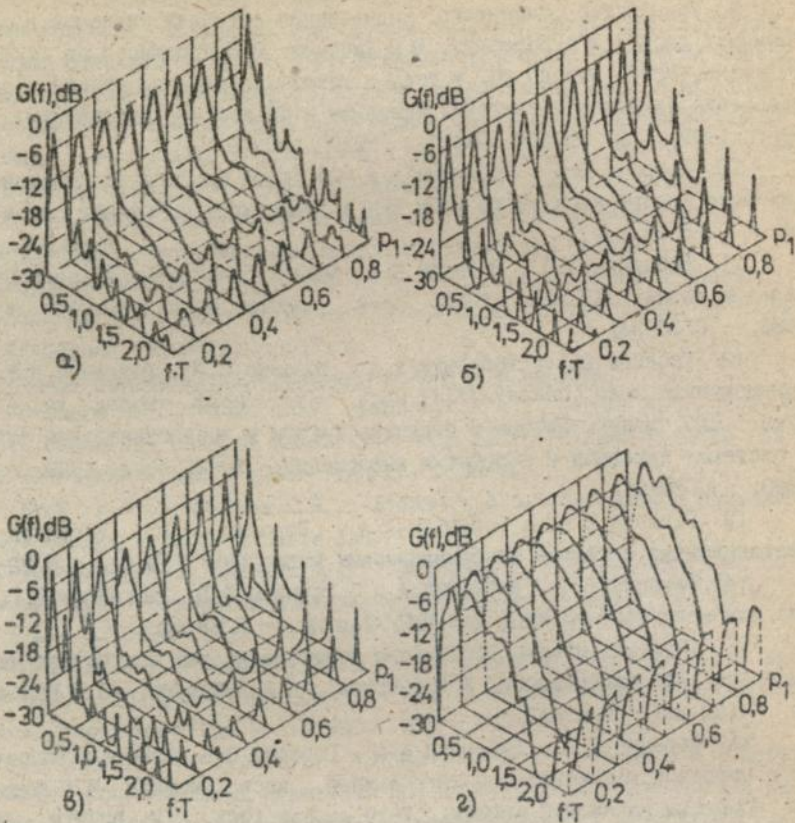


Рис. 1 Семейства графиков энергетических спектров кодов:

- а) - канального Френч (2,10);
- б) - канального (2,7);
- в) - канального НДМ-1;
- г) - комбинированного Феррейры (0,3,2) с $R=3/6$.

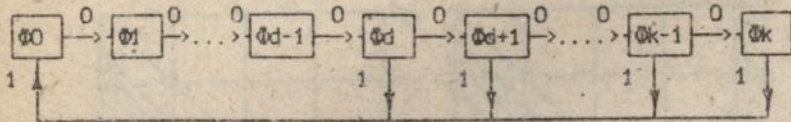


Рис. 2 Граф (d, k) последовательности

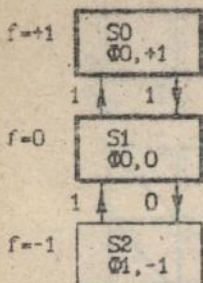


Рис. 3 Минимальный граф (0, 1, 1)-последовательности

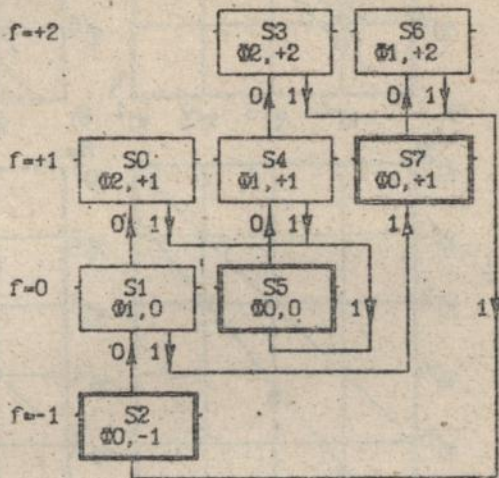


Рис. 4 Минимальный граф (1, 2, 2)-последовательности

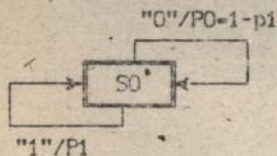


Рис. 5 Графoid модели источника независимых ошибок

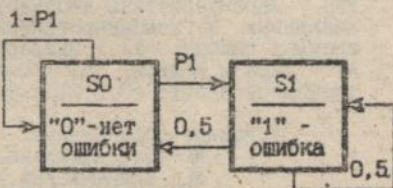


Рис. 6 Графoid модели источника пакетных ошибок

АНБ им. В. Стефанки
АН УРСР

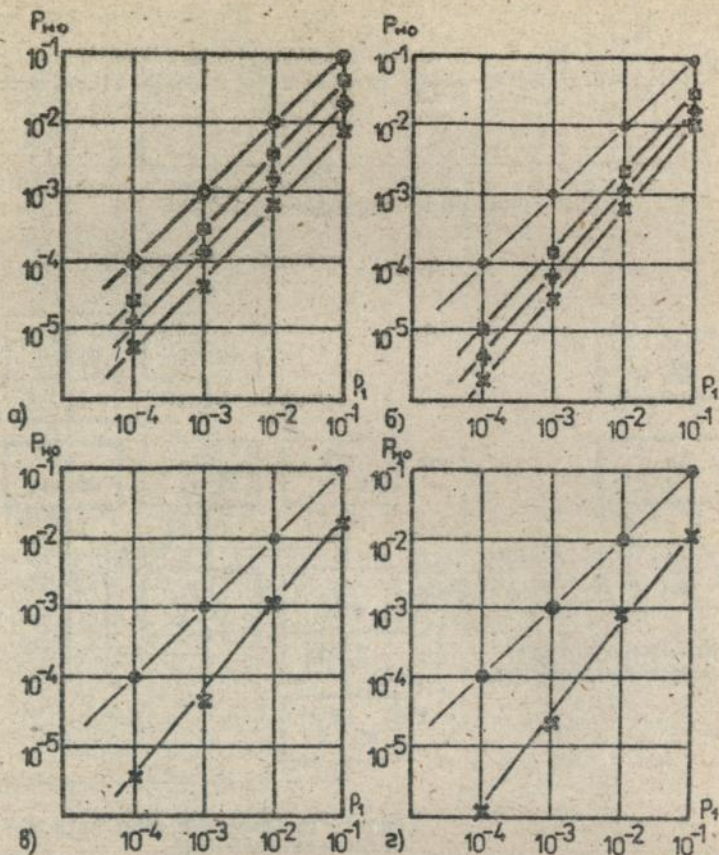


Рис. 7 Характеристики необнаруженных ошибок некоторых канальных и комбинированных кодов для модели независимых ошибок: а) - Миллера; б) - Миллер-квадрат; в) - Лина и Вольфа; г) - синтезированного в диссертационной работе (0,3,2) с $R=2/6$.

Условные обозначения:

- - без канального кода;
- - минимальный декодер с обнаружением ошибок;
- +
- ✱ - полный декодер с обнаружением ошибок и вводом в синхронизм.

Sur. 6360-100

469128

AB 26.207