

На правах рукописи

**Головкин Илья Владимирович**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИГНАЛЬНО-КОДОВЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ ТУРБО-ПОДОБНЫХ КОДОВ И  
ДИСКРЕТНЫХ ЧАСТОТНЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ  
КОРОТКОВОЛНОВОЙ СВЯЗИ**

**Специальность 05.12.04.**

**Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Москва- 2016 г.**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Фрязинский филиал).

Научный руководитель:

**Назаров Лев Евгеньевич**, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (Фрязинский филиал), ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

**Егоров Сергей Иванович**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет», профессор кафедры «Вычислительной техники».

**Овечкин Геннадий Владимирович**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет», профессор кафедры «Вычислительная и прикладная математика».

Ведущая организация:

Федеральное Государственное Унитарное Предприятие Ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт радио (ФГУП НИИР).

Защита состоится 22 сентября 2016 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д.219.001.04 при ордена Трудового Красного Знамени федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский Технический Университет Связи и Информатики» по адресу : 111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, д.8а, МТУСИ, аудитория А-448(малый зал заседаний).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://srd.mtuci.ru/index.php/council> МТУСИ.

Автореферат разослан “ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д.219.001.04

кандидат технических наук, доцент

\_\_\_\_\_ Максим Валерьевич Терешонок

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Радиосвязь в коротковолновом частотном диапазоне (КВ) с использованием ионосферного распространения, является одним из самых недорогих видов дальней радиосвязи. КВ радиосвязь используется для организации связи с удалёнными районами, где недоступны иные способы связи или для связи с районами, где повреждена инфраструктура в силу стихийных бедствий.

Основными недостатками КВ радиосвязи являются: наличие многолучевого распространения сигналов; нестационарность ионосферных каналов распространения сигналов, за счет движения отражающих слоев и вариаций электрических свойств ионосферы; дефицит частотного ресурса КВ диапазона вследствие его перегруженности; наличие канальных помех естественного и индустриального происхождения.

Организация надежной передачи информации в этих условиях возможна при использовании сложных методов обработки сигналов, реализуемых средствами современной цифровой вычислительной техники. Это направление основано на применении эффективных схем помехоустойчивого кодирования в сочетании с цифровыми сигналами и итеративной обработкой сигнально-кодовых конструкций в приемных устройствах. Методы передачи информации по каналам с многолучевостью, включая КВ каналы, рассматривались в работах Петровича Н.Т., Финка Л.М, Коржика Л.М., Щелкунова К.Н., Кловского Д.Д., Зюко А.Г., Быховского М. А, Немировского А.С., Аджемова С.С., Головина О.В., Кириллова Н.Е., Комаровича В.Ф., Сосунова В.Н., Нудельмана П.Я., Теплова Н.Л., Кеннеди Р., Миддлтона Д., и многих других авторов.

Разработанные методы снижения влияния многолучевого распространения сигналов можно отнести к двум общим классам: методы на основе параллельной передачи информации и методы на основе последовательной передачи информации. Суть этих методов заключается в организации разнесения сигналов (частотное, временное, частотно-временное, поляризационное и их комбинации), а также в использовании широкополосных сигналов, процедур адаптивной коррекции каналов. Описание этих методов приведено в работах Варакина Л.Е., Борисова В.И., Шинакова Ю.С., Петровича Н.Т., Витерби Э.Д., Цикина И.А., Ипатова В.Р., Прокис Дж., Tse D., Benedetto S., Simon M.K. и др.

Методы помехоустойчивого кодирования в сочетании с цифровыми сигналами и методами обработки результирующих сигнально-кодовых конструкций детально

рассмотрены в работах отечественных и зарубежных авторов: Витерби Э.Д., Фано Р., Бородина Л.Ф., Зяблова В.В., Хэмминга Р.В., Зигангирова К.Ш., Элайес П., Месси Дж., Галлагера Р., Форни Д., Смольянинова В.М., Золотарева В.В., Назарова Л.Е., Овечкина Г.В., Егорова С.И., Шломы А.М., Бакулина М.Г., Крейнделина В.Б., и др.

Современное развитие теории корректирующих кодов и теории сигналов происходит в части повышения их помехоустойчивости и разработки производительных процедур приема. В настоящее время речь идет о методах помехоустойчивой передачи информации с характеристиками, близкими к предельным характеристикам Шенноновской пропускной способности каналов.

Интерес к данным методам передачи усилился в связи с открытием класса кодов под общим названием “турбо-коды”. По отношению к вероятностным характеристикам и сложности реализации алгоритмов формирования и приема турбо-коды составляют альтернативу известным кодам. Исследования показывают, что при увеличении объема информационных блоков турбо-кодов достигаются практически предельные вероятностно-энергетические характеристики для пропускной способности канала. Это дает основание считать данные коды одними из наиболее перспективных для применения в системах передачи информации различного назначения. Актуальной является проблема разработки сигнально-кодовых конструкций на основе помехоустойчивых кодов из класса турбо-кодов, эффективных для организации передачи информации по многолучевым КВ каналам связи.

**Цель настоящей работы** - разработка низкоскоростных сигнально-кодовых конструкций и эффективных алгоритмов их приема, обеспечивающих передачу информации с высокой надежностью в сложной помеховой обстановке КВ канала. Комплекс решаемых проблем связан:

- с синтезом сигнально-кодовых конструкций;
- с созданием производительных процедур итеративного приема данных сигнальных конструкций;
- с реализацией разработанных процедур формирования и приема сигнальных конструкций в системах связи с использованием современной цифровой вычислительной техники.

**Методы решения.** Для решения рассматриваемого комплекса проблем используются сигнально-кодовые конструкции на основе кодов, подобных по структуре турбо-кодам совместно с ансамблями дискретных частотных сигналов.

Характерным свойством рассматриваемых кодов является возможность применения при их приеме итеративных процедур обработки, близких по вероятностным характеристикам к оптимальным процедурам приема, но существенно более простых по сложности исполнения.

Для низкоскоростной передачи информации в КВ связи с высокой помехоустойчивостью используют расширение спектра. Ведутся исследования по применению многочастотных широкополосных сигналов [1].

В сложной помеховой обстановке КВ канала и ограничениях на потребляемую мощность и на значения пик-фактор сигналов используемой конструкции перспективным является подход, основанный на использовании ансамблей дискретных частотных сигналов (ДЧ) [2,3].

**Научная новизна работы заключается в следующем.**

- 1) Разработан класс турбо-подобных кодов с пониженной сложностью алгоритмов приема.
- 2) Разработан алгоритм итеративной обработки сигнально-кодовых конструкций на основе предложенных турбо-подобных кодов и М-ичных сигналов при использовании правил некогерентного приема. Исследована сходимость данных алгоритмов приема с использованием турбо-подобных кодов и ДЧ сигналов.
- 3) Разработан алгоритм квазикогерентного приема ДЧ сигналов в канале с многолучевым распространением.
- 4) Разработана методика оценки вероятностных характеристик сигнально-кодовых конструкций с использованием турбо-подобных кодов и ДЧ сигналов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

Теоретическая значимость работы заключается в развитии методов помехоустойчивого кодирования с применением турбо-подобных кодов и итеративной обработкой при их приеме. Практическая значимость подтверждается реализацией устройства формирования и приема сигнально-кодовых конструкций на основе новых турбо-подобных кодов и ДЧ сигналов, реализацией устройства

формирования и некогерентного приема новых турбо-подобных кодов в сигнально-кодowych конструкциях с использованием ортогональных сигналов.

**Положения, выносимые на защиту.**

- 1) Класс турбо-подобных кодов с пониженной сложностью алгоритмов приема.
- 2) Алгоритм итеративного некогерентного приема сигнально-кодowych конструкций на основе предложенных турбо-подобных кодов и M-ичных сигналов.
- 3) Алгоритм квазикогерентного приема ДЧ сигналов в канале с многолучевым распространением.
- 4) Методика оценки вероятностно-энергетических характеристик сигнально-кодowych конструкций с использованием турбо-подобных кодов и ДЧ сигналов для упрощенной модели КВ канала.

**Апробация результатов.** Основные результаты диссертационной работы докладывались на научно-технических конференциях: 61-я, 68-я, 69-я Всероссийские конференции «Научная сессия, посвященная Дню радио», г. Москва, 2006г., 2013г., 2014г.; 7-я, 10-я, 12-я, 16-я, 17-я Международные конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA-2005, DSPA-2008, DSPA-2010, DSPA-2014, DSPA-2015), ИПУ РАН, г. Москва; 3-я, 5-я, 8-я и 9-я Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ РАН, г. Москва, 2009г., 2011г., 2013г., 2015г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий», г. Москва, 2007г., 2008г., 2009г., 2010 г.

**Публикации результатов.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 16 статьях из перечня научных изданий, рекомендованных ВАК. По результатам подготовлены и сделаны доклады на 17 научно-технических Международных и Всероссийских конференциях. Получено 3 патента. Получено 3 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 152 страницах, содержит 52 рисунка, 5 таблиц, список литературы включает 153 наименования.

**Личный вклад автора** заключается в проведении теоретического анализа и моделирования, в проведении экспериментальных исследований и интерпретации

полученных результатов. Все вошедшие в диссертацию результаты получены лично автором либо при его непосредственном участии.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность научному руководителю доктору физико-математических наук Назарову Л. Е. за помощь и поддержку при выполнении работы, коллективу НИО-48 НИЧ МТУСИ за обсуждение результатов работы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель и решаемые в диссертации задачи, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, основные положения выносимые на защиту, а также приведены сведения об апробации работы.

**Первая глава** посвящена обзору результатов теории передачи информации. Приведены описания ряда моделей каналов передачи, в частности приведено описание модели КВ канала Ваттерсона. Приведены требования к сигнально-кодовым конструкциям, перспективным для систем КВ связи.

**Вторая глава** содержит описание ряда известных схем эффективного помехоустойчивого кодирования, для которых разработаны итеративные алгоритмы приема (турбо-коды на основе параллельного объединения сверточных кодов, блоковых турбо-кодов, низкоплотностных кодов).

Приведены результаты разработки нового класса кодовых конструкций с использованием последовательного соединения блоковых кодов на основе функций Уолша (симплексные коды, биортогональные коды, ортогональные коды) и сверточного кода с числом состояний решетки равным 2. Блок-схема кодера данного турбо-подобного кода, приведена на рисунке 1. Внешний код  $C_1$  включает  $l$  идентичных блоковых кодов  $(n, k)$ . Здесь  $n$  - длительность кодовых слов,  $k$  - объем информационного блока.

Внутренний код  $C_2$  - блоковый код  $(nl, kl)$ , эквивалентный усеченному рекурсивному сверточному коду с кодовой скоростью 1 и длиной кодового ограничения 1 (число состояний кодовой решетки равно 2). Длительность формируемых кодовых слов равна  $N = l \cdot n$ , информационный объем  $K = l \cdot k$ , кодовая скорость  $R = k/n$ . Кодирование осуществляется следующим образом - последовательность информационных символов  $\vec{a}$  длительностью  $K$  разбивается на  $l$  групп  $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_l$  одинаковой длительности  $k$ , каждая из которых поступает на вход кодеров внешнего

кода  $C_1$ . Символы с выходов кодеров кода  $C_1$  поступают на устройство перемежения  $\Pi$  и далее на вход кодера внутреннего кода  $C_2$ .

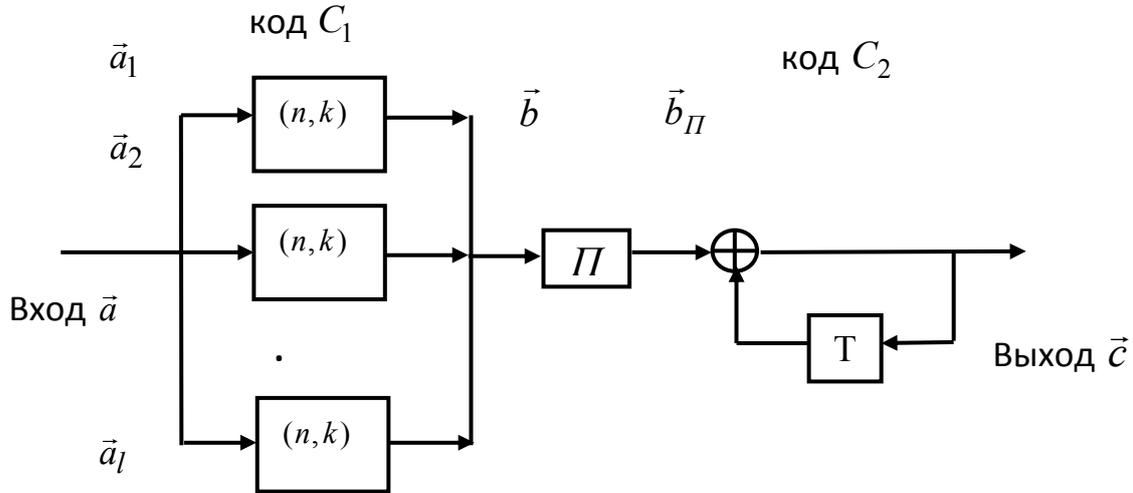


Рисунок 1. Блок-схема турбо-подобного на основе рекурсивного сверточного кода с двумя состояниями кодовой решетки ( $T$  – элемент задержки на такт,  $\Pi$  – перемежитель).

На рисунке 2 приведена блок-схема алгоритма итеративного приема турбо-подобных кодов. На вход устройства приема поступает дискретная реализация  $\vec{Y} = (y_i; 1 \leq i \leq N)$  с выхода демодулятора сигналов. Итерация итеративного приема включает два этапа.

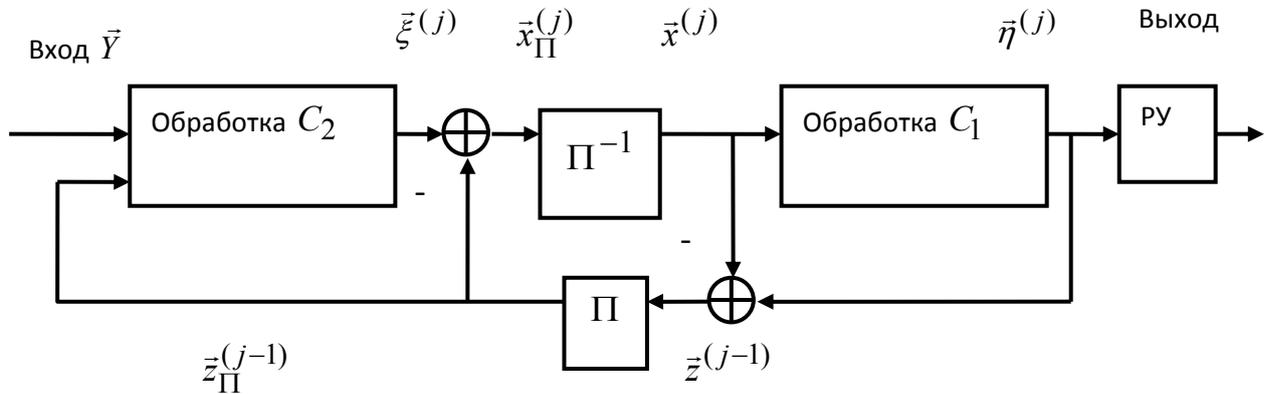


Рисунок 2. Блок-схема алгоритма итеративного приема турбо-подобного кода,  $\Pi$  – перемежитель,  $\Pi^{-1}$  – деперемежитель, РУ – решающее устройство.

На первом этапе  $j$ -ой итерации вычисляются отношения апостериорных вероятностей для входных символов внутреннего кода  $C_2$   $\xi_i^{(j)} = \ln \left( \frac{\Pr(b_i = 0 | \vec{Y}, \vec{z}_{\Pi}^{(j-1)})}{\Pr(b_i = 1 | \vec{Y}, \vec{z}_{\Pi}^{(j-1)})} \right)$  и вычисляется функционал  $x_{\Pi i}^{(j)} = \xi_i^{(j)} - z_{\Pi i}^{(j-1)}$ . Здесь  $\Pr(b_i | \vec{Y}, \vec{z}_{\Pi}^{(j-1)})$  – апостериорные

вероятности входных символов кода  $C_2$ ;  $\bar{z}_{II}^{(j-1)}$  - вектор априорной информации символов кода  $C_2$  на  $(j-1)$  итерации, на первой итерации его отсчеты полагаются равными 0.

На втором этапе  $j$ -ой итерации алгоритма итеративного приема вычисляются отношения апостериорных вероятностей  $\eta_i^{(j)} = \ln \left( \frac{\Pr(b_i = 0 | \bar{x}^{(j)})}{\Pr(b_i = 1 | \bar{x}^{(j)})} \right)$  для выходных символов внешнего кода  $C_1$  и вычисляется функционал  $z_i^{(j)} = \eta_i^{(j)} - x_i^{(j)}$ , где  $x_i^{(j)}$  - отсчеты дуплексной последовательности  $\bar{x}_{II}^{(j)}$ . Последовательность  $\bar{z}_{II}^{(j)}$  с выхода блока перемежения  $\Pi$  отсчетов  $\bar{z}^{(j)}$  принимается в качестве априорной информации  $\bar{z}_{II}^{(j+1)}$  для последующей  $(j+1)$ -ой итерации. После реализации задаваемого числа итераций решающим устройством вычисляются оценки информационных символов  $\hat{a}_i$ .

При вычислении величин  $\bar{\xi}^{(j)}$  используется алгоритм MAP (maximum a posteriori probability) и его модификации MAX-LOG-MAP, нормализованный MAX-LOG-MAP, основанные на представлении кодовых слов сверточного кода в виде решетчатой структуры. Приведена разработанная процедура вычисления величин  $\eta(b_i | \bar{x}^{(j)})$  с использованием алгоритма быстрого спектрального преобразования Уолша-Адамара.

На рисунке 3 приведена зависимость (кривая 1) вероятности ошибки на бит  $P_{\bar{\sigma}}$  от отношения энергии информационного бита к спектральной плотности мощности шума  $E_{\bar{\sigma}}/N_0$  при применении процедуры итеративного приема на основе подоптимального вычисления отношений  $\bar{\xi}^{(j)}$  и  $\bar{\eta}^{(j)}$  для турбо-подобного кода с кодовой скоростью 3/7 и информационным объемом блока 4200 битов (20 итераций). В качестве внешнего кода  $C_1$  используется совокупность 1400 симплексных блоковых кодов с параметрами (3,7). Вероятность ошибки  $P_{\bar{\sigma}} = 10^{-5}$  достигается при  $E_{\bar{\sigma}}/N_0 = 1.25$  дБ. Кривая 2 соответствует зависимости для турбо-подобного кода с объемом информационного блока 25200 битов (20 итераций). В качестве внешнего кода  $C_1$  используется совокупность 8400 блоковых симплексных кодов (3,7). Вероятность ошибки  $P_{\bar{\sigma}} = 10^{-5}$  достигается при  $E_{\bar{\sigma}}/N_0 \cong 1.0$  дБ, что на 0.25 дБ лучше кривой 1 и отличается лишь на

0.8 дБ от предела Шеннона для дискретно-непрерывного АБГШ канала с использованием сигналов с двоичной фазовой манипуляцией.

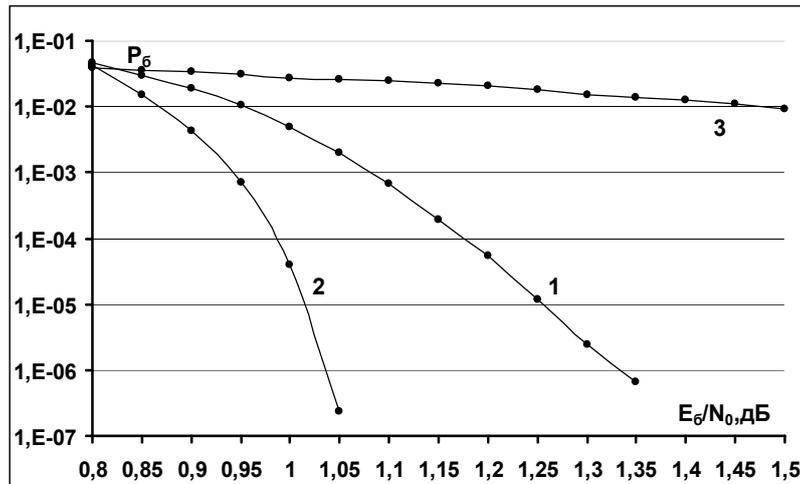


Рисунок 3. Вероятностные кривые: 1 – турбо-подобный код с кодовой скоростью 3/7 и информационным объемом 4200 битов (20 итераций); 2 – турбо-подобный с кодовой скоростью 3/7 и информационным объемом 25200 битов (20 итераций); 3 - сверточный код с кодовой скоростью 1/2 и длиной кодового ограничения 7 (алгоритм приема Витерби).

При передаче информации по нестационарным каналам используются процедуры оценивания начальных фаз радиосигналов, что усложняет реализацию приемных устройств. Альтернативой является использование правил некогерентного приема. Предложен класс сигнально-кодowych конструкций (СКК) на основе разработанных турбо-подобных кодов и М-ичных сигналов, для которых разработан алгоритм некогерентного приема. В качестве М-ичных сигналов рассмотрены ансамбли ортогональных сигналов на основе функций Уолша, дискретные частотные сигналы первого порядка. Блок-схема формирования СКК приведена на рисунке 4.

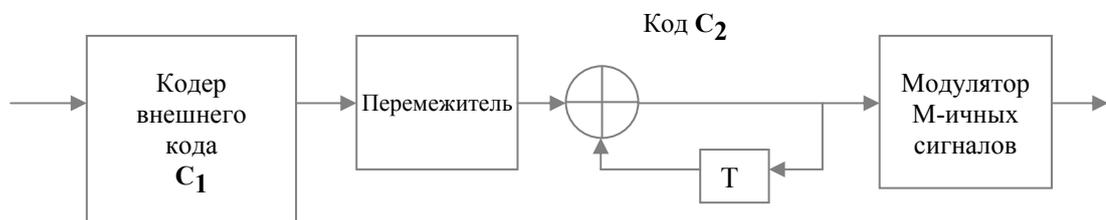


Рисунок 4. Блок-схема формирования СКК с использованием М-ичных сигналов и турбо-подобных кодов.

На рисунке 5 приведены вероятности ошибки на бит для СКК на основе турбо-подобного кода с параметрами ( $K=10000, N=20000$ ) и ансамбля функций Уолша объемом 256 (некогерентный прием, двоичная фазовая манипуляция, АБГШ канал).

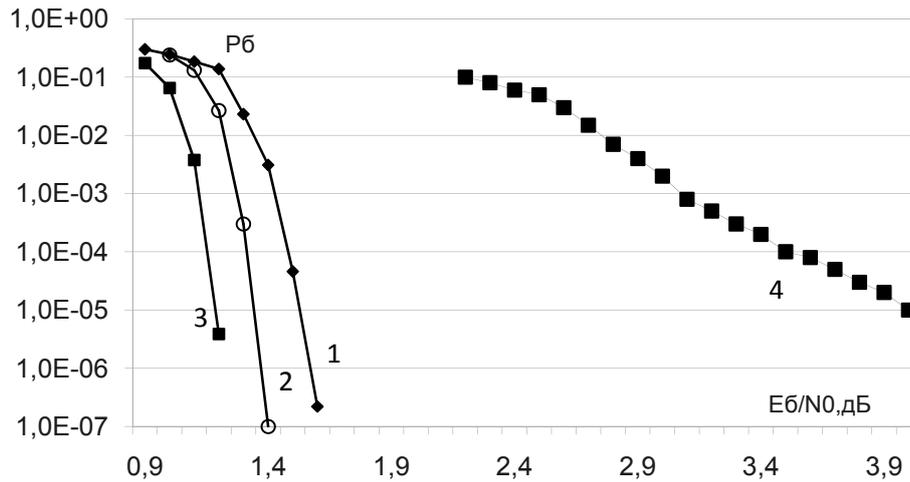


Рисунок 5. Вероятностные кривые некогерентного приема СКК на основе турбо-подобного кода ( $K=10000, N=20000$ ) и ансамбля функций Уолша объемом 256. Кривая 1 - 10 итераций (*max-log-map*), кривая 2 - 20 итераций (*max-log-map*), кривая 3 - 20 итераций (*log-map*), кривая 4 - код Рида-Соломона ( $k=239, n=255$ ) в поле  $GF(256)$  и ансамбль функций Уолша объемом 256.

Видно, что разработанная конструкция совместно с предложенным алгоритмом обеспечивает выигрыш до 2.3 дБ для  $P_b = 10^{-5}$  по отношению к конструкции на основе кода Рида-Соломона и ансамбля функций Уолша.

**В главе 3** рассмотрены дискретные частотные сигналы (ДЧ), предложен алгоритм квазикогерентного приема ДЧ сигналов в многолучевом канале. Сигналы ДЧ представляют собой последовательность радиоимпульсов, центральные частоты которых изменяются по заданному закону.

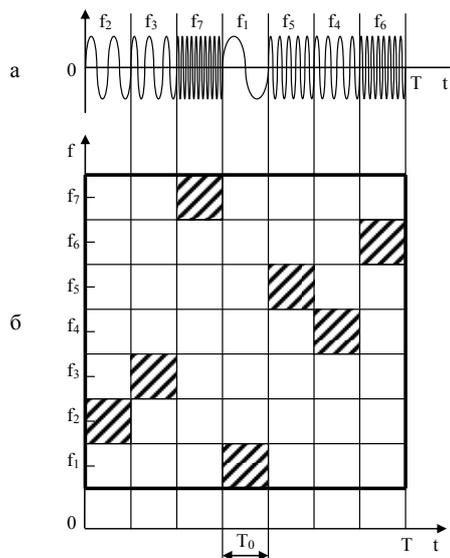


Рисунок 6. а) Расположение импульсов сигналов ДЧ на временной оси; б) расположение импульсов на частотно-временной плоскости.

ДЧ сигнал состоит из  $M$  элементов с огибающей  $\Phi(t)$ . Номера элементов  $\nu$  изменяются от 0 до  $M-1$ ,  $a_q(\nu)$  - комплексная амплитуда  $\nu$ -го элемента  $q$ -го ДЧ сигнала, положение  $\nu$ -го элемента по частоте определяется сдвигом  $\gamma_q(\nu)\Delta\omega$ ,  $\Delta\omega$ -шаг разноса по частоте,  $\gamma_q(\nu)$  - символ частотной кодовой последовательности[2]. Длительность импульса равна  $T_0 = T/M$ , ширина спектра  $F_0 = 1/T_0 = M/T$ .

В качестве ансамбля сигналов ДЧ используются либо полные, либо усеченные композиционные системы, сформированные по правилу[2]:

$$\gamma_q(\nu) \equiv (q\nu^r + c_0) \bmod M$$

$c_0 \equiv \overline{0, (M-1)}$  и  $r \neq 1$ ;  $\nu = \overline{1, (M-1)}$  - номер элемента в сигнале. Числа  $r, M-1$  должны быть взаимно простыми.

Блок-схема согласованного фильтра сигналов ДЧ [2] приведена на рисунке 7.

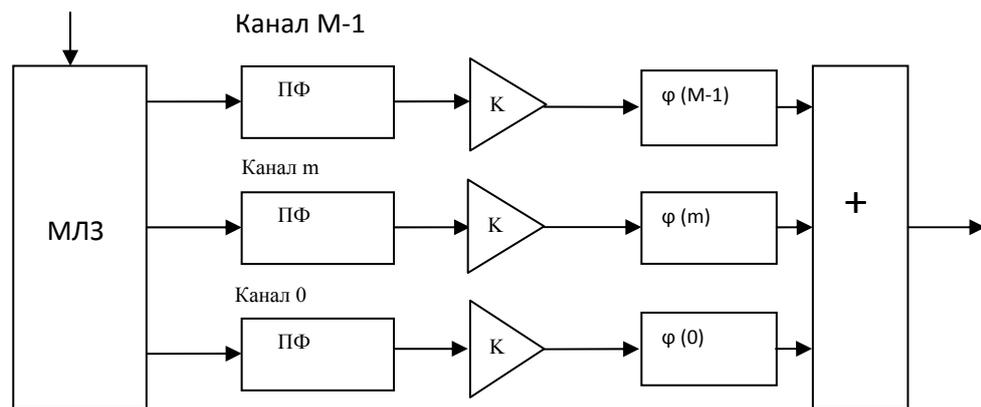


Рисунок 7. Структурная схема согласованного фильтра для ДЧ сигнала. МЛЗ- многоотводная линия задержки, ПФ –полосовой фильтр, К-усилитель,  $\phi(0) \dots \phi(M-1)$  -фазовращатели.

В многолучевом канале каждый элемент сигнала ДЧ рассматривается как ветвь разнесения. При реализации правила оптимального разнесенного когерентного приема при одинаковой спектральной плотности мощности шума во всех ветвях требуется вычисление соотношений[4]

$$\sum_{i=0}^{M-1} \int_0^T \frac{K_i}{\sigma_0^2} y(t) \cdot U_r(\phi_i, t) dt \geq \sum_{i=0}^{M-1} \int_0^T \frac{K_i}{\sigma_0^2} y(t) \cdot U_l(\phi_i, t) dt$$

$$r = 0 \dots J-1, r \neq l$$

Здесь  $J$  - объем ансамбля сигналов ДЧ сигналов,  $K_i$  - коэффициент передачи на  $i$ -ой частоте,  $U_l(\phi_i, t)$  - сигнал  $U_l(t)$  с фазовым смещением  $\phi_i$  спектральных составляющих,  $y(t)$  - входной сигнал.

В схеме согласованного фильтра для ДЧ сигнала каждый из фазовращателей должен обеспечить сдвиг по фазе на  $-\phi_i$ . Для этого необходимо произвести оценку фаз по каждому из частотных каналов ДЧ сигнала, что не всегда является возможным или целесообразным.

Для решения этой проблемы разработан алгоритм квазикогерентной обработки, блок-схема которого приведена на рисунке 8. При реализации этого алгоритма может быть использован аппарат быстрого преобразования Фурье (БПФ).

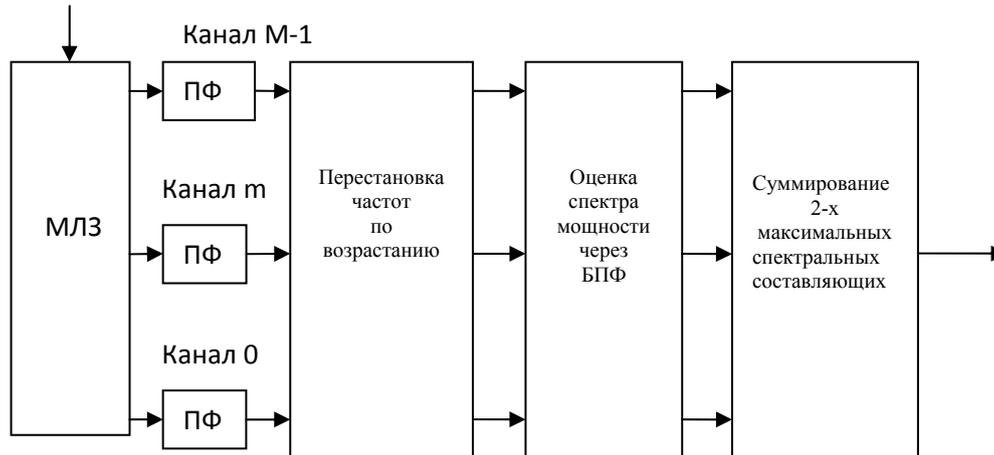


Рисунок 8. Структурная схема согласованного фильтра для ДЧ сигнала в случае квазикогерентного приема (двухлучевой канал).

Приведены результаты компьютерного моделирования.

**В главе 4** приведена разработанная методика оценки вероятностных характеристик при некогерентном приеме СКК с использованием турбо-подобных кодов и ДЧ сигналов в упрощенной модели КВ канала. Сигнал на выходе КВ канала с использованием упрощенной модели с независимыми рэлеевскими замираниями по частотам имеет вид:

$$y(t) = \sum_{\nu=0}^{M-1} A \cdot \alpha_{\gamma_q(\nu)} \cdot U_q(t) + n(t) =$$

$$\sum_{\nu=0}^{M-1} A \cdot \alpha_{\gamma_q(\nu)} \cdot \Phi(t - \nu T_0) \cdot e^{j(\gamma_q(\nu) \Delta \omega t + \theta)} + n(t)$$

Здесь  $U_q(t)$  - передаваемый сигнал ДЧ,  $\alpha_{\gamma_q(\nu)}$  - комплексный коэффициент замирания на частоте  $\gamma_q(\nu)$ , независимые квадратурные составляющие которого имеют нормальное распределение с нулевым средним,  $A$  - амплитуда радиосигнала,  $\theta$  - начальная фаза радиосигнала,  $n(t)$  - комплексный шум с квадратурными компонентами

$n_c, n_s$  имеющими нормальную плотность распределения и дисперсиями  $\sigma_{c,s}^2 = N_0/4$ ,  $N_0$  - односторонняя спектральная плотность мощности. Упрощенная модель КВ канала справедлива для рассматриваемых систем ДЧ сигналов при наличии 4-5 лучей распространения сигнала и при условии превышения величиной  $M \cdot T_0$  времени изменения параметров лучей.

Вследствие сложности вычисления точных значений вероятностных характеристик используют приближенные методы их оценивания, применяя верхние границы, например, аддитивную или мультипликативную границы [5]. Обозначим  $P(\vec{c}_i, \vec{c}_j), i \neq j$  вероятность того, что декодер выберет кодовое слово  $\vec{c}_j$  при условии, что передавалось  $\vec{c}_i$  в случае, когда возможны только два варианта решений у декодера выбрать  $\vec{c}_i$  или  $\vec{c}_j$ . Предполагается что используется метод приема “в целом”. В общем случае вероятность  $P(\vec{c}_i, \vec{c}_j) = f(h, Y, X)$  зависит от способа отображения  $Y$  бит турбо-подобного кода в дискретные частотные сигналы, от расстояния Хэмминга  $h$  между кодовыми векторами турбо-подобного кода  $\vec{c}_i, \vec{c}_j$ , от корреляционных свойств  $X$  ансамбля ДЧ сигналов

Известная методика оценки вероятности ошибки заключается в усреднении [6] по возможным способам отображения ненулевых бит в символы модуляции с использованием равновероятного перемежителя, расположенного перед устройством отображения бит в  $M$ -ичные сигналы. В этом случае верхняя аддитивная граница имеет вид

$$P_0 \leq \frac{1}{K} \cdot \sum_{d=1}^L A(h) \cdot \sum_f P(\vec{c}_i, \vec{c}_j, d, f) \cdot P_d(f)$$

Здесь  $A(h)$  спектр расстояний Хэмминга турбо-подобного кода,  $P_d(f)$  - вероятность появления комбинации  $f$  отображения  $d$  ненулевых бит на символы. При оценивании усредненного спектра последовательного соединения кодов используются известные вычислительные процедуры. Для вычисления величины  $P(\vec{c}_i, \vec{c}_j, d, f)$  в предположении независимости ошибок между ДЧ сигналами, требуется вычислять вероятность ошибки  $P_0$  при передаче ДЧ сигнала. При неизвестных коэффициентах замираний, неизвестных относительных задержках и неизвестных фазах лучей в каналах с многолучевым

распространением используется некогерентный прием с накоплением. Получено выражение для вычисления верхней оценки вероятности ошибки  $P_o$

$$P_o = 1 - \frac{1}{\sigma_{vp}^{2M} \cdot 2^M \cdot (M-1)!} \cdot \int_0^\infty x^{M-1} \cdot e^{-x/2 \cdot \sigma_{vp}^2} \cdot \left( 1 - \frac{e^{-x \cdot \frac{1}{2 \cdot \sigma_{vq}^2}} \cdot \sum_{k=0}^{M-1} \frac{1}{k!} \cdot \frac{x^k}{\left(\frac{1}{2 \cdot \sigma_{vq}^2}\right)^{M-k}}}{\sigma_{vq}^{2M} \cdot 2^M} \right)^{J-1} dx$$

Здесь  $\sigma_{vp}^2$  - дисперсия квадратурных компонент на выходе фильтров, согласованных с элементами ДЧ сигнала при передаче сигнала  $U_p$ ;  $\sigma_{vq}^2$  - дисперсия квадратурных компонент в отсутствии сигнала.

На рисунке 9 приведены вероятностные кривые, полученные с использованием предложенной методики (кривая 1) и путем моделирования алгоритма некогерентного приема (кривая 2).

Видно, что кривая соответствующая верхней аддитивной границе, близка к кривой моделирования некогерентного приема.

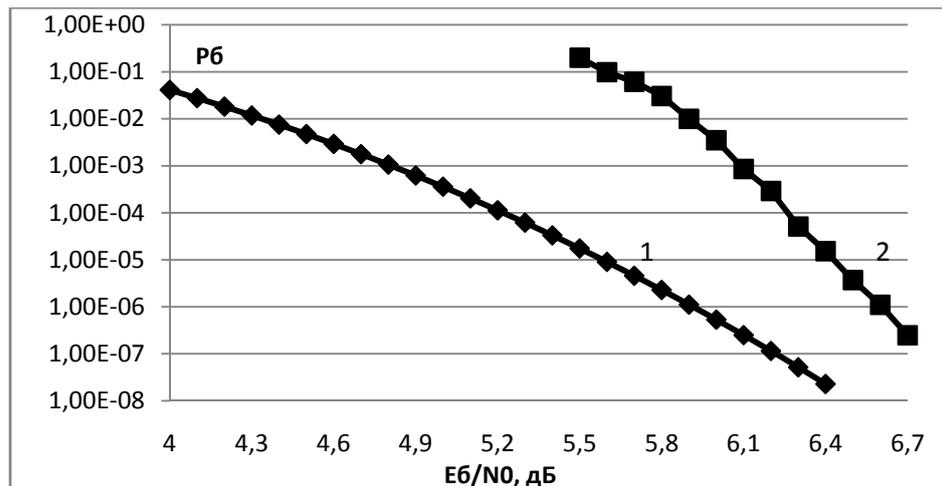


Рисунок 9. Вероятностные характеристики для турбо-подобного кода  $N=1680$ ,  $K=840$  на основе биортогональных сигналов  $n=8$ ,  $k=4$ , ансамбль ДЧ сигналов с  $M = 13$ ,  $J = 128$  :

1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая.

Приведены результаты исследования сходимости итеративных алгоритмов приема СКК на основе турбо-подобных кодов и дискретных частотных сигналов в упрощенной модели КВ канала. В качестве внешнего кода  $C_1$  рассмотрены :

- код повторение (RA repeat accumulate) с кодовой скоростью  $R=1/2$ ;
- нерекурсивный несистематический сверточный код  $(7,5)_8$ , кодовой скоростью  $R=1/2$ , и длиной кодового ограничения 3;
- совокупность биортогональных сигналов на основе функций Уолша с параметрами  $(k=4, n=8)$ .

При исследовании необходимых условий сходимости использована методика EXIT chart (extrinsic information transfer characteristics) [7], основу которой составляет определение зависимости взаимной информации между символами кодовых слов  $\vec{b}$  и функционалами от апостериорных символьных вероятностей. Для декодера  $C_1$   $I_A = I(\vec{x}^{(j)}, \vec{b})$ ,  $I_E = I(\vec{z}^{(j)}, \vec{b})$ . При обработке в демодуляторе с использованием совместной кодовой решетки кода  $C_2$  и ДЧ сигналов  $I_A = I(\vec{z}_{\Pi_i}^{(j-1)}, \vec{b})$ ,  $I_E = I(\vec{x}_{\Pi}^{(j)}, \vec{b})$ . Итеративный процесс считается сходящимся, если зависимости  $I_E(I_A)$  двух исследуемых модулей не имеют пересечения до точки достижения одним из устройств значения  $I_E = 1$  [7].

На рисунке 10 приведены зависимости для различных кодов  $C_1$  в составе турбо-подобного кода с объемом информационного блока  $K=840$  бит. Видно, что декодер биортогональных сигналов  $(4,8)$  на основе функций Уолша (кривая 2) имеет характеристику  $I_E(I_A)$  максимально близкую по форме к характеристике демодулятора с использованием совместной решетки  $C_2$  и ДЧ сигналов (кривая 1) среди рассмотренных кодов. Характеристика декодер биортогональных сигналов в рассматриваемых условиях не имеет пересечений с характеристикой демодулятора.

Приведены результаты компьютерного моделирования рассмотренных СКК с использованием упрощенной модели КВ канала. Результаты компьютерного моделирования подтверждают результаты, полученные с помощью методики EXIT.

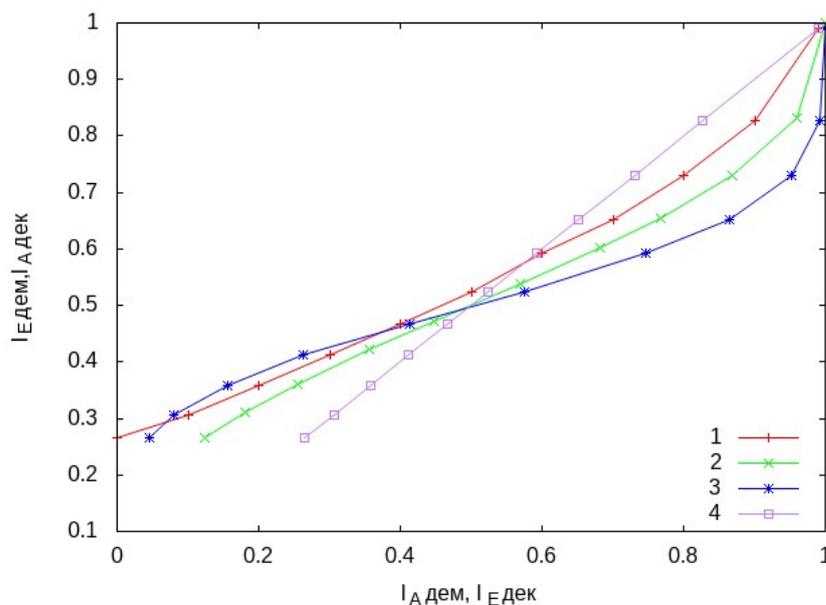


Рисунок 10. Диаграмма изменения взаимной информации (EXIT chart). Ансамбль ДЧ сигналов 13,13 объемом 128,  $E_s/N_0 = -0.2$  ( $E_b/N_0 = 5.5$  дБ для  $R=1/2$ ). Кривая 1- зависимость  $I_E(I_A)$  демодулятора использующего совместный треллис с кодом  $C_2$ . Кривая 2 - зависимость  $I_E(I_A)$  декодера биортогональных сигналов (4,8). Кривая 3 - зависимость  $I_E(I_A)$  декодера нерекурсивного несистематического сверточного кода (7,5)<sub>8</sub>, кодовой скоростью  $R=1/2$ , и длиной кодового ограничения 3. Кривая 4 зависимость  $I_E(I_A)$  декодера кода повторения с  $R=1/2$ .

**В главе 5** приведены описания реализованных устройств формирования и приема СКК на основе турбо-подобных кодов и М-ичных сигналов.

Основу созданных устройств формирования и приема СКК с использованием турбо-подобного кода и ДЧ сигналов составили: ПЛИС XC6VSX315 и ЦСП TMS320с6678. В таблице 1 приведены параметры СКК.

Таблица 1 Характеристики реализованной сигнально-кодовой конструкции.

Параметры СКК	ДЧ-29,4
Скорость, бод	200,150,100,50
Кол-во частот М	29
Кол-во элементов во временной области	4
Объем ансамбля ДЧ сигналов	512
Кодовая скорость турбо-подобного кода R	5/16
Параметры кодового блока турбо-подобного кода	K=2025,N=6480
Разнос частот, Гц	410,1750
Полоса, кГц	12,51
Длительность преамбулы элементов	128
Информационная скорость, бит/сек	135,100,67,34
Время передачи блока, сек	15, 20, 30,60

При реализации алгоритмов приема был принят ряд мер по борьбе с импульсными и узкополосными помехами. На рисунке 11 приведены результаты компьютерного моделирования реализованной СКК (режим 12 кГц, скорость передачи информации 67 бит/сек), при наличии различных помех.

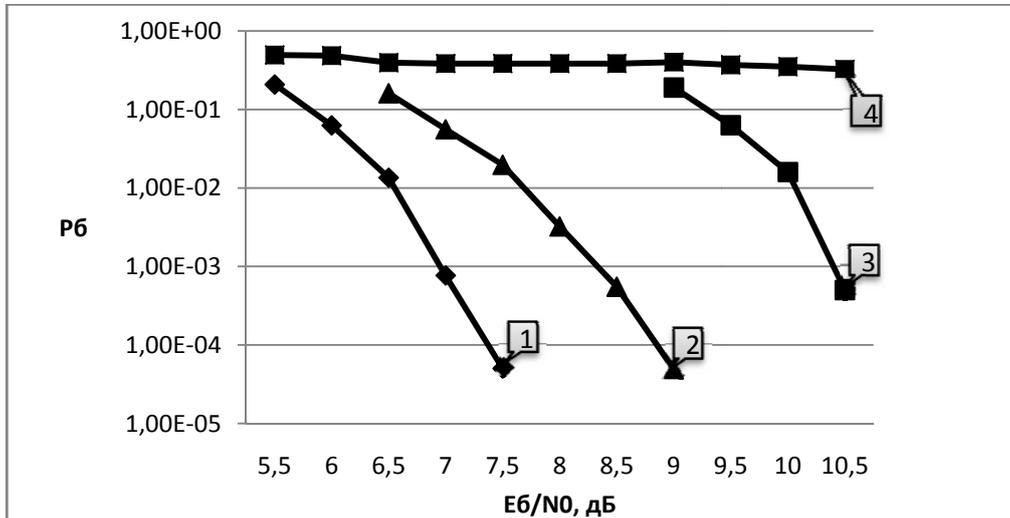


Рисунок 11. Вероятность ошибки на бит ( $P_b$ ) для СКК с использованием дискретных частотных сигналов. Ансамбль ДЧ сигналов 29,4 объемом 512, разнос частот 410 Гц, длительность элемента 10 мс, детектирование по квадратам огибающей элементарных импульсов. Модель канала для средних широт и возмущенных условий в соответствии со стандартом ITU-RF.1487 (разность хода лучей 2 мс, Доплеровское расширение спектра 1.0 Гц). Кривая 1 - характеристика без помех. Кривая 2 - характеристика при воздействии импульсной помехи с длительностью импульса 40 мс, период повторений 1 с, мощность импульса на 60 дБ выше мощности сигнала. Кривая 3 - характеристика при действии помехи в части полосы, ширина спектра помехи 4КГц, мощность помехи на 60 дБ выше мощности сигнала. Кривая 4 - характеристика при воздействии указанных помех без использования мер по борьбе с помехами.

Реализационные потери (включая потери системы синхронизации) относительно компьютерной модели составили 0.8 дБ. Промышленно выпускаемый КВ модем фирмы RapidM, превосходящий требования стандарта НАТО MIL-STD-188-110В, в аналогичной модели канала без действия импульсных и узкополосных помех, при скорости передачи информации 75 бит/сек для обеспечения вероятности ошибки на бит  $P_b = 10^{-3}$ , требует отношения энергии бита к спектральной плотности мощности шума не менее 10 дБ.

Приведены результаты реализации итеративного приема турбо-подобных кодов в сигнально-кодовой конструкции с использованием ортогональных сигналов, ФМ-2 манипуляции и некогерентным приемом.

Параметры СКК с использованием правил некогерентного приема с результатами лабораторных испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2 Характеристики реализованной СКК.

Номер режима	Параметры турбо-подобного кода	Базис Уолша	Еб/№0, дБ требуемое для достижения $P_o = 10^{-5}$	Скорость декодирования кбит/сек.
1	K=240, N=480	$2^8$	2.8	200
2	K=624, N=1248	$2^8$	2.2	208
3	K=1872, N=3744	$2^6$	2.4	502
4	K=4992, N=9984	$2^4$	3.9	3605

Приведены результаты натурального эксперимента по апробации алгоритма квазикогерентного приема ДЧ сигналов на трассе Москва-Санкт-Петербург (630 км).

При проведении испытаний была использована технология Web SDR. Основа технологии - сеть Software Defined Radio (SDR) станций предоставляющих возможность прослушивания и записи радиосигналов в on-line режиме через сеть Internet. Для использованной SDR станции частота оцифровки транслируемого потока к потребителю составляет 8 кГц. Структурная схема эксперимента приведена на рисунке 12.

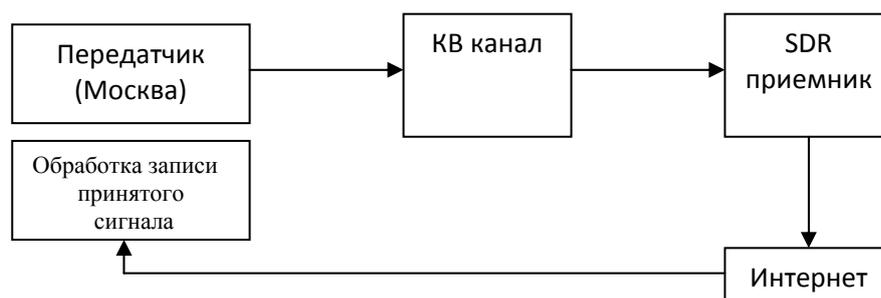


Рисунок 12. Структурная схема эксперимента по апробации предложенного алгоритма квазикогерентного приема.

Для эксперимента использовалась сигнально-кодвая конструкция с параметрами, приведенными в таблице 3.

Таблица 3 Характеристики использованной СКК.

Скорость, бод	125
Кол-во частот	13
Кол-во элементов во временной области	13
Разнос частот, Гц	250
Полоса, кГц	3.25
Объем ансамбля ДЧ сигналов	128
Параметры турбо-подобного кода	K=392,N=784
Скорость передачи информации, бит/сек	33

С помощью предложенного алгоритма квазикогерентного приема ДЧ сигналов производился прием сигнала и оценка количества лучей.

На трассе Москва-Санкт-Петербург наблюдалось до 3-х лучей с максимальной относительной разностью хода 1 мсек. На рисунке 13 приведены результаты БПФ при приеме 5-ти ДЧ сигналов (часть преамбулы перед кодовым блоком) с частотной осью, пересчитанной в разность хода лучей для выбранных параметров ДЧ.

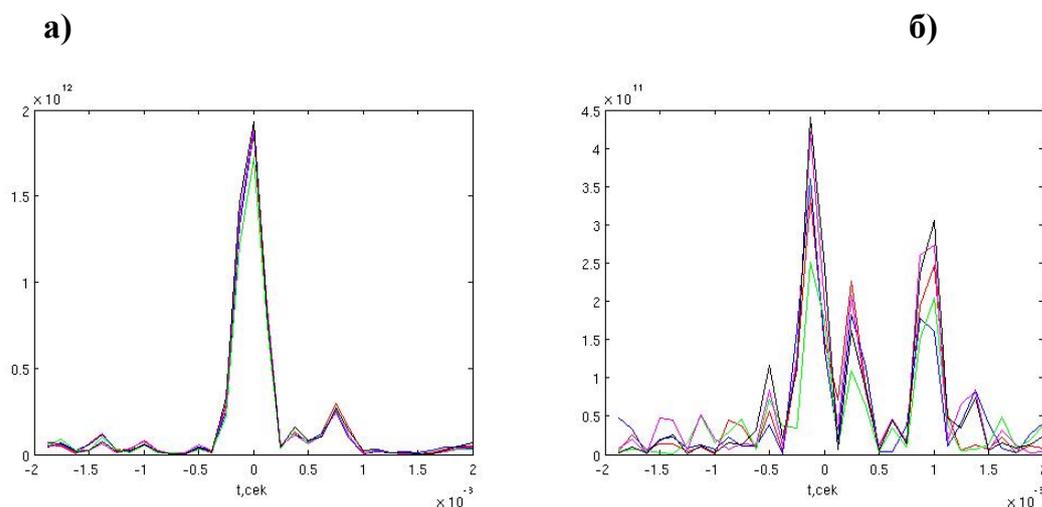


Рисунок 13. Оценки разности хода лучей наблюдаемых в ходе эксперимента на трассе Москва-Санкт-Петербург. а)-один луч, б)-три луча с максимальной разностью хода 1 мсек.

В таблице 4 приведены результаты сравнения двух алгоритмов приема полученные в ходе эксперимента. Всего было произведено 4 сеанса связи каждый длительностью до 5 минут.

Таблица 4 Результаты приема СКК при использовании различных алгоритмов.

Общее число переданных кодовых блоков	Число корректно принятых блоков с детектированием по квадратам огибающей элементарных импульсов ДЧ сигнала	Число корректно принятых блоков при использовании квазикогерентного приема
71	56	63

Из таблицы 4 видно, что использование алгоритма квазикогерентного приема обеспечивает более низкое значение вероятности ошибки на кодовый блок. В ходе испытаний наблюдались как частотно-селективные замирания в полосе 3.25 кГц, так и дружные замирания всей полосы.

**В заключении** сформулированы результаты работы, основными из которых являются:

1. Разработана методика формирования и приема сигнально-кодовых конструкций с использованием турбо-подобных кодов с пониженной сложностью алгоритмов приема.
2. Разработан алгоритм итеративной обработки сигнально-кодовых конструкций на основе предложенных турбо-подобных кодов и M-ичных сигналов при использовании правила некогерентного приема. Произведено сравнение с известными конструкциями, показано наличие энергетического выигрыша.
3. Разработан алгоритм квазикогерентного приема ДЧ сигналов в канале с многолучевым распространением. Путем компьютерного моделирования показано наличие энергетического выигрыша при использовании предложенного способа приема, по сравнению со способом приема по квадратам огибающей элементарных импульсов. Проведены натурные испытания для апробации алгоритма. Испытания подтвердили наличие выигрыша при использовании разработанного алгоритма квазикогерентного приема.
4. Разработана методика оценки вероятностно-энергетических характеристик сигнально-кодовых конструкций с использованием турбо-подобных кодов и ДЧ сигналов в упрощенной модели КВ канала. Выполнена апробация разработанной методики при исследовании вероятностных характеристик для турбо-подобного кода. Показано соответствие теоретических и экспериментальных вероятностных кривых.
5. Исследована сходимость алгоритмов приема сигнально-кодовых конструкций с использованием турбо-подобных кодов и ДЧ сигналов с помощью технологии EXIT. Показано, что использование совместной кодовой решетки ДЧ сигналов и кода-аккумулятора при демодуляции ДЧ сигналов приводит к изменению характера передаточной характеристики  $I_E(I_A)$  такого демодулятора, что снижает пороговое отношение сигнал/шум необходимое для сходимости алгоритмов итеративной обработки СКК с использованием ДЧ сигналов и турбо-подобных кодов.

6. Разработаны и программно-аппаратно реализованы устройства формирования и приема сигнально-кодовой конструкции с использованием турбо-подобного кода и ансамбля ДЧ сигналов. Разработан комплекс мер по борьбе с непреднамеренными помехами характерными для КВ диапазона. Произведены лабораторные испытания реализованных устройств.

7. Разработаны и программно-аппаратно реализованы устройства формирования и некогерентного приема сигнально-кодовых конструкций с использованием турбо-подобных кодов и ансамбля ортогональных сигналов. Произведены лабораторные испытания реализованных устройств.

### **Список использованной литературы:**

1. Аджемов С.С., Воробьев К.А., Косилов И.С., Кочетков Ю.А., Лобов Е.М. Аппаратно-программный макет модема для организации ионосферной связи с использованием многочастотных широкополосных сигналов //Т-Comm – Телекоммуникации и транспорт. – М.: ИД Медиа Паблицер, 2012. – №9, С.4-8
2. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами, – М.: Радио и связь, 1985,384с.
3. Чупеев С.А., Белицкий А.М. Выбор сигнально-кодовых конструкций для радиолинии управления критическими объектами // Теория и техника радиосвязи. – 2014. – № 4. – С. 53.
4. Финк Л.М. Теория передачи дискретных сообщений. М.:Сов.радио. 1970. 722с.
5. Смольянинов В.М., Назаров Л.Е. Мультипликативная граница вероятности правильного распознавания при когерентном приеме // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. №2. С. 446-449.
6. P. Yeh, S. Zummo, and W. Stark, "Error probability of bit-interleaved coded modulation in wireless environments," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 55, no. 2, pp. 722–728, 2006.
7. Hagenauer J., "The exit chart - introduction to extrinsic information transfer in iterative processing" in in Proceedings of the 12th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), pp. 1541-1548, 2004.

### **Список публикаций автора по теме диссертации.**

#### **Статьи в научных журналах:**

1. **Головкин И.В.**, Назаров Л.Е. Турбокоды на основе блоковых кодов. Принципы формирования и приема //Телекоммуникации. 2005. № 11. С. 9-13
2. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** О поведении предельных вероятностных характеристик итеративного приема турбо-кодов на основе блоковых кодов //Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51. № 6. С. 713-719.

3. **Головкин И.В.** Разработка и реализация устройств формирования и приема дискретных сигналов с характеристиками, близкими к шенноновской границе //Нелинейный мир. 2007. Т. 5. № 5. С. 295-296.
4. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Посимвольный прием сигналов, соответствующих высокоскоростным сверточным кодам и турбо-кодов на их основе //Радиотехника и электроника. 2007. Т.32. №10. С.1220-1227.
5. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Итеративный посимвольный прием ансамблей сигналов на основе низкоплотностных кодов //Известия вузов. Электроника. 2007. №3 С.43-49.
6. **Головкин И.В.** Программно-аппаратная реализация сигнально-кодовых конструкций перспективных для систем космической связи //Нелинейный мир. 2008. Т. 6. № 4. С. 241-242.
7. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Реализация алгоритмов итеративного приема блоковых турбо-кодов //Цифровая обработка сигналов. 2009. № 2. С. 2-6.
8. **Головкин И.В.**, Назаров Л.Е. Разработка и реализация алгоритмов итеративного декодирования блоковых турбо-кодов // Цифровая обработка сигналов. 2009. № 4. С. 37.-40.
9. **Головкин И.В.** Разработка эффективных алгоритмов посимвольного приема сигналов, соответствующих двоичным блоковым кодам //Нелинейный мир. 2009. № 3. С. 178-179.
10. Назаров Л.Е. ,**Головкин И.В.** Класс турбо-кодов с пониженной сложностью алгоритмов декодирования //Электросвязь. 2010. №7. С. 12-14.
11. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Последовательные турбо-коды с пониженной сложностью алгоритмов приема // Радиотехника и электроника. - 2010. - Т. 55, N 10. - С. 1193-1199.
12. **Головкин И.В.**, Назаров Л.Е., Назарова З.Т., Манькин Д.Н., Щеглов М.А. Программно-аппаратная реализация сверточных турбо-кодов стандарта CCSDS //Электросвязь 2012. №2. С.25-27.
13. **Головкин И.В.**, Манькин Д.Н., Елсуков Б.А., Клоков С.С. Сигнально кодовая конструкция с использованием ортогональных сигналов и турбо-подобных кодов для некогерентного приема. //Т-Сomm – Телекоммуникации и транспорт. – 2014. – №10. – С. 15-20.
14. **Головкин И.В.** Способ приема дискретных частотных сигналов первого порядка в канале с многолучевостью //Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2015. – № 5. – URL: <http://jre.cplire.ru/jul12/5/text.pdf>
15. **Головкин И.В.** Методика оценивания вероятностных характеристик сигнально-кодовых конструкций с использованием турбо подобных кодов и дискретных частотных сигналов в КВ канале //Журнал радиоэлектроники (электронный журнал). 2015. – № 9. – URL: <http://jre.cplire.ru/sep15/8/text.pdf>

16. **Головкин И.В.** Исследование сходимости итеративных алгоритмов обработки сигнально-кодовых конструкций с использованием дискретных частотных сигналов и турбо-подобных кодов //Т-Сотт – Телекоммуникации и транспорт. – 2016. – №3. – С. 21-28.

**Публикации приравненные к рецензируемым научным изданиям:**

17. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Патент на полезную модель №107613 25.03.2011  
Опубликовано 20.08.2011 бюл. №23
18. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.**, Маныкин Д.Н., Зудилин А.С. Программа имитатора помехоустойчивой системы связи с использованием сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616874 Зарегистрировано 02.11.2011
19. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.**, Маныкин Д.Н., Романовский М.И., Щеглов М.А. Программа кодеков блочных турбо-кодов Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011616892 Зарегистрировано 08.11.2011
20. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.**, Данилович Н.И., Моисеев Н.И., Романовский М.И. Устройство для приема дискретных сигналов Патент на изобретение №248083907.03.2012  
Опубликовано 27.04.2013 бюл. №12
21. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.**, Маныкин Д.Н., Романовский М.И., Щеглов М.А. Программа кодеков сверточных турбокодов Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012616258 Зарегистрировано 09.07.2012
22. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.**, Данилович Н.И., Лукьянова Л.М., Моисеев Н.И., Романовский М.И. Устройство итеративного декодирования блочных турбокодов и SISO декодер для его реализации Патент на изобретение №2504901 11.04.2012  
Опубликовано 20.01.2014 бюл. №2.

**Труды конференций:**

23. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Программно-аппаратная реализация алгоритмов формирования приема турбо-кодов //Материалы конференции «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», Рязань, 2004 г. С. 56-57
24. Назаров Л.Е., Головкин И.В. К вопросу выбора типа турбо-кодексов в системах передачи информации //Сборник докладов 7-ой Международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение”. 16-18 марта. Москва, 2005. С.19-21
25. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Реализация некогерентного приема турбо-кодов на основе блочных кодов //Труды 61-й Научной сессии, посвященной Дню Радио. 21-23 мая. Москва, 2006. Стр. 347-348
26. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.**, Маныкин Д.Н., Куляс М.Е., Щеглов М.А., Моисеев Н.И., Романовский М.И. Особенности программно-аппаратной реализации сигнально-кодовых

- конструкций перспективных для систем космической связи.//Труды Всероссийской научно-технической конференции “Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий”. 19-21 июня. 2007. Москва. С.173-179.
27. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Турбо-подобные коды с пониженной сложностью алгоритмов приема //Труды Всероссийской научно-технической конференции “Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий”. 28-30 апреля. 2008. Москва. С.37-38.
28. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Характеристики турбо-кодов с пониженной сложностью алгоритмов приема //Сборник докладов 10-ой Международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение”. 16-18 марта. Москва, 2008. С.26-28.
29. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Разработка и реализация турбо-подобных кодов, перспективных для применения в спутниковых системах связи //Труды Всероссийской научно-технической конференции “Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий”. 2-4 июня. 2009. Москва. CD-ROM.
30. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Класс турбо-подобных кодов с пониженной сложностью алгоритмов декодирования //Труды 3 Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и связь». 26 -30 октября. 2009 г. Москва. Т.2 С.202-203.
31. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.**, Маныкин Д.Н., Куляс М.Е., Щеглов М.А., Моисеев Н.И., Романовский М.И. Разработка и исследование методов помехоустойчивой обработки сигналов в спутниковых системах связи с ортогональным частотным уплотнением //Труды Всероссийской научно-технической конференции “Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий”. 2010. Москва. С.496-499.
32. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Разработка и исследование высокоскоростных низкоплотностных кодов, перспективных для применения в системах спутниковой связи //Труды Всероссийской научно-технической конференции “Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий”. 2-4 июня. 2010. Москва. С.500-507
33. Назаров Л.Е., **Головкин И.В.** Программно аппаратная реализация помехоустойчивых кодов стандарта CCSDS //Труды 5 Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и связь». 21 -25 ноября. 2011 г. Москва. Стр.229-232.
34. **Головкин И.В.**, Назаров Л.Е., Шишкин П.В. Сигнально кодовые конструкции для некогерентного приема //Труды 68-й Научной сессии, посвященной Дню Радио. 21-23 мая 2013. С.233-235

35. **Головкин И.В.** Сигнально-кодовая конструкция с использованием дискретных частотных сигналов для сложной помеховой обстановки //Труды конференции “Радиолокация и связь”. 25-27 ноября 2013. Москва. С.269-272.
36. **Головкин И.В.,** Маныкин Д.Н. Сравнительный анализ помехоустойчивых кодов для систем с использованием дискретных частотных сигналов и некогерентным приемом //Сборник докладов 16-ой Международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение”. Москва, 2014. С.228-230
37. **Головкин И.В.** Сравнительный анализ помехоустойчивых кодов для систем с использованием дискретных частотных сигналов и итеративной обработкой в каналах с замираниями //Труды 69-й Научной сессии, посвященной Дню Радио. 21-23 мая 2014. С.203-205
38. **Головкин И.В.,** Клоков С.С., Косилов И.С. Сопоставимость дискретных частотных сигналов и М-ичной ЧМ при некогерентном приеме с использованием двоичных LDPC кодов //Сборник докладов 17-ой Международной конференции “Цифровая обработка сигналов и ее применение”. Москва, 2015. С.229-231
39. **Головкин И.В.** Квазикогерентный прием сигнально-кодовых конструкций с использованием дискретных частотных сигналов и турбо-подобных кодов в КВ канале //Труды 9 Всероссийской научно-технической конференции «Радиолокация и связь». 23 -25 ноября. 2015 г. Москва. С.15-18.