

На правах рукописи



Овинников Алексей Анатольевич

**АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА
ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ В
СИСТЕМАХ ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ**

Специальность:

05.12.04 — «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание
учёной степени кандидата технических наук

Рязань 2017

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: **Витязев Владимир Викторович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», заведующий кафедрой телекоммуникаций и основ радиотехники

Официальные оппоненты: **Гладких Анатолий Афанасьевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный технический университет»

Башкиров Алексей Викторович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Ведущая организация: **ЗАО «Московский научно-исследовательский телевизионный институт»**

Защита диссертации состоится «1» декабря 2017 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» и на официальном сайте <https://www.rsreu.ru/ru/>

Автореферат разослан «__» сентября 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
д.т.н., доцент



Овечкин Г.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Стремительное развитие микроэлектроники в конце XX века заложило основу для создания современных стандартов и технологий высокоскоростной передачи данных, которые в настоящее время используются при проектировании огромного количества технических устройств и систем. При этом параллельно с усовершенствованием элементной базы постоянно улучшаются и усложняются методы и алгоритмы обработки сигналов. В частности, ужесточение требований к минимальной скорости передачи данных, пропускной способности и помехоустойчивости заставляет исследователей и разработчиков искать новые пути решения возникающих проблем. Одним из методов, позволяющих в значительной степени снизить сложность рассматриваемых задач, является помехоустойчивое кодирование. Благодаря энергетическому выигрышу от использования кодирования (ЭВК) с исправлением ошибок системы передачи данных получают дополнительные преимущества, которые можно конвертировать в улучшение различных характеристик радиотехнических и телекоммуникационных средств и систем. Среди них стоит выделить: увеличение скорости передачи данных в заданной частотной полосе при увеличении позиционности модуляции, повышение дальности связи, уменьшение требуемой мощности передатчика. При этом внесение задержки и уменьшение скорости передачи информации являются основными недостатками любой схемы кодирования. Поэтому проблема повышения ЭВК является чрезвычайно актуальной для отечественных и зарубежных исследователей.

В области канального кодирования, начиная с середины 90-х годов XX века, наиболее актуальным и перспективным решением является использование итеративно-декодируемых кодов, к которым относятся турбо- и низкоплотностные коды. Значительный вклад в развитие современной теории кодирования внесли такие зарубежные и отечественные учёные, как Р. Галлагер, К. Берроу, Д. Маккай, Р. Нил, М. Таннер, Р. Урбанке, Т. Ричардсон, С. Лин, Х. Ксяо, Д. Зигангиров, В. Зяблов, В. Золотарёв, Г. Овечкин и другие. В настоящий момент существуют два взаимодополняющих направления исследования и разработки передовых систем помехоустойчивого кодирования. Первое из них заключается в создании методов и алгоритмов синтеза и анализа кодов, позволяющих вплотную приблизиться к пропускной способности для заданного канала передачи информации и метода декодирования. Второе, но не менее важное направление ставит своей задачей получение оптимальных с точки зрения максимизации ЭВК и минимизации требуемых на реализацию вычислительных затрат методов и алгоритмов декодирования.

Повышение помехоустойчивости в реальных радиотехнических системах сопряжено с решением множества взаимосвязанных проблем и задач, таких как борьба с помехами различного рода, многолучёвостью и эффектом Доплера. Однако большинство из них должны быть устранены до выполнения процедуры канального декодирования. Наиболее сложной проблемой для подсистемы помехоустойчивого кодирования была и остаётся задача

повышения ЭВК в канале с аддитивным белым гауссовским шумом, окончательное решение которой не получено до сих пор.

Современные радиотехнические и телекоммуникационные системы используют в своём составе помехоустойчивые коды с различными характеристиками, некоторые из них вплотную приблизились к пределу Шеннона и отстают от него всего на 1 дБ. Положение усугубляется тем, что многие алгоритмы их получения запатентованы, что не позволяет их использовать на безвозмездной основе. Кроме того, ряд кодов с длинами в пределах от сотни до нескольких тысяч бит и канальными скоростями от 0,5 до 0,9 ещё далёк от максимально возможной эффективности. Все эти факторы являются отправной точкой для исследований и разработок в этом направлении.

Отдельно следует отметить тот факт, что с увеличением скорости передачи информации возрастают требования к надёжности приёма, что может быть серьёзной проблемой для итеративно-декодируемых кодов, для которых характерным является эффект насыщения вероятности ошибки при увеличении отношения сигнал-шум. Для некоторых современных систем его значение порой является неудовлетворительным и находится на уровне 10^{-5} , что требует проведения исследований в области синтеза новых кодов и модификации существующих алгоритмов декодирования.

Таким образом, тема диссертационной работы, направленная на исследование и разработку алгоритмов анализа и синтеза кодов с низкой плотностью проверок на чётность, является актуальной и требует дальнейшей детальной проработки.

Цель работы. Целью диссертационной работы являются разработка и исследование алгоритмов анализа и синтеза по нескольким показателям качества помехоустойчивых кодов с низкой плотностью проверок на чётность.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- выполнить оценку степени влияния различных параметров LDPC кодов на эффективность работы итеративного декодера;
- провести сравнительный анализ известных алгоритмов синтеза кодов в классах регулярных и нерегулярных конструкций по методу статистических испытаний в канале с аддитивным белым гауссовским шумом;
- разработать алгоритмы синтеза кодов с низкой плотностью проверок на чётность, не уступающих по ЭВК мировым аналогам;
- разработать программные средства для анализа и синтеза LDPC кодов;
- исследовать характеристики полученных в результате синтеза кодов с малой плотностью проверок на чётность в сравнении с существующими аналогами.

Методы исследования. Для решения поставленных в диссертационной работе задач используются методы теории помехоустойчивого кодирования, цифровой обработки сигналов, матричной и вычислительной математики, а также математической статистики. Данные теоретические методы сочетались с

экспериментальными исследованиями на основе имитационного моделирования.

Научная новизна. В результате выполнения диссертационной работы были получены следующие новые научные результаты:

- оценка коэффициента расширения ансамбля квазициклических LDPC кодов, синтезированных в соответствии с алгоритмом Таннера;

- процедура синтеза регулярных высокоскоростных кодов с низкой плотностью проверок на чётность, скорость кодирования $R > 0.85$, на базе комбинаторных блок-схем и последовательностей Роса и Сколема;

- правила расширения отдельных циклов и комбинаций их пересечений при переходе от протографа к расширенному графу;

- алгоритм идентификации циклов в графе Таннера по протографу, работающий с переменной матрицей перестановок;

- результаты исследования асимптотических и структурных свойств кодов с малой плотностью проверок на чётность, используемых в стандартах цифрового телерадиовещания.

Достоверность результатов. Достоверность полученных в диссертационной работе результатов и выводов качественно и количественно верифицирована по известным достижениям, опубликованным как в отечественных, так и в зарубежных изданиях.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы, включая положения, выносимые на защиту, получены автором лично.

Практическая значимость. Представленные в работе алгоритмы анализа и синтеза кодов с низкой плотностью проверок на четность, а также ансамбли, полученные на их основе, могут быть использованы для усовершенствования уже существующих и создания новых радиотехнических и телекоммуникационных систем различного назначения, а также надёжных систем хранения данных. Реализация результатов исследований в практической плоскости позволит увеличить ЭВК многих существующих систем передачи информации, а также может стать основой для создания перспективных систем коммерческого назначения.

Основные положения, выносимые на защиту:

1 Модификация алгоритма синтеза нерегулярных кодов повторения накопления, отличающаяся наличием ступенчатой составляющей в структуре проверочной матрицы и позволяющая снизить асимптотическую вычислительную сложность кодирования с $O(n^2)$ до $O(n)$, а также трёхкритериальная процедура выбора кода из ансамбля, минимизирующая уровень насыщения вероятности ошибки декодирования.

2 Модификация алгоритма синтеза проверочных матриц Таннера, обеспечивающая расширение ансамбля кодов от 8 до 48 раз для скоростей кодирования в диапазоне от 0,4 до 0,651.

3 Процедура получения кодов с низкой плотностью проверок на чётность на базе систем Штейнера, реализующая синтез регулярных высокоскоростных LDPC кодов, превосходящих по помехоустойчивости аналоги в классе

псевдослучайных конструкций Маккая от 0,7 до 2,5 дБ при $R \in [2/3; 0,9]$ и PEG в пике до 0,4 дБ при $R \in [0,42; 0,93]$ с фиксированной вероятностью битовой ошибки в $p_b = 10^{-6}$.

4 Алгоритм идентификации циклов в графе Таннера по протографу, с ограничением в 10 единиц на длину максимально обнаруживаемого цикла, позволяющий работать с переменной матрицей перестановок.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях:

– 11-й, 12-й, 19-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и её применение», 2009-2010, 2017 гг., г. Москва;

– 17-й Международной научно-технической конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», 2012 г., г. Рязань;

– 8-й Международной молодёжной научно-технической конференции «Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций», 2012 г., г. Севастополь;

– Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения», 2012, 2014 гг., г. Москва;

– 2-й Всероссийской конференции «Радиоэлектронные средства передачи и приёма сигналов и визуализации информации», 2012 г., г. Таганрог;

– 19-й Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Микроэлектроника и информатика», 2012 г., г. Зеленоград;

– 70-й Международной конференции «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий», 2015, 2016 гг., г. Москва;

– XI Международной (IEEE) Сибирской конференции по управлению и связи, 2015 г., г. Омск;

– 6-й Всероссийской конференции «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации», 2016 г., г. Москва;

– 23-й Международной конференции «Радиолокация, навигация, связь», 2017 г., г. Воронеж.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены в НПФ ООО «САД-КОМ», государственный стандарт ГОСТ 54309-2011 «Аудиовизуальная информационная система реального времени (РАВИС)», что подтверждено соответствующими актами, и в учебный процесс кафедры ТОР в рамках индивидуальных заданий и цикла лабораторных работ по предмету «Основы теории систем связи с подвижными объектами». Разработанные алгоритмы использованы при выполнении ряда хоздоговорных и госбюджетных НИР, проводимых в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет», а именно НИР № 23-09, № 15-10, № 7-12Г, № 12-12Г, № 24-12Г, № 7-14Г, грант РНФ 14-19-01263 «Исследование путей создания высокопроизводительной системы передачи информации от беспилотных летательных аппаратов».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 17 работ. Из них 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ для кандидатских диссертаций, 4

статьи в центральной печати, 13 тезисов докладов на конференциях, в том числе 1 статья цитируемая в системах SCOPUS и Web of Science.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 99 наименований и 2 приложений. Диссертация содержит 181 страницу, в том числе 144 страницы основного текста, 33 таблицы и 78 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, охарактеризовано состояние решаемых вопросов, определены цели, задачи и методы исследования. Представлены научная новизна, практическая и теоретическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, публикациях автора и внедрении результатов исследования.

В первой главе изложены основные положения, касающиеся кодов с малой плотностью проверок на чётность. Дано общее описание параметров этих кодов, введена соответствующая терминология. Для классов регулярных с весами столбцов и строк (d_s , d_c) и нерегулярных кодов представлена оптимизационная процедура «Density Evolution» (DE), позволяющая проводить оценку энергетической эффективности LDPC кодов асимптотически, а также выполнять поиск оптимальных по ряду критериев весовых распределений по строкам и столбцам проверочной матрицы. Рассмотрены допущения, присущие процедуре DE, которые показывают, что наибольшая целесообразность её использования в части анализа известных весовых распределений $\lambda(x)$ и $\rho(x)$ лежит в плоскости относительно длинных кодовых конструкций. В качестве результата работы этой процедуры всегда выступает максимальное значение некоторой характеристики шума в канале, которая зависит от его типа. В частности, для канала с аддитивным белым гауссовским шумом искомым параметром является пороговое среднеквадратическое отклонение (СКО) шума σ^* , зная которое, несложно рассчитать предельное значение отношения сигнал-шум q_{lim} . Этот параметр был в дальнейшем использован для асимптотической оценки ЭВК кодов, применяемых в стандартах цифрового телерадиовещания.

Рассмотрев процедуру DE, перейдём к известным алгоритмам синтеза, в основе которых лежит псевдослучайный выбор позиций в проверочной матрице для размещения в них ненулевых элементов. Наиболее простые алгоритмы, предложенные Маккаем, позволяют формировать регулярные и нерегулярные коды в широком диапазоне кодовых длин и скоростей. При этом значительные вычислительные затраты требуются на получение генераторной матрицы, а также процедуру кодирования, асимптотическая сложность которой является квадратичной. Дальнейшим развитием методов и алгоритмов псевдослучайного синтеза является оптимизационная процедура PEG, максимизирующая локальное для текущей вершины значение обхвата графа Таннера g_0 . Она относится к универсальным инструментам синтеза LDPC кодов и может быть

использована в качестве компонента в более сложных методах.

Описаны наиболее распространённые алгоритмы кодирования и декодирования кодов с малой плотностью проверок на чётность. Для любых блочных кодов кодирование традиционно реализуется в систематической форме с использованием порождающей матрицы. В то же время специфика задания LDPC кода приводит к необходимости использования разреженной проверочной матрицы H для этой задачи. Реализация алгоритмов кодирования с минимально возможной вычислительной сложностью $O(n)$ осуществляется при наличии соответствующей структуры проверочной матрицы. Одним из таких кодов является нерегулярный код повторения накопления (Irregular Repeat Accumulate - IRA). Он используется во втором поколении европейских стандартов цифрового телевидения (DVB-T2). Его проверочная матрица состоит из псевдослучайной и ступенчатой компонент. Для псевдослучайного LDPC кода также существует решение, позволяющее снизить вычислительную сложность кодирования практически до линейной. Асимптотическая вычислительная сложность алгоритма кодирования в таком случае будет определяться как $O(N+g^2)$, причём параметр g значительно меньше длины кода N . В работе описаны два наиболее общих алгоритма декодирования, диаметрально противоположных друг другу по вычислительным затратам и энергетической эффективности. Принципиальное отличие между ними заключается в использовании различного типа оценок входных бит. Алгоритм декодирования с инверсией бита принимает в качестве входного сообщения вектор жёстких оценок демодулятора, в то время как для декодера с итеративным распространением доверия (Iterative Belief Propagation - IBP) требуются мягкие оценки модулированных символов. На протяжении всей работы предпочтение отдавалось IBP декодеру в силу его высокой энергетической эффективности.

Предложена модификация алгоритма Маккая, сочетающая простоту кодирования IRA кодов и низкую вычислительную сложность синтеза. Суть процедуры сводится к представленной ниже последовательности действий:

- с помощью оптимизационной процедуры DE формируются весовые многочлены символьных и проверочных вершин, причём количество столбцов с бинарным весом должно равняться числу проверочных уравнений;
- последовательно по столбцам заполняются ненулевые ячейки проверочной матрицы, причём индексы каждой единичной позиции определяются в соответствии с рекуррентным соотношением вида:

$$S(k+1) = (A \cdot S(k) + C) \bmod M, \quad (1)$$

где $S(0)$ - целое число в диапазоне $0 \dots 2^{15} - 1$; A и C – целые случайные числа; M – число проверочных уравнений; $k \in [0, \infty)$. Дополнительно на каждый новый индекс накладывается условие, препятствующее внесению в граф Таннера циклов длиной 4;

- опционально выбор позиции ненулевого элемента может зависеть от

текущей наполненности строк проверок проверочной матрицы для сохранения равномерности распределения весов проверочных вершин.

Рассмотренный алгоритм используется для синтеза проверочных матриц в отечественном стандарте цифрового мультимедийного вещания (РАВИС). Для выбора кода из сформированного ансамбля используется трёхкритериальный статистический подход. Первый критерий определяет минимальную долю кодовых вершин, не содержащих циклы длиной, равной обхвату графа Таннера:

$$J_1 = \min_{i \in C} \delta(i) = \min_{i \in C} \frac{N - L_{g_0}(i)}{N}, \quad (2)$$

где N – длина каждого кодового слова в ансамбле; L_{g_0} – количество символьных вершин, входящих в состав циклов минимальной длины; $\delta(i)$ – доля кодовых вершин, не входящих в состав циклов длиной, равной обхвату графа; C – множество синтезированных проверочных матриц. Второй критерий $\Delta_\mu(i) = \mu_2(i)/\mu_1(i)$ связан с оценкой верхней границы минимального кодового расстояния:

$$J_2 = \min_{i \in C} \Delta_\mu(i), \quad (3)$$

где μ_1 и μ_2 – первое и второе собственные числа матрицы $H \cdot H^T$.

Процедура трёхкритериального выбора LDPC кода состоит в следующем:

- вычисление критериев по формулам (2) и (3) для большого количества проверочных матриц;
- оценка СКО σ_1 и σ_2 для параметров $\delta(i)$ и $\Delta_\mu(i)$ соответственно;
- первичный выбор кодов, для которых $J_1 \leq \delta(i) < -3\sigma_1$ и $J_2 \leq \Delta_\mu(i) < -3\sigma_2$;
- имитационное моделирование оставшейся выборки по методу статистических испытаний;
- итоговый отбор проверочных матриц по максимуму ЭВК на заданной вероятности ошибки.

Работоспособность рассмотренного подхода подтверждается рисунком 1,

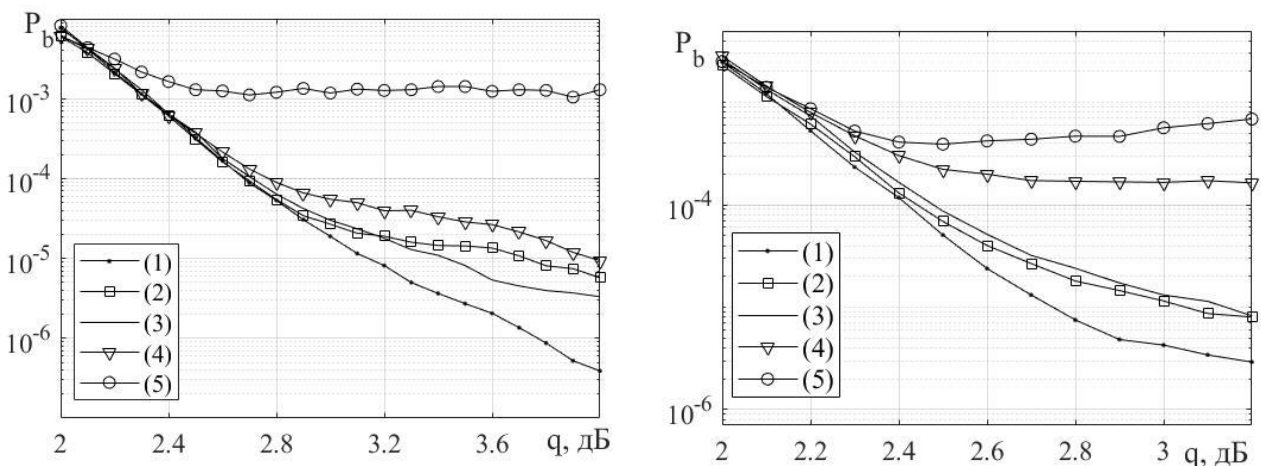


Рисунок 1 – Зависимости вероятности битовых ошибок от ОСШ для кодов с различным уровнем порога насыщения

на котором представлены граничные зависимости для кодов длиной 1066 (слева) и 1312 бит (справа), причём (1),(2) и (3),(4) - нижние и верхние границы помехоустойчивости для $\delta(i) < -3\sigma_I$ и $\delta(i) > 3\sigma_I$ соответственно, а (5) – наихудший LDPC код, обнаруженный в ансамбле по максимуму отношения собственных чисел. Отношение сигнал-шум q здесь и далее определяется частным энергии бита к спектральной плотности мощности АБГШ.

Во второй главе рассматриваются регулярные LDPC коды различной структуры. Дано определение квазициклических кодов с малой плотностью проверок на чётность, показаны возможные разновидности таких конструкций и обозначен предмет исследования. По известным формулам вычислены границы минимального кодового расстояния при увеличении веса столбца проверочной матрицы регулярного квазициклического LDPC кода.

Рассмотрено описание алгоритма Таннера, позволяющего синтезировать регулярные высокоскоростные LDPC коды с квазициклической структурой проверочной матрицы. Ключевыми параметрами этой процедуры являются размерность поля Галуа z , мультипликативные порядки $ord(a)$ и $ord(b)$, где a и b - числа, лежащие в поле Галуа. В результате может быть сформирована проверочная матрица в компактной форме:

$$H_c = \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 & \dots & a^{d_c-1} \\ b & ab & a^2b & \dots & a^{d_c-1}b \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b^{d_s-1} & ab^{d_s-1} & a^2b^{d_s-1} & \dots & a^{d_c-1}b^{d_s-1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Суть модификации заключается в увеличении динамического диапазона возможных значений a и b с единицы до $N_a=d_c-1$, $N_b=d_s-1$, где d_c , d_s – веса строк и столбцов соответственно, которые удовлетворяют заданному правилу синтеза. Таким образом, коэффициент расширения ансамбля кодов с заданной скоростью и длиной становится равным $N_a \cdot N_b$. Далее для каждого из полученных графов Таннера был вычислен обхват и произведено сопоставление параметров g_0 , a и b .

После чего произведена оценка предельной эффективности по алгоритму DE и построен график зависимости минимально возможного значения ОСШ q от скорости кодирования R (рисунок 2). Граница оптимальной двоичной модуляции с мягкими решениями демодулятора обозначена через $q_{lim}(R)$. Кроме того, для этого же ансамбля кодов выполнено имитационное моделирование по методу статистических испытаний в канале с АБГШ, получены зависимости вероятности ошибки на бит от ОСШ q , изображённые на рисунке 3

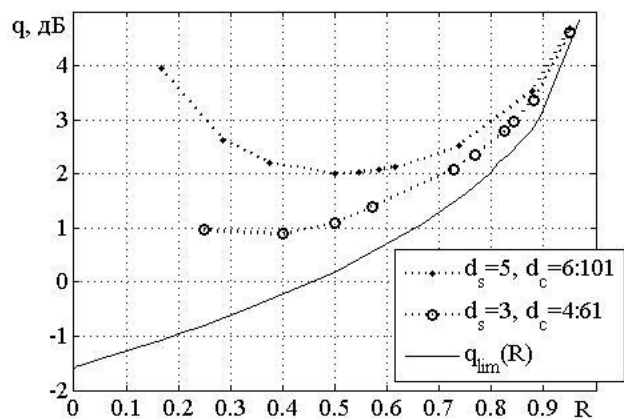


Рисунок 2 – Оценка предельного ЭВК регулярных LDPC кодов

и сделаны выводы об ЭВК. Для эксперимента были выбраны коды Маккая и модифицированные конструкции Таннера с параметрами $d_s=3, d_c=5, N_i = [155, 305, 755, 905, 2105, 11555]$ (рисунок 3, а) и $d_s=3, d_c=7, N_i = [301, 889, 1487, 2947, 10003]$ (рисунок 3, б). Значение индекса i определяется по формулам $i = |k|_6$ и $i = |k|_5$, где k – номер графика на рисунках 3, а и б соответственно.

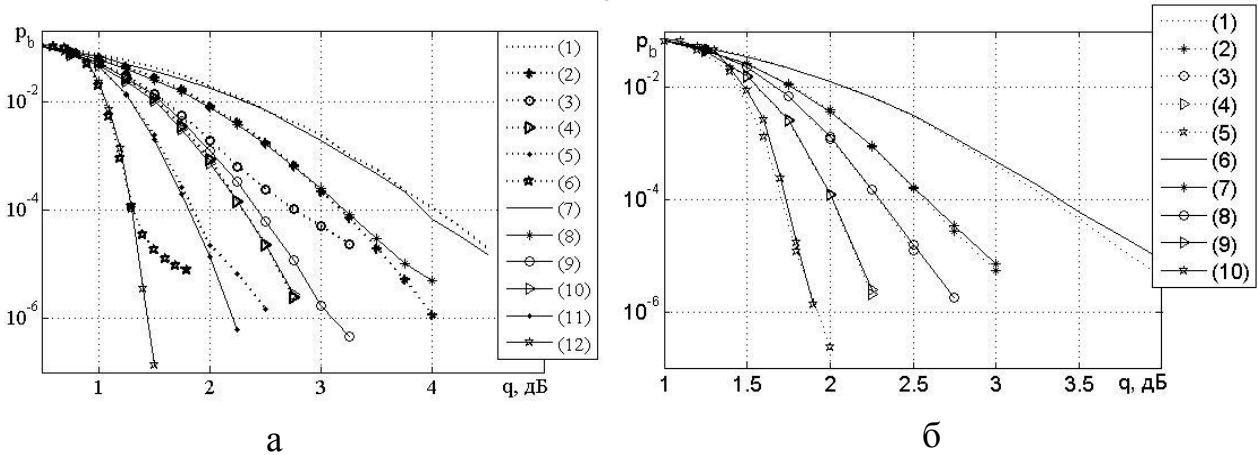
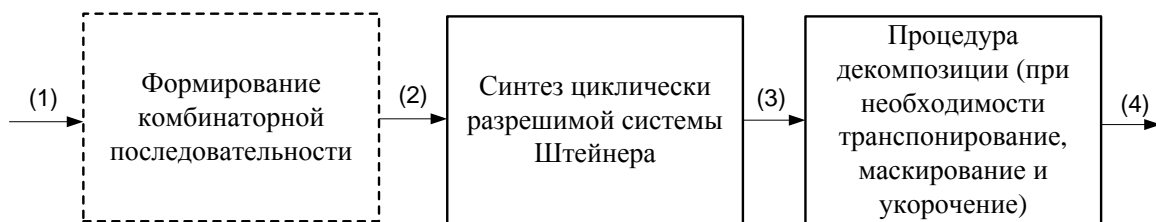


Рисунок 3 – Зависимости помехоустойчивости для кодов Таннера (а - 1-6, б - 1-5) и Маккая (а - 7-12, б - 6-10)

Представлена процедура синтеза регулярных высокоскоростных кодов с малой плотностью проверок на чётность, в основе которого лежит подкласс уравновешенных неполных блок-схем (УНБС) – системы Штейнера с параметрами (v, k, λ) при $\lambda = 1$. Функциональная схема для получения LDPC кодов представлена на рисунке 4 и включает в себя три блока: формирования комбинаторной последовательности (вариативный элемент), синтеза циклически разрешимой системы Штейнера, а также процедуры декомпозиции.



- (1) – параметры кода LDPC (K, N, d_s) ;
- (2) – параметр d_s и комбинаторная последовательность S ;
- (3) – циклическая разрешимая система Штейнера $(v, k, 1)$;
- (4) – проверочная квазициклическая матрица LDPC кода.

Рисунок 4 – Функциональная схема процедуры синтеза QC-LDPC кода

Суть процедуры заключается в последовательном выполнении этапов:

1 По числу информационных и кодовых бит, а также весу столбца выбирается алгоритм формирования комбинаторной последовательности и производится расчёт вектора S требуемой длины. Единственной и наиболее существенной проблемой первого этапа рассматриваемой процедуры является отсутствие полноценного алгоритма синтеза представленных математических последовательностей произвольной длины. Кроме того, для одной и той же

тройки параметров (K, N, d_s) может существовать множество различных S наборов, каждый из которых формирует изоморфную систему Штейнера.

2 В зависимости от параметра d_s происходит выбор алгоритма синтеза базовых блоков и по последовательности S осуществляются необходимые преобразования.

3 В заключение для циклически разрешимой системы Штейнера выполняется декомпозиция, в результате которой получается расширенная матрица кода с низкой плотностью проверок на чётность. При необходимости могут быть выполнены процедуры транспонирования, маскирования и укорочения для проверочной матрицы.

Рассмотрим подробнее алгоритмические аспекты каждого из этапов. Если значение параметра $d_s = 3$, на первом шаге в общем случае используются комбинаторные обыкновенные и модифицированные последовательности Сколема (S_S) или Роса (S_R). В работе они получены эвристически либо взяты из известных источников. При $d_s > 3$ для вычисления вектора S применяется арифметика полей Галуа с дополнительным ограничением на параметр ν , которое должно быть простым. На втором этапе на основе S -векторов формируется набор циклических разрешимых систем Штейнера. Процедура получения троек ($d_s = 3$) Штейнера состоит из последовательности шагов:

- для каждого значения $s_i = s_j \in S_S$ или S_R получается пара чисел (i, j) ;
- выполняется преобразование пары в тройку вида $(l, i + n, j + n)$, где $l = s_i = s_j$;
- базовый блок системы Штейнера формируется из тройки $(l, i + n, j + n)$ как $\{0, l, j + n\}$;
- набор из n базовых блоков с $\nu = bt + 1$, $t = n$, циклическими сдвигами образует циклическую разрешимую систему троек Штейнера (только для S_S);
- добавляется недостающий базовый блок в форме тройки $\{0, 2n + 1, 4n + 1\}$ (только для S_R);
- получается набор из ν циклически сдвинутых блоков на основе имеющегося множества базовых блоков (только для S_R).

Если значение веса столбца больше трёх, то вычисление блоков системы Штейнера реализуется по алгоритму Бозе, представленному в тексте пояснительной записки. На заключительном этапе рассматриваемой процедуры обязательно выполняется декомпозиция УНБС. В простейшем случае она заключается в получении матрицы инцидентности комбинаторной блок-схемы. Отдельного внимания заслуживают структуры, сформированные по последовательностям Роса, которые требуют обязательного укорочения проверочных матриц на $N_s = p(B) \cdot \nu - b$ бит справа, где $p(B)$ – количество базовых блоков в системе Штейнера. Процедура транспонирования матрицы инцидентности выполняется исключительно в тех случаях, когда результирующая скорость кодирования оказывается больше единицы. Если количество строк в проверочной матрице оказывается значительно меньше заданного, согласно входному параметру N , необходимо усложнить алгоритм

декомпозиции, выполнив расщепление каждого квадранта матрицы инцидентности с весом k на несколько (от 2 до k) квадратных матриц с весом от $(k-1)$ до единицы соответственно и разместить их последовательно по строкам. Также для $k \geq 4$ имеется возможность уменьшения веса столбца результирующей проверочной матрицы, вплоть до трёх включительно, путём маскирования, которое состоит в умножении матрицы инцидентности на одну или несколько различных маскирующих квадрантных матриц. Эта процедура, с одной стороны, позволяет расширить ансамбль возможных кодовых длин и скоростей, а с другой - получить нерегулярные кодовые конструкции. Кроме того, в рамках третьего этапа не исключены комбинации операций декомпозиции, транспонирования и маскирования.

Аналитически была получена сравнительная оценка коэффициента расширения ансамбля кодов с параметрами $C(d_s, d_c, R, z)$, где z – размер элементарного квадранта проверочной матрицы. В качестве двух сравниваемых ансамблей были выбраны модифицированные коды Таннера и коды на основе систем Штейнера. Результат численного сравнения показывает, что с увеличением скорости кодирования в диапазоне от 0,4 до 0,85 количество уникальных проверочных матриц, базирующихся на рассматриваемых комбинаторных блок-схемах, оказывается от 2,5 до 6 раз больше по сравнению с аналогичными по параметрам модифицированными кодами Таннера.

В завершение второй главы выполнено имитационное моделирование рассмотренных регулярных квазициклических LDPC кодов в сопоставлении с конструкциями Маккая и PEG в канале с АБГШ при $R \geq 2/3$. Результат сравнительной оценки помехоустойчивости показал значительный выигрыш, вплоть до 2,56 дБ ЭВК при $N < 100$, для кодов, синтезированных по предложенной процедуре (рисунок 4), что объясняется невозможностью создать граф Таннера с обхватом больше четырёх в рамках алгоритма Маккая при $N < 100$. При этом PEG конструкции в ряде случаев даже имели преимущество. В заключение к кодам на основе систем Штейнера был применён критерий выбора, максимизирующий размер минимального множества останки S_{min} в графе Таннера. С его помощью удалось подобрать такие кодовые конструкции из синтезированного ансамбля, которые по помехоустойчивости стабильно превосходят коды PEG с ЭВК до 0,4 дБ включительно при прочих равных условиях.

В третьей главе разработан алгоритм идентификации циклов в графах Таннера по двудольному неориентированному мультиграфу (протографу или базовому графу).

Использование протографов значительно упрощает работу алгоритмов анализа циклов. В основе полученных результатов лежит формула, определяющая наличие цикла длиной g в расширенном графе (G_r') :

$$\left(\sum_{k=0}^{g/2-1} \Delta_{i_k, i_{k+1}}(j_k) \right) \bmod(z) = 0, \quad (5)$$

где $\Delta_{i_x, i_y}(j) = (c_{i_x, j} - c_{i_y, j}) \bmod(z)$. При этом $i_0 = i_{g/2}$; $i_k \neq i_{k+1}$; $j_k \neq j_{k+1}$, а $c_{i,j}$ – величина циклического сдвига квадранта проверочной матрицы,

представленной в компактной форме, z – размер квадранта. Процедура расширения протографа может приводить к изменению размеров циклов, входящих в его состав. Для описания возможных модификаций одиночных циклов сформулированы и доказаны две теоремы, которые подробно изложены в пояснительной записке.

Другой важной особенностью процедуры расширения протографа является тот факт, что сочетания более коротких циклов в базовом графе могут образовывать циклы большей длины в расширенном графе. Для определения свойств такого преобразования были выбраны следующие параметры:

- длины циклов в протографе, исключительно $g_1 = 4$ и $g_2 = 6$;
- взаимное направление обхода циклов (n_{cr}) – принимает нулевое значение при совпадении, в противном случае единицу;
- количество общих вершин (n_{cv}) и рёбер между ними (n_{ce});
- общее число вершин (n_v) и рёбер (n_e) в пересечении циклов.

Правила идентификации циклов расширенного графа по пересечениям коротких замкнутых структур в протографе

Тип пересечения, $g_1 \times g_2$	Параметры		Длина образуемого цикла, g	Правила идентификации	
	n_{cv}	n_{ce}		$n_{cr} = 0$	$n_{cr} = 1$
4x4	1	0	8	$p_1 = \pm p_2$	
	2	0			
	2	1	6	$p_1 = -p_2$	$p_1 = p_2$
			8	$p_1 = p_2$	$p_1 = -p_2$
			10	$2p_1 = -p_2$ $-p_1 = 2p_2$	$2p_1 = p_2$ $p_1 = 2p_2$
	3	2	8	$p_1 = -p_2$ $2p_1 = p_2$ $2p_2 = p_1$	$p_1 = p_2$ $2p_1 = -p_2$ $2p_2 = -p_1$
4x6	1	0	10	$p_1 = \pm p_2$	
4x6	2	1	8	$p_1 = -p_2$	$p_1 = p_2$
			10	$p_1 = p_2$	$p_1 = -p_2$
	2	0	10	$p_1 = \pm p_2$	
4x6	3	2	10	$p_1 = -p_2$ $2p_1 = p_2$	$p_1 = p_2$ $2p_1 = -p_2$
			3	1	8
	10	$p_1 = -p_2$			$p_1 = p_2$
	4	2	8	$p_1 = \pm p_2$	

В результате аналитических расчётов и экспериментальной оценки были сформулированы правила расширения для пар коротких пересекающихся циклов, которые приведены в таблице.

Разработана процедура идентификации циклов в графе Таннера квазициклического LDPC кода (рисунок 5) на базе представленных теорем и правил. Его принципиальное отличие от традиционных методов решения задачи поиска циклов заключается в возможности поиска замкнутых структур по протографу с изменяющейся матрицей перестановок. Алгоритмы, работающие по расширенному графу при модификации матрицы перестановок, потребуют повторного запуска, асимптотическая сложность такой процедуры близка к квадратичной от длины кода. Разработанная процедура имеет единственное ограничение, выраженное в длине максимального цикла g_{max} , который будет гарантированно идентифицирован. В соответствии с перечнем правил в таблице, $g_{max} = 10$. Однако при расширении имеющего набора правил параметр g_{max} может быть увеличен до сколько угодно большого значения вплоть до размера окружности графа Таннера.

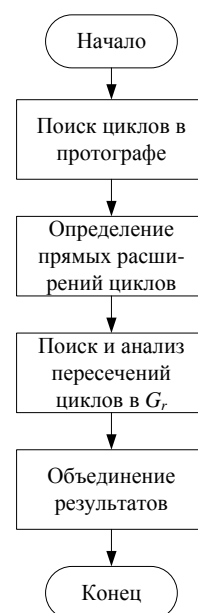


Рисунок 5 – Процедура идентификации циклов

В четвёртой главе определены помехоустойчивость и структурные особенности LDPC кодов, используемых в современных стандартах цифрового телерадиовещания. В качестве предмета исследований были выбраны проверочные матрицы из спецификаций европейского (DVB2) и китайского телевидения первого (SMMB, DTMB) и второго (DTMB A) поколений, в которых применяется низкоплотное кодирование. Основная задача заключалась в определении максимального ЭВК для всех сравнимых по параметрам N и R кодов в рамках установленной выборки. Результаты,

полученные путём расчётов по алгоритму DE и имитационного моделирования, показывают неоспоримое превосходство LDPC кодов из китайского стандарта цифрового телерадиовещания второго поколения по сравнению с остальными аналогами, что отражено на рисунке 6 в виде оценки относительного ЭВК по сравнению с пределом Шеннона для выбранной скорости кодирования. Кроме того, для некоторых кодов был обнаружен порог насыщения вероятности ошибки с ростом ОСШ (рисунок 7). Этот факт свидетельствует о недостаточной оптимизации методов и алгоритмов синтеза кодов с малой плотностью

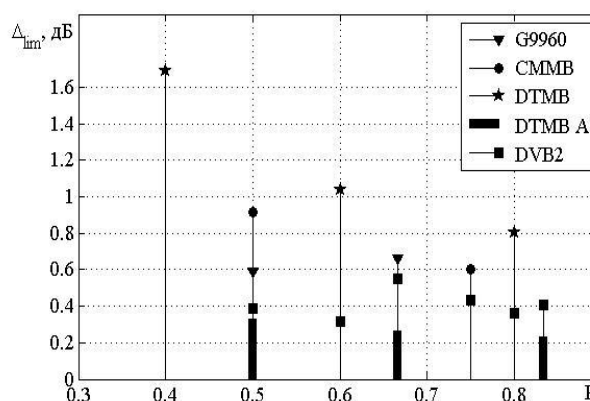


Рисунок 6 – Относительный ЭВК в приближении к пределу Шеннона

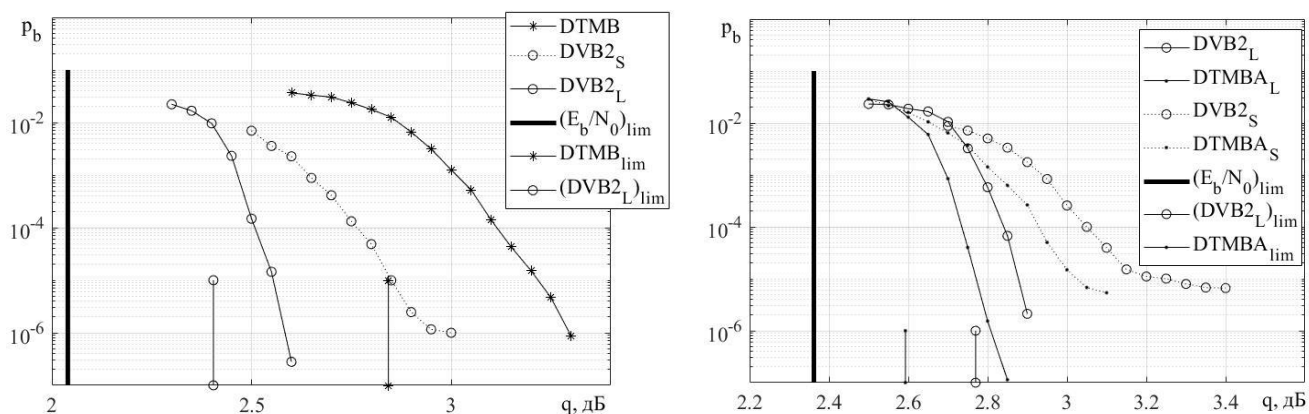


Рисунок 7 – Зависимости помехоустойчивости LDPC кодов из стандартов цифрового телерадиовещания для скоростей $R = 4/5$ (слева) и $R = 5/6$ (справа)

проверок на чётность в рассматриваемых стандартах. Для косвенной оценки причин возникновения такого эффекта по всем графам Таннера в рассматриваемом ансамбле были идентифицированы циклы с длиной до 16 включительно. Каждому из них ставилась в соответствие так называемая метрика связанности η (МС), показывающая количество внешних связей цикла. Анализ обхвата и МС графов Таннера показал, что для подавляющего большинства нерегулярных LDPC кодов порог насыщения ошибки декодирования проявляется при $g_0 = 4$ или если доля циклов с $\eta < 10$ составляет более 10 процентов.

Однако детальное понимание причин возникновения порога насыщения величины p_b и оценка его уровня для каждого конкретного случая возможны лишь путём скрупулёзного изучения так называемых псевдо-кодовых слов и множеств «ловушек», которые являются первопричиной этого эффекта.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, а также указаны возможные направления дальнейших исследований.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В рамках проведённых исследований была предложена процедура синтеза двоичных регулярных кодов с малой плотностью проверок на чётность, а также две модификации известных алгоритмов, один из которых нашёл своё применение в отечественном стандарте цифрового мультимедийного вещания РАВИС. Для выбора оптимальных по ряду критериев помехоустойчивых кодов из формируемых ансамблей были разработаны соответствующие алгоритмы. Кроме того, проведено обширное исследование внедрённых в современные стандарты подсистем канального кодирования. Таким образом, все полученные результаты можно тезисно представить в следующем виде:

1 Предложена модификация алгоритма Маккая, реализующая синтез нерегулярных LDPC кодов в широком диапазоне кодовых длин и скоростей, обладающая низкой вычислительной сложностью.

2 Предложена трёхкритериальная процедура выбора LDPC кодов из ансамбля.

3 Синтезирован набор кодов для отечественного стандарта мультимедийного вещания – РАВИС.

4 Разработана модификация алгоритма Таннера, реализующая синтез регулярных высокоскоростных LDPC кодов с расширенным в $N_a \cdot N_b$ раз ансамблем, по сравнению с базовой версией.

5 Предложена процедура синтеза регулярных высокоскоростных кодов с малой плотностью проверок на чётность на основе систем Штейнера.

6 Доказаны две теоремы, описывающие процедуру прямого расширения циклов при переходе от базового графа к расширенному.

7 Аналитическим образом получен набор правил, поясняющих алгоритм преобразования комбинаций циклов в протографе при его расширении.

8 Разработан алгоритм идентификации циклов в графе Таннера по протографу, работающий с переменной матрицей перестановок с ограничением в 10 единиц на длину максимально обнаруживаемого цикла.

9 Проведено исследование помехоустойчивости LDPC кодов, используемых в современных стандартах цифрового телерадиовещания.

10 Выполнена оценка параметров циклов для кодов, используемых в стандартах DVB-T2, DTMB, CMMB, DTMB-A.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Овинников А.А. Синтез низкоплотностных кодов на основе уравновешенных неполных блок-схем // Цифровая обработка сигналов. – № 4. – М., 2014. - С. 22 – 27.

2. Овинников А.А. Исследование влияния спектра связанности циклов в графе Таннера на энергетический выигрыш кодирования известных LDPC кодов // Цифровая обработка сигналов. – № 4. – М., 2015. - С. 24 – 29.

3. Овинников А.А. Способ идентификации циклов в графах Таннера LDPC кодов на основе пересечений коротких замкнутых структур в протографах // Цифровая обработка сигналов. – № 4. – М., 2016.- С. 26 – 30.

Публикация, индексируемая в базе SCOPUS и Web of Science

4. Ovinnikov A.A., Vityazev V.V. Fast estimation of error floor effect for irregular low-density parity-check codes // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015. – P.1 – 4.

Статьи в сборниках трудов и материалах конференций

5. Лихобабин Е.А., Овинников А.А. Особенности системы помехоустойчивого кодирования DVB-T2 // Радиочастотный спектр. – № 4. – М., 2011. - С. 24 – 31.

6. Овинников А.А., Бакке А.В. Исследование влияния циклов в графах Таннера и распределения единиц в столбцах LDPC кодов на помехоустойчивость системы // Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA – 2009: труды РНТОРЭС имени А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и её применение: тез. докл. Выпуск XI-1. – М.,

2009. – С. 106 – 108.

7. Овинников А.А., Иртыга В.А. Исследование оптимизационных алгоритмов формирования проверочных матриц LDPC кодов // Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA – 2010: труды РНТОРЭС имени А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и её применение: тез. докл. Выпуск XII-1. – М., 2010. – С. 28 – 31.

8. Овинников А.А. О синтезе низкоплотностных кодов // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: тез. докл. – СевНТУ. – Севастополь, 2012. – С. 348.

9. Овинников А.А. Низкоплотностные коды в стандартах беспроводной передачи данных // Всероссийская межвузовская научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Микроэлектроника и информатика»: тез. докл. – Зеленоград, 2012. – С.225.

10. Овинников А.А. Анализ характеристик кодов с низкой плотностью проверок на чётность // МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций»: тез. докл. - Рязань, 2012. – С. 26 –28.

11. Овинников А.А., Витязев В.В. Статистический анализ ансамблей LDPC кодов // Всероссийская мультikonференция «Радиоэлектронные средства передачи и приёма сигналов и визуализации информации»»: тез. докл. Таганрог, 2012. – С.43 – 45.

12. Овинников А.А. Многокритериальный анализ ансамблей LDPC кодов // МНТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения»: тез. докл. – М., 2012. - С. 95 – 97.

13. Овинников А.А. Анализ свойств и параметров низкоплотностных кодов, синтезированных по алгоритму Таннера // МНТК «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения»: тез. докл. – М., 2014. - С. 80 – 83.

14. Овинников А.А. Косвенная оценка снижения эффективности декодирования низкоплотностных кодов на уровне насыщения ошибок // МНТК «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий (REDS-2015)»: тез. докл. – М., 2015. - С. 130 – 134.

15. Овинников А.А. Правила для оценки пересекающихся циклов в графах Таннера квазициклических кодов с низкой плотностью проверок на чётность // Всероссийская конференция «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации»: тез. докл. – М., 2016. – С.225 – 229.

16. Овинников А.А. Алгоритм быстрой идентификации циклов в графах Таннера квазициклических кодов с низкой плотностью проверок на чётность // Цифровая обработка сигналов и её применение – DSPA – 2017: труды РНТОРЭС имени А.С. Попова. Серия: Цифровая обработка сигналов и её применение: тез. докл. – М., 2017. – С. 80 – 85.

17. Овинников А.А. Об алгоритме поиска циклов в графах Таннера кодов с низкой плотностью проверок на чётность // МНТК «Радиолокация, навигация, связь»: тез. докл. – Воронеж: ВГУ, 2017. – С.248 – 252.

Овинников Алексей Анатольевич

**АЛГОРИТМЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫХ
НИЗКОПЛОТНОСТНЫХ КОДОВ В СИСТЕМАХ ТЕЛЕРАДИОВЕЩАНИЯ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.09.2017. Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 5780.

Отпечатано в ООО «НПЦ «Информационные технологии».
390035, г Рязань, ул. Островского, д.21/1.