

На правах рукописи



**СИНИЦИН ДМИТРИЙ ВЯЧЕСЛАВОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕР-  
ТОЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ**

Специальность: 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы  
и устройства телевидения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владимир – 2014

Работа выполнена на кафедре радиотехники и радиосистем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» - (ВлГУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент, профессор кафедры Радиотехники и радиосистем ВлГУ  
**Полушин Петр Алексеевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент, доцент кафедры Динамики электронных систем ФГБОУ ВПО Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова  
**Приоров Андрей Леонидович**

кандидат технических наук,  
заместитель главного инженера по новой технике ЗАО «КОБРА», г. Владимир  
**Кучин Сергей Игоревич**

Ведущая организация: ОАО «Владимирское КБ радиосвязи», г. Владимир

Защита диссертации состоится «24» февраля 2015 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.025.04 при ФГБОУ ВПО Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ, ауд. 301-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых и на сайте <http://www.vlsu.ru>

Автореферат разослан «03» декабря 2014 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87, ВлГУ, ФРЭМТ.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.025.04  
доктор технических наук, профессор



А.Г. Самойлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время развитие систем передачи информации по радиоканалам имеет тенденцию, заключающуюся в непрерывном росте количества радиоизлучающих средств за счет развития современных систем передачи информации. Увеличивается разнообразие источников радиоизлучения, в том числе от промышленного оборудования и транспорта. Одновременно при этом должны сохраняться требования на качественные характеристики, что определяет важную научную и практическую проблему, заключающуюся в разработке новых методов и алгоритмов сверточной обработки сигналов для повышения помехоустойчивости систем передачи информации в условиях ухудшающейся помеховой обстановки. Эта проблема может быть решена за счет повышения характеристик путем модификации имеющихся алгоритмов сверточной обработки сигналов.

Широкое применение в системах передачи цифровой информации нашли сверточные коды. Они используются в системах мобильной и спутниковой связи, в модемах для телефонных линий связи и в других радиотехнических системах. Сверточные коды рассматривались в работах таких ученых, как Л.М. Финк, А.Г. Зюко, В.Л. Банкет, Э.Витерби, Дж. Кларк, Дж. К. Омура, Дж. Хеллер и др. Особенно эффективным считается алгоритм сверточного декодирования, впервые предложенный Э.Витерби. Однако в современных условиях эффективность многих методов сверточной обработки сигналов оказывается недостаточной. Эти методы разрабатывались для работы в условиях воздействия аппаратурных шумов. При наличии внешних помех или замираний сигналов существующие методы сверточной обработки сигналов уже не обеспечивают необходимого качества передаваемой информации, а при некоторых условиях может возникнуть полный срыв связи. В то же время имеется возможность производить внутреннюю адаптацию некоторых методов сверточной обработки сигналов, повышающих помехоустойчивость, при различных условиях работы.

**Цель исследований.** Целью диссертации является разработка и исследование методов и алгоритмов сверточной обработки сигналов для повышения устойчивости систем передачи информации к внешним узкополосным помехам и замираниям уровня сигнала.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

- разработка и исследование метода сверточного декодирования в условиях перемежения символов;
- исследование влияния узкополосных помех на характеристики алгоритма сверточного декодирования Витерби;
- разработка алгоритма предварительного снижения уровня узкополосной помехи до декодирования;
- разработка комплексного алгоритма сверточного декодирования при воздействии узкополосных помех;

- разработка алгоритмов адаптации сверточных кодов в системах передачи информации с различными видами разнесения.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались методы, основанные на положениях теории вероятностей, математической статистики, теории кодирования. Для практической реализации осуществлялось компьютерное моделирование с использованием ЭВМ и языка программирования Matlab.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Разработан и исследован модифицированный метод декодирования сверточных кодов в условиях перемежения символов.
2. Для случая воздействия узкополосных помех разработаны алгоритм предварительного снижения уровня помехи до декодирования и комплексный алгоритм сверточного декодирования.
3. В системах с разнесением и обратной связью предложены и обоснованы варианты адаптации сверточных кодов.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

1. Разработанный модифицированный метод сверточного декодирования на основе алгоритма Витерби обеспечивает выигрыш в помехоустойчивости на 0,5 - 4 дБ по сравнению с работой «классического» алгоритма Витерби в условиях перемежения символов.
2. Предложен и проанализирован комплексный алгоритм сверточного декодирования символов, позволяющий устранить влияние узкополосной помехи.
3. Для частотного и пространственного разнесения разработаны варианты адаптации алгоритма сверточного декодирования, дающие выигрыш в помехоустойчивости от 2,5 дБ до 6 дБ по сравнению с работой «классического» алгоритма Витерби при замираниях сигналов.
4. Для систем двухсторонней передачи с обратной связью и пространственным разнесением разработана и проанализирована структурная схема передатчика с фазовым управлением мощностью разнесенных сигналов.

Результаты исследований внедрены в учебный процесс кафедры радиотехники и радиосистем ВлГУ для направления «Радиотехника», а также на предприятии ОАО Владимирский завод «Электроприбор».

**Личный вклад автора.** Синициным Д.В. на основе проведенного анализа сформулированы задачи диссертационного исследования, предложены новые методы и алгоритмы сверточной обработки сигналов, новизна которых подтверждается 3 патентами и 6 свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ. Автором лично подготовлены и опубликованы полученные результаты исследования, проведены модельные эксперименты.

**Достоверность** полученных в работе результатов подтверждается результатами компьютерного моделирования, демонстрирующими эффективность предложенных методов и алгоритмов сверточной обработки сигналов, совпадением результатов моделирования с результатами, известными из литературы.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Метод адаптации сверточного алгоритма декодирования Витерби при перемежении символов, позволяющий в условиях воздействия замираний и использования перемежения символов повысить эффективность исправления ошибок при сверточном декодировании символов.

2. Комплексный алгоритм сверточного декодирования, дающий возможность устранять воздействие узкополосных помех на систему передачи информации и восстанавливать эффективность сверточного декодирования.

3. Алгоритм, использующий предварительную обработку кодированных сигналов, позволяющий повысить помехоустойчивость передачи цифровых сигналов при одновременном воздействии внешней помехи и аддитивных шумов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации обсуждались на следующих научно-технических конференциях и семинарах:

- IX, X МНТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» (2011, 2013), Владимир – Суздаль;
- XV Всероссийской научной конференции студентов – радиофизиков (2011), Санкт-Петербург;
- Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (2013), Новосибирск;
- XX Всероссийской научной конференции студентов – физиков и молодых ученых (2014), Ижевск;
- IX МНТК «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии» (2014), Владимир – Суздаль.

**Публикации по работе.** По теме диссертации опубликовано 20 научных работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 1 публикация в зарубежных изданиях, получен 1 патент на изобретение, 2 патента на полезную модель и 6 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, содержит 125 страниц основного текста, 47 рисунков и 1 таблицу, список литературы из 111 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** показана актуальность, научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы цель и задачи, указана методика исследования, обоснована достоверность полученных результатов, указана апробация работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** с целью последующей модификации рассмотрены особенности принципа сверточного кодирования и реализации алгоритма декодирования Витерби. Данный алгоритм был разработан для уменьшения объема вычислений по сравнению с алгоритмом последовательного декодирования и основывается на принципе максимального правдоподобия. Каждая ячейка решетчатой диаграммы конкретного сверточного кода реализуется с помощью логической операции, которая называется «сложение, сравнение и выбор». Поскольку практическая реализация этой операции не составляет большой сложности, то очевидным преимуществом алгоритма Витерби является возможность вносить в него внутренние корректировки применительно к различным условиям работы. Для сравнения приведены другие алгоритмы сверточного декодирования.

В качестве моделей каналов передачи информации используются канал с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ) и канал с замираниями. Для канала с замираниями выбрана наиболее общая четырехпараметрическая модель. Рассмотрены основные модели информационных сигналов. В работе анализируются сигналы с цифровой модуляцией BPSK, в том числе разнесенные сигналы. Приведены методы перемежения сигналов, описаны виды частотного, пространственного, временного и углового разнесения. Дана классификация различных видов мешающих воздействий. В качестве модели помеховых сигналов в системах передачи информации выбрана модель с сосредоточенными по спектру помехами.

По итогам постановочной главы сделан вывод, что внутренняя структура алгоритма сверточного декодирования Витерби дает возможность производить его адаптацию при различных внешних условиях. При этом разнообразие сочетаний форм информационных сигналов и помеховой обстановки не позволяет применить универсальный метод подавления помех для последующего успешного декодирования полезного сигнала, а требует использования набора различных методов.

**Во второй главе** предлагается и исследуется модифицированный метод адаптации алгоритма сверточного декодирования Витерби в условиях перемежения символов и замираний сигналов. Предполагается, что интервал временного разделения между символами, которые подвергаются перемежению, больше, чем интервал корреляции быстрых замираний. После перемежения идущие подряд сильно искаженные символы претерпевают разнесение во времени и далее можно успешно применять сверточное декодирование согласно алгоритму Витерби, однако при этом возможен неправильный выбор наилуч-

шего пути по решетке и, следовательно, неправильное декодирование какого-то участка переданной информационной последовательности.

В случае перемежения соседние символы исходной последовательности при передаче по каналу будут отстоять друг от друга на значительный интервал времени. Уровень принимаемого сигнала при этом может сильно различаться. При постоянном уровне шума входных цепей, который в основном и определяет общий уровень шума, отношение «сигнал/шум» принятых соседних символов после деперемежения также может сильно различаться.

Пусть вероятность  $q$ -того варианта последовательности равна  $P_q$ , тогда  $P_q = \prod_i^N p_i^{(q)}\{y_i/a_i^{(q)}\}$ , где  $p_i^{(q)}\{y_i/a_i^{(q)}\}$  – условная вероятность того, что при значении переданного  $i$ -того символа, равном  $a_i^{(q)}$ , на выходе демодулятора появится напряжение, равное  $y_i$ . Условная вероятность  $p_i^{(q)}\{y_i/a_i^{(q)}\}$  равна:

$$p_i^{(q)}\{y_i/a_i^{(q)}\} = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[y_i - a_i^{(q)}]^2}{2\sigma_i^2}\right\}, \quad (1)$$

где  $\sigma_i$  – среднеквадратическое значение шума на временном интервале  $i$ -того символа. Формула (1) также преобразуется в:

$$\ln(P_q) = -0,5N \ln 2\pi - \sum_i^N \ln \sigma_i - \sum_i^N \frac{1}{2\sigma_i^2} [y_i - a_i^{(q)}]^2 = -0,5N \ln 2\pi - \sum_i^N \ln \sigma_i - \sum_i^N \alpha_i [y_i - a_i^{(q)}]^2, \quad (2)$$

где  $\alpha_i = 1/2\sigma_i^2$  – некоторые корректирующие коэффициенты. Таким образом, в предлагаемом способе, после отбрасывания частей, одинаковых для всех последовательностей после демодулятора, правило декодирования состоит в выборе той последовательности символов, которой соответствует минимум суммы  $\sum_i^N \alpha_i [y_i - a_i^{(q)}]^2$ , то есть значения метрик переходов должны коррелироваться в соответствие с величиной коэффициентов  $\alpha_i$  для каждого символа.

Дополнительный выигрыш в помехоустойчивости можно достичь путем использования пространственного разнесения, а именно различных методов квазиоптимального управления передачей разнесенных сигналов. В работе исследован метод линейного сложения сигналов. В этом случае оба кодовых символа передаются одновременно по двум каналам передачи информации. В декодере вычисляются метрики состояний для каждого канала в соответствие с новым методом, которые затем складываются. Предложена структура, осуществляющая описываемый способ, защищенная патентом на изобретение. В укрупненном виде она приведена на рисунке 1.

На рисунках 2 и 3 приведены некоторые результаты моделирования работы предлагаемого способа. Представлены графики зависимости вероятности ошибки декодирования символа от соотношения энергии сигнала, приходящейся на один бит входного сообщения, к спектральной мощности шума. Для моделирования использовались стандартные сверточные коды (7,5) и (171,133) (код NASA) со скоростями 1/2 и 2/3 соответственно.

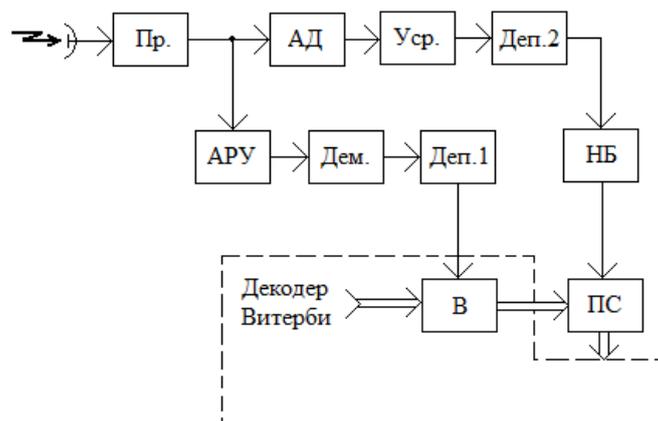


Рисунок 1. Укрупненная структурная схема метода адаптации алгоритма сверточного декодирования Витерби при перемежении символов и замираниях сигналов.  
 Обозначения: Пр. – приемник; АРУ – блок автоматической регулировки усиления; Дем. – демодулятор; Деп.1 и Деп.2 – первый и второй блоки деперемежения; АД – амплитудный детектор, Уср. – усреднитель; НБ – нелинейный блок; В – многоканальный вычитатель; ПС – перемножитель – сумматор.

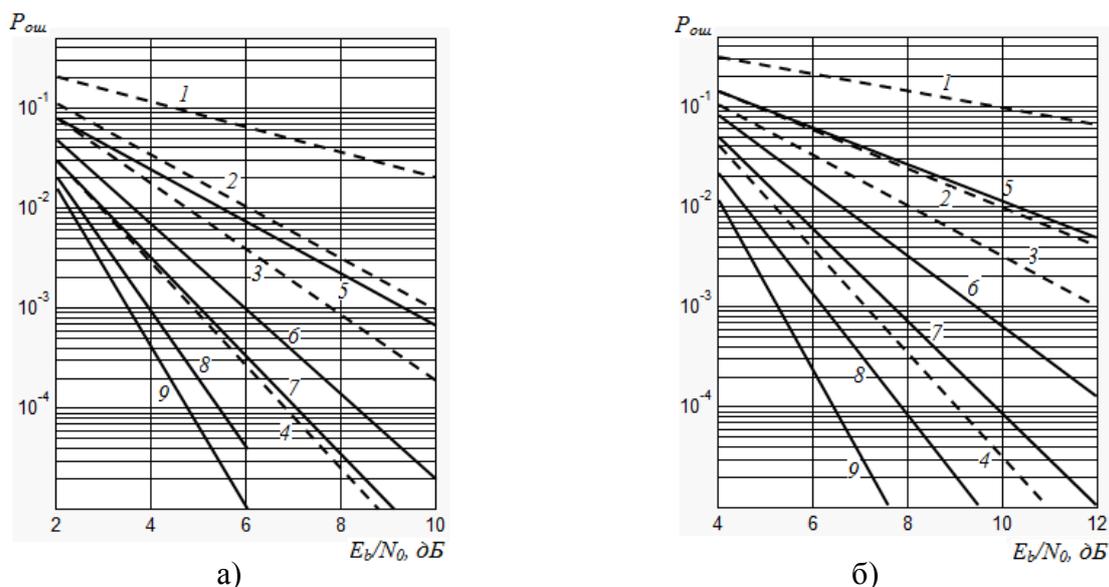


Рисунок 2. Характеристики помехоустойчивости модифицированного метода

В качестве моделей замираний использовались следующие модели:

- односторонне – нормальное распределение ( $m_x=0$ ;  $m_y=0$ ;  $\sigma_x=0$ ;  $\sigma_y=1$ , графики 1,5);
  - релеевское распределение ( $m_x=0$ ;  $m_y=0$ ;  $\sigma_x=1$ ;  $\sigma_y=1$ , графики 2,6);
  - распределение Райса с параметрами ( $m_x=2$ ;  $m_y=0$ ;  $\sigma_x=1$ ;  $\sigma_y=1$ , графики 3,7);
  - распределение Райса с параметрами ( $m_x=4$ ;  $m_y=0$ ;  $\sigma_x=1$ ;  $\sigma_y=1$ , графики 4,8).
- $m_x$ ,  $m_y$ ,  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  – математические ожидания и дисперсии ортогональных компонент четырехпараметрической модели замирания сигналов. Рисунок 2 соответствует сверточному коду (7,5), рисунку 3 соответствует сверточному коду (171,133). Рисунок 2-а и 3-а соответствует коду со скоростью 1/2, рисункам 2-б и 3-б соответствует коду со скоростью 2/3. Графикам 1,2,3,4, обозначенным

пунктирными линиями, соответствует работа стандартного алгоритма Витерби в условиях перемежения символов, графикам 5,6,7,8 соответствует работа модифицированного алгоритма Витерби в условиях перемежения символов, графику 9 соответствует работа «классического» алгоритма Витерби без наличия замираний и перемежения.

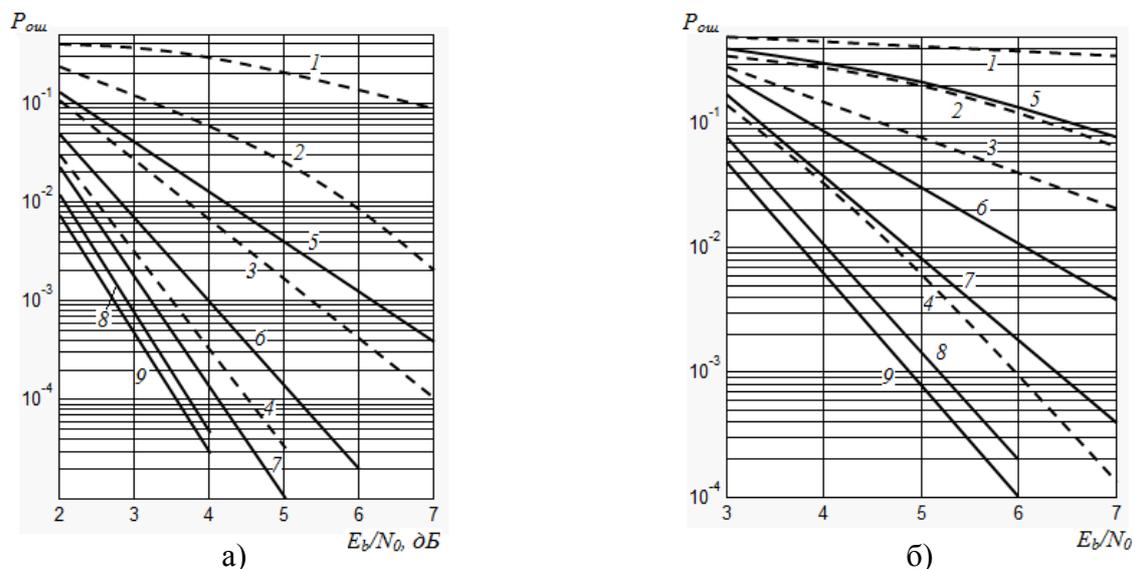


Рисунок 3. Характеристики помехоустойчивости модифицированного метода

В результате анализа сделан вывод о том, что наличие замираний сигналов в канале передачи информации существенно ухудшает помехоустойчивость сверточных кодов. При этом независимо от типа сверточного кода и модели замираний сигналов характеристики помехоустойчивости предложенного модифицированного алгоритма Витерби при перемежении символов выше, чем у стандартного алгоритма Витерби. Выигрыш от применения метода при перемежении символов составляет 0,5 – 4 дБ по сравнению с «классическим» алгоритмом в зависимости от типа используемого сверточного кода и модели замираний сигналов.

**В третьей главе** рассматривается процесс сверточного декодирования в условиях воздействия узкополосных помех. Определяется характер и степень влияния сосредоточенных помех на системы передачи информации со сверточным кодированием. Дается описание двух алгоритмов компенсации узкополосных помех: первый алгоритм основан на предварительном снижении уровня помехи до значения, при котором она не будет оказывать существенного влияния на декодер; второй алгоритм заключается во взвешенном вычитании соседних отсчетов принимаемого сигнала перед декодером и изменением структуры кодированного информационного сигнала.

В приемнике с помощью опорного колебания  $S_0(t)=U_0\cos\omega ct$ , синфазного с несущей информационного сигнала, ведется корреляционный прием входного сигнала с модуляцией BPSK вида  $S_i(t)=U_c\cos(\omega ct+\varphi_i)=U_c\cos(\omega ct)$ , где  $i$  – номер текущего символа; фаза  $\varphi_i$  может принимать значения  $0^\circ$  или  $180^\circ$ ; внешняя

помеха описывается выражением  $Z(t)=U_{\Pi}\cos(\omega_{\Pi}t+\psi)$ ;  $\omega_C$  и  $\omega_{\Pi}$  – частоты сигнала и помехи;  $\psi$  – начальная фаза помехи.  $U_{Ci}$  может принимать значения +1 и -1 в зависимости от передаваемой информации. Интегрирование результата корреляционной обработки сигнала, пораженного помехой, на интервале  $T_C$  длительности одного символа, определит уровень помеховой составляющей в суммарном сигнале:

$$z_i = \frac{1}{2}U_{\Pi}U_0T_C \frac{\sin(\Delta\varphi/2)}{(\Delta\varphi/2)} \cos[(i+0,5)\Delta\varphi + \varphi_{\Pi}], \quad (3)$$

где  $\Delta\varphi = \Delta\omega T_C = (\omega_0 - \omega_{\Pi})T_C$ . Присутствие помехи выражается в том, что в приемнике после коррелятора к значениям отсчетов передаваемого сигнала добавляются компоненты, огибающая которых представляет собой гармоническую функцию с амплитудой  $r = U_{\Pi} \sin(\Delta\varphi/2)/(\Delta\varphi/2)$ .

В ситуации, когда уровень помехи небольшой, любое значение выходного сигнала позволяет однозначно отнести соответствующий переданный кодовый символ либо к значению +1, либо к значению -1. Декодирование без учета шума при этом происходит без ошибок. Однако при уровне помехи, превышающем пороговое значение, сравнимое с уровнем полезного сигнала, правило соотнесения кодовых символов нарушается. Осуществляемое «классическим» алгоритмом Витерби вычисление метрик различных путей по решетке, как суммы расстояний между принятым отсчетом и вариантом перехода, даже в отсутствие шума, дает заведомо неправильный вывод о преимуществе того или иного пути.

На рисунке 4 представлены графики функции плотности распределения значений отсчетов сигнала при одновременном воздействии шума и помехи. Использовались два значения амплитуды узкополосной помехи: 0,2 для рисунка 4-а (малый уровень помехи) и 1,5 для рисунка 4-б (большой уровень помехи). Графики построены для пяти значений уровня шума: кривой 1 соответствует отношение «сигнал/шум» 2 дБ, кривой 2 – 5 дБ, кривой 3 – 8 дБ, кривой 4 – 12 дБ и кривой 5 – 20 дБ.

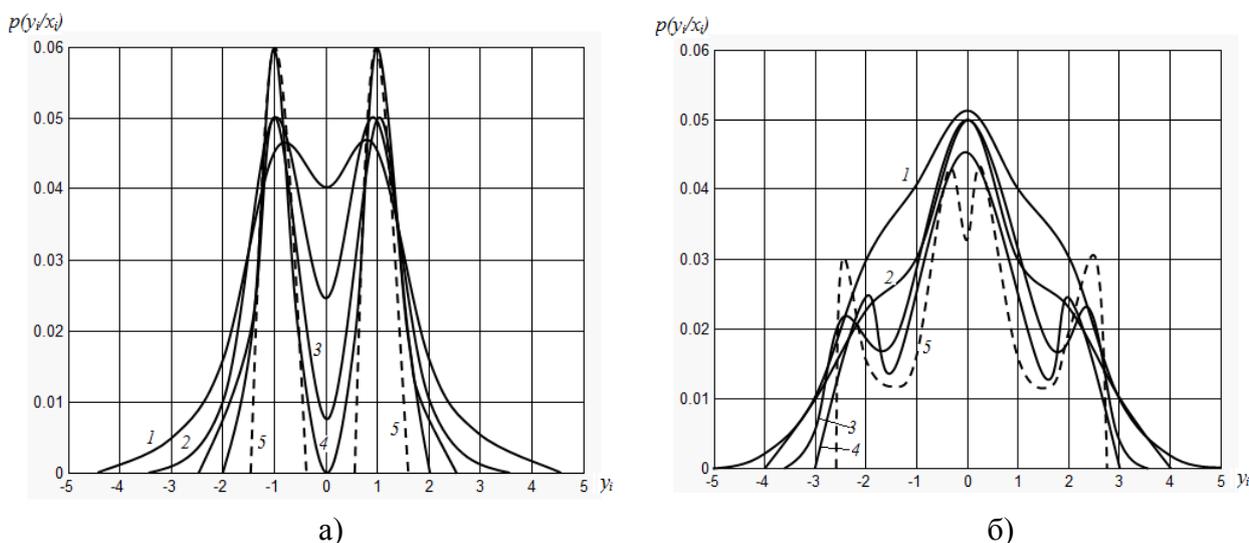


Рисунок 4. Плотность распределения значений отсчетов сигнала при одновременном воздействии шума и помехи.

Сделан вывод, что чем больше разница между центральной частотой полезного сигнала и частотой узкополосной помехи, тем вероятность ошибки декодирования становится меньше.

Разработан и проанализирован алгоритм предварительного снижения уровня помехи. Структурная схема реализации алгоритма представлена на рисунке 5.

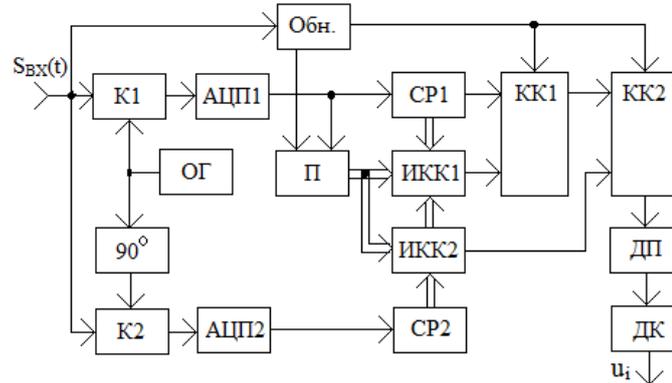


Рисунок 5. Структурная схема реализации алгоритма предварительного снижения уровня помехи.

Обозначения: К1 и К2 – корреляторы; ОГ – опорный генератор; СР1 и СР2 – сдвиговые регистры; П – блок памяти; ИКК1 и ИКК2 – блоки измерения коэффициентов корреляции; КК1 и КК2 – корреляционные компенсаторы; ДП – деперемежитель; ДК – декодер; Обн. – обнаружитель помех.

Для реализации алгоритма формируется модель узкополосной помехи до осуществления деперемежения символов, и затем ее отсчеты вычитаются из суммарных значений отсчетов сигнала. Значения отсчетов после двух блоков измерения коэффициентов корреляции определяются, как:

$$\begin{aligned}
 v_{Cj} &= \frac{1}{N} \sum_{k=i}^{i+N} \{x_k x_{j+k} + r^2 \cos[(k+0,5)\Delta\varphi + \varphi_{\Pi}] \cos[(j+k+0,5)\Delta\varphi + \varphi_{\Pi}] + n_k n_{j+k}\} = \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{k=i}^{i+N} \{x_k x_{j+k} + 0,5r^2 \cos(j\Delta\varphi) + 0,5r^2 \cos[(j+2k+1)\Delta\varphi + 2\varphi_{\Pi}] + n_k n_{j+k}\} \approx \\
 &\approx 0,5r^2 \cos(j\Delta\varphi); v_{Sj} \approx 0,5r^2 \sin(j\Delta\varphi).
 \end{aligned} \tag{4}$$

Уровень помехи после подобной обработки становится ниже порогового значения, при котором эффективная работа декодера Витерби становится возможной.

Предложен и проанализирован комплексный алгоритм сверточного декодирования цифровых сигналов при воздействии узкополосных помех. Схема реализации алгоритма представлена на рисунке 6. При осуществлении данного алгоритма используется достаточная степень коррелированности помеховых компонент соседних отсчетов сигнала до деперемежения. Значение огибающей помеховой составляющей отсчета номера  $i+1$  можно выразить через составляющую предыдущего отсчета  $i$  следующим образом:

$$\begin{aligned}
 z_{i+1} &= A \cos[(i+1)\Delta\varphi + \varphi_{\Pi}] = A \cos \Delta\varphi \cos(i\Delta\varphi + \varphi_{\Pi}) + \\
 &+ A \sin \Delta\varphi \sin(i\Delta\varphi + \varphi_{\Pi}) = az_i + b\tilde{z}_i,
 \end{aligned} \tag{5}$$

где  $z_i$  вычисляется по формуле (3), а  $\tilde{z}_i = \frac{1}{2} U_{II} U_0 T_c \frac{\sin(\Delta\varphi/2)}{(\Delta\varphi/2)} \sin[(i+0,5)\Delta\varphi + \varphi_{II}]$ .

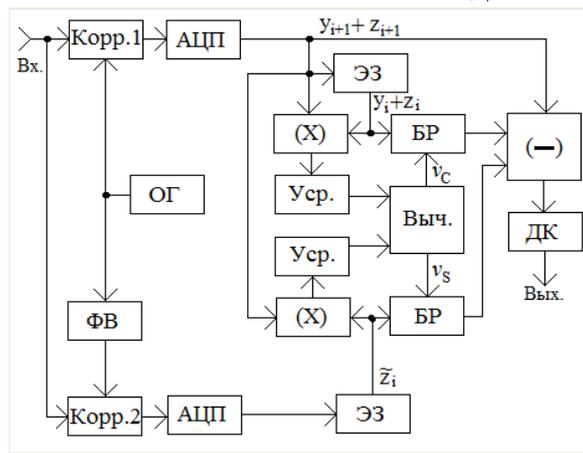


Рисунок 6. Схема реализации комплексного алгоритма декодирования

Обозначения: Корр.1 и Корр.2 – корреляторы; ОГ – опорный генератор; ФВ – фазовращатель; ЭЗ – элемент задержки; БР – блоки регулировки; (-) – вычитатель; ДК – декодер; X – множитель; Уср. – усреднитель; Выч. - вычислитель

Ортогональная составляющая  $\tilde{z}_i$  может быть получена, если в дополнительном корреляторе в качестве опорного сигнала использовать не колебание  $S_0(t)=U_0\cos\omega ct$ , а сдвинутое на  $\pi/2$  колебание  $S_0(t)=U_0\sin\omega ct$ . Таким образом, если из значения текущего отсчета вычесть значения предыдущих отсчетов после «косинусного» и «синусного» корреляторов, домноженные на соответствующие коэффициенты  $a$  и  $b$ , то помеховая составляющая в отсчетах будет уменьшена.

Важным является факт, что удаление помехи с помощью описываемого алгоритма сопровождается изменением структуры кодированного информационного сигнала. Вместо сигнала  $y_{i+1}$  на декодер поступает сигнал  $y_{i+1}-v_c y_i$ , где  $v_c=0,5A^2\cos\Delta\varphi$ . Для его правильного декодирования алгоритм Витерби также должен быть модифицирован. Для этого в операцию декодирования добавляется арифметическая составляющая. В новой ситуации, когда на вход декодера вместо сигналов  $y_i$  поступают сигналы  $y_i-v_c y_{i-1}$ , это эквивалентно тому, что в передатчике вместо кодера, изображенного на рисунке 7-а, использовался бы кодер, структура которого изображена на рисунке 7-б. Это можно учесть при декодировании.

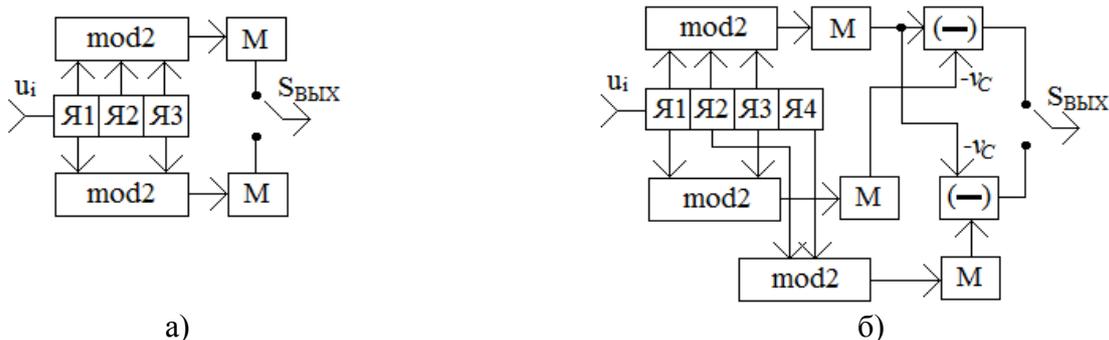


Рисунок 7. Структурные схемы стандартного кодера (7,5) и модифицированного кодера

**В четвертой главе** рассматривается возможность адаптации алгоритмов сверточной обработки сигналов с использованием частотного и пространственного разнесения. Для систем передачи информации с обратной связью предлагается принцип фазового управления передачей разнесенных сигналов.

В случае использования двукратного частотного разнесения, с появлением каждого информационного символа кодер передатчика вырабатывает два кодовых символа, которые в «классическом» методе передаются последовательно по времени. При этом длительность каждого кодового символа в два раза меньше длительности информационного символа. В предлагаемом алгоритме один из кодовых символов передается по одному из частотно-разнесенных каналов, а другой - по другому. На приемной стороне оба символа по отдельности демодулируются и подаются в нужном порядке на декодер, восстанавливающий из них исходную информационную последовательность. При декодировании с помощью алгоритма Витерби в соответствующие метрики переходов в решетчатой диаграмме по каждому символу из пары вводятся поправки по новому методу, изложенному во второй главе.

На рисунке 8 показана структурная схема реализации алгоритма адаптации сверточного кода при использовании частотного разнесения.

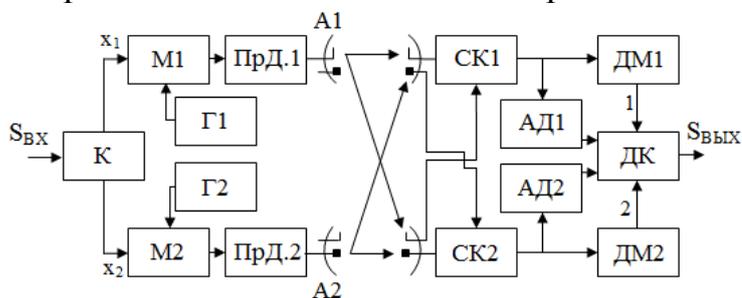
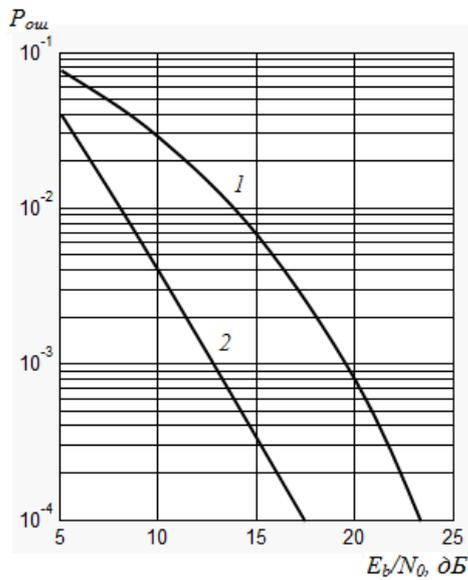


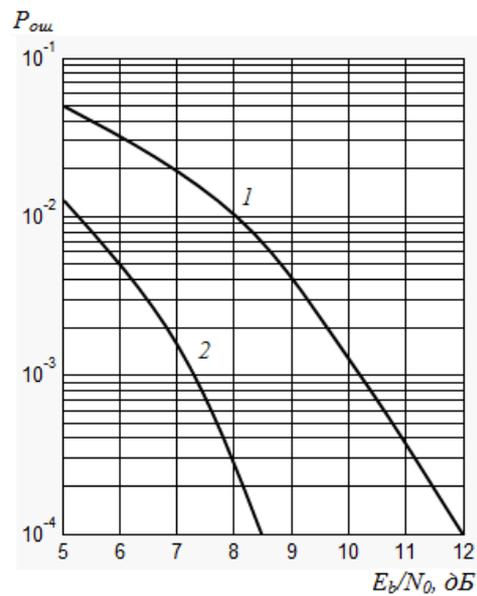
Рисунок 8. Структурная схема реализации алгоритма адаптации при частотном разнесении

Обозначения: К – кодер; М1 и М2 – модуляторы; ПрД.1 и ПрД.2 – передатчики; Г1 и Г2 – опорные генераторы; А1 и А2 – антенны; СК1 и СК2 – схемы комбинирования; ДМ1 и ДМ2 – демодуляторы; АД1 и АД2 – амплитудные детекторы; ДК – декодер.

Эффективность предлагаемого алгоритма исследовалась с помощью компьютерного моделирования. На рисунке 9 показаны графики зависимости значения вероятности ошибочного декодирования символа от отношения энергии сигнала, приходящейся на один входной бит, к спектральной мощности шума. На рисунке 9-б скорость замираний символов в 10 раз меньше, чем на рисунке 9-а. Использовался сверточный код (7,5). Кривой 1 соответствует работа декодера без адаптации в условиях замираний сигналов, кривой 2 – с адаптацией по предлагаемому алгоритму в условиях замираний сигналов. Выигрыш в помехоустойчивости предлагаемого алгоритма составляет от 2,5 дБ до 6 дБ в зависимости от длины блока с одинаковой амплитудой замираний.



а)



б)

Рисунок 9. Характеристики помехоустойчивости модифицированного алгоритма при частотном разнесении

При использовании пространственного разнесения также возможно применить предлагаемый алгоритм, однако при этом возникают трудности разделения принятых сигналов, поскольку они будут передаваться на одинаковой частоте. Для решения этой проблемы использовано поляризационное разделение. Суть алгоритма заключается в том, что каждый из двух кодовых символов излучается отдельной антенной, при этом один символ имеет горизонтальную поляризацию, а другой вертикальную. В приемнике сигналы складываются согласно одному из методов сложения. Структурная схема алгоритма будет такая же, как на рисунке 8, но вместо двух опорных генераторов применяется один генератор.

Если в системе передачи информации используется двухсторонняя передача, то можно, анализируя уровни сигналов после амплитудных детекторов, транслировать эту информацию по служебному каналу обратной связи на передающую сторону. В соответствии с этим общая мощность передатчиков перераспределяется между антеннами таким образом, чтобы получить дополнительный выигрыш в помехоустойчивости при передаче информации.

Однако прямая регулировка мощности высокочастотного сигнала, вырабатываемого мощными выходными каскадами передатчика, имеет ряд недостатков. При использовании одного передатчика плавное перераспределение его мощности между антеннами затруднительно, так как сигналы, излучаемые ими, различны. Если применять два передатчика, то отведение части мощного высокочастотного сигнала одного из передатчиков в другую антенну технически также встречает сложности. Эти недостатки снимаются, если использовать принцип фазового управления передачей разнесенных сигналов, который поясняется рисунками 10 и 11.

На входах моста комплексные амплитуды (с учетом фазы сигнала) напряжений равны  $\dot{U}_a$  и  $\dot{U}_b$ . Тогда комплексные амплитуды на его выходах равны:

$$\dot{S}_1 = \left( \dot{U}_a \exp\left(-j\frac{\pi}{2}\right) + \dot{U}_b \exp(-j\pi) \right) / \sqrt{2}, \quad \dot{S}_2 = \left( \dot{U}_a \exp(-j\pi) + \dot{U}_b \exp\left(-j\frac{\pi}{2}\right) \right) / \sqrt{2}. \quad (6)$$

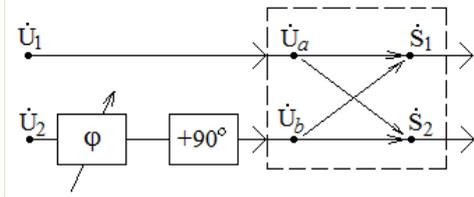


Рисунок 10. Схема использования квадратурного моста

Обозначения: A1 и A2 – антенны; Кв.М. – квадратурный мост; УМ1 и УМ2 – усилители мощности; Г – генератор несущей частоты; М – модулятор; Комм. – коммутатор; Инв. – инвертор; К – сверточный кодер; ЛБ – логический блок.

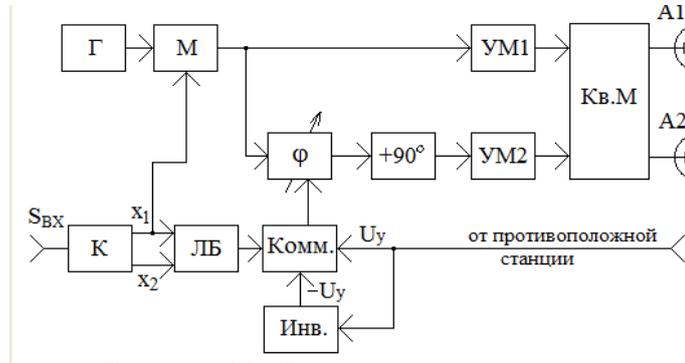


Рисунок 11. Структурная схема передатчика

С предыдущих каскадов на входы квадратурного моста подаются сигналы: на первый вход – непосредственно с амплитудой  $\dot{U}_1 = \dot{U}_a$ , а на второй вход – сигнал с некоторым фазовым сдвигом, равным  $\varphi + \pi/2$ . Амплитуда на втором входе равна  $\dot{U}_2 = \dot{U}_b \exp\left(j\varphi + j\frac{\pi}{2}\right)$ . Обозначим  $\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}$ . Тогда амплитуды сигналов на выходах моста будут равны:

$$\dot{S}_1 = \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) (\dot{U}_1 + \dot{U}_2 \exp(j\varphi)) / \sqrt{2} = j\dot{U} + (\exp(j\varphi)) / \sqrt{2}, \quad (7)$$

$$\dot{S}_2 = (\dot{U}_1 \exp(-j\pi) + \dot{U}_2 \exp(j\varphi)) / \sqrt{2} = \dot{U}(-1 + \exp(j\varphi)) / \sqrt{2}. \quad (8)$$

В «классическом» случае  $\varphi=0$ , сигнал на втором выходе равен нулю, а амплитуда сигнала на первом выходе равна  $\sqrt{2}\dot{U}$ , что соответствует удвоенной мощности. Если  $\varphi \neq 0$ , то средняя мощность сигналов на первом и втором выходах будет равна:

$$P_1 = \overline{(\dot{S}_1 \dot{S}_1^*)} / 2 = P(1 + \exp(j\varphi))(1 + \exp(-j\varphi)) / 2 = P[1 + (\exp(j\varphi) + \exp(-j\varphi)) / 2] = P(1 + \cos \varphi), \quad (9)$$

$$P_2 = \overline{(\dot{S}_2 \dot{S}_2^*)} / 2 = P(-1 + \exp(j\varphi))(-1 + \exp(-j\varphi)) / 2 = P[1 - (\exp(j\varphi) + \exp(-j\varphi)) / 2] = P(1 - \cos \varphi), \quad (10)$$

где  $P$  – мощность сигнала амплитуды  $\dot{U}$ ; «\*» означает комплексное сопряжение; черта над выражением – усреднение по времени. Таким образом, изменяя величину  $\varphi$ , общая мощность передатчика, равная  $2P$ , плавно перераспределяется между выходами моста.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Применение перемежения символов для борьбы с замираниями сигналов в системах передачи информации, использующих алгоритм сверточного декодирования Витерби, приводит к существенному ухудшению качественных характеристик системы передачи информации.

2. При применении модифицированного метода сверточного декодирования Витерби в условиях перемежения символов характеристики помехоустойчивости приближаются к характеристикам для кода, работающего в канале без замираний сигналов. Выигрыш от применения метода составляет 0,5 – 4 дБ при работе в условиях замираний сигналов в зависимости от типа используемого сверточного кода.

3. В условиях воздействия сосредоточенных по спектру помех большого уровня происходит резкое ухудшение корректирующей способности сверточных кодов.

4. Предложен и исследован алгоритм предварительного снижения уровня узкополосной помехи. Результаты моделирования показали, что применение данного алгоритма позволяет достичь уровня помехи, при котором алгоритм сверточного декодирования Витерби вновь становится работоспособным.

5. Для работы в условиях большого уровня узкополосной помехи предложен и проанализирован комплексный алгоритм сверточного декодирования Витерби. При достаточной простоте реализации алгоритм обеспечивает подавление помехи до значения ниже порогового.

6. Доказана эффективность применения модифицированных алгоритмов сверточного декодирования при замираниях сигналов для частотного и пространственного разнесения. Организация адаптации не требует введения дополнительных сложных устройств в схемы передатчиков, а лишь организации использования каналов разнесения. Выигрыш в помехоустойчивости составляет от 2,5 дБ до 6 дБ при замираниях сигналов в зависимости от типа используемого кода.

7. Предложен и исследован алгоритм фазового управления передачей разнесенных сигналов, который решает задачу регулировки мощности высокочастотных сигналов на выходах передатчиков.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

### Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Синицин, Д.В. Матричный алгоритм оценки параметров канала при межсимвольной интерференции / П.А. Полушин, Е.В. Ульянова, Д.В. Синицин // Проектирование и технология электронных средств. – 2010. – № 4. – С. 35–38.

2. Синицин, Д.В. Метрика при сверточной обработке сигналов / О.Р. Никитин, П.А. Полушин, Д.В. Синицин, Е.В. Ульянова // Фундаментальные исследования. – 2012. - № 11, ч.2. – С. 450 - 453.

3. Синицин, Д.В. Управление приемом и передачей сигналов в двусторонних системах с многократным пространственным разнесением / О.Р. Никитин, П.А. Полушин, Д.В. Синицин, В.А. Матюха // Вестник Нижегородского университета им. Н.И.Лобачевского. – 2012. - № 5, ч.1. – С. 65 - 70.

4. Синицин, Д.В. Воздействие сосредоточенных помех на системы передачи сигналов со сверточным кодированием / П.А. Полушин, Д.В. Сиинин, И.Джулани, Ж.Л. Гомес // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. - № 3(15). – С. 69 – 73.

#### **Публикации в остальных изданиях:**

5. Синицин, Д.В. Сравнительные характеристики оптимального и квази-оптимального управления передачей разнесенных сигналов / П.А. Полушин, В.А. Пятов, Д.В. Синицин // Перспективные технологии в средствах передачи информации: материалы 9-й МНТК. – Владимир, 2011. – С. 199–202.

6. Синицин, Д.В. Сравнительные характеристики оптимального и квази-оптимального управления передачей разнесенных сигналов / Д.В. Синицин // Материалы XV ВНК студентов - радиофизиков. – СПб., 2011. – С. 112 - 113.

7. Синицин, Д.В. Модификация алгоритма сверточного декодирования Витерби в условиях замираний сигналов / Д.В. Синицин // Наука. Технологии. Инновации: материалы ВНК молодых ученых. – Новосибирск, 2013. – С. 232 – 234.

8. Синицин, Д.В. Адаптация алгоритма сверточного кодирования при замираниях сигналов / П.А. Полушин, Д.В. Синицин, Д.А. Мартышевская // Перспективные технологии в средствах передачи информации: материалы X МНТК. – Владимир, 2013. – С. 134–136.

9. Sinitsin, D.V. Using of Joint Management of Transmission and Receiving of Signals by Parallel Channels / P.A. Polushin, D.V. Sinitsin // Indian Science Cruiser. – 2013. - vol. 27, № 4. - P. 52 – 54.

10. Синицин, Д.В. Влияние узкополосной помехи на характеристики цифровых сигналов с кодированием / П.А. Полушин, Д.В. Синицин, Д.А. Мартышевская // Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии (ФРЭМЭ 2014): материалы XI МНК. - Владимир, 2014. – книга 2. - С. 121 – 123.

11. Синицин, Д.В. Влияние сосредоточенных помех на системы передачи информации со сверточным кодированием / Д.В. Синицин // Материалы XX Всероссийской научной конференции студентов – физиков и молодых ученых. - Ижевск, 2014. - С. 462 – 463.

#### **Патенты и свидетельства о государственной регистрации:**

12. Способ декодирования сверточных кодов: патент на изобретение 2516624 Рос. Федерация: МПК H03M 13/23 / Полушин П.А., Синицин Д.В., Смирнов Е.А.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Владимирский государственный университет. - № 2012153302/08; заявл. 10.12.2012; опубл. 20.05.2014, Бюл. №14.

13. Двухсторонняя адаптивная линия передачи разнесенных сигналов: патент на полезную модель 127563 Рос. Федерация: МПК H04B 7/04 / Полушин П.А., Матюха В.А., Леммле Д.В., Сеницин Д.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Владимирский государственный университет. - № 2012118156/07; заявл. 03.05.2012; опубл. 27.04.2014; Бюл. №12.
14. Программа визуализации алгоритма обработки сигналов при межсимвольной интерференции: свид. 2012613183 Рос. Федерация / Полушин П.А., Матюха В.А., Ульянова Е.В., Сеницин Д.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО Владимирский государственный университет. - № 2012610983; заявл. 14.02.2012.
15. Программа определения помехоустойчивости модифицированного сверточного алгоритма обработки сигналов, прошедших канал с межсимвольной интерференцией: свид. 2012615427 Рос. Федерация / Полушин П.А., Матюха В.А., Ульянова Е.В., Сеницин Д.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО Владимирский государственный университет. - № 2012610984; заявл. 14.02.2012.
16. Программа исследования методов управления передачей разнесенных сигналов: свид. 2012614440 Рос. Федерация / Полушин П.А., Сеницин Д.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО Владимирский государственный университет. - № 2012612187; заявл. 27.03.2012.
17. Программа расчета достоверности передачи цифровых сигналов по каналам с рассеянием по времени при использовании модифицированного сверточного алгоритма: свид. 2012614439 Рос. Федерация / Полушин П.А., Матюха В.А., Ульянова Е.В., Сеницин Д.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО Владимирский государственный университет. - № 2012612188; заявл. 27.03.2012.
18. Программный комплекс для исследования параметров межсимвольной интерференции при передаче цифровых сигналов: свид. 2013611946 Рос. Федерация / Полушин П.А., Смирнов Е.А., Ульянова Е.В., Сеницин Д.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО Владимирский государственный университет. - № 2012619648; заявл. 08.11.2012.
19. Программа исследования модифицированного алгоритма сверточного декодирования Витерби в условиях замираний сигналов: свид. 2013661608 Рос. Федерация / Полушин П.А., Сеницин Д.В.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВПО Владимирский государственный университет. - № 2013619559; заявл. 22.10.2013.
20. Устройство подавления узкополосных помех: патент на полезную модель 147102 Рос. Федерация: МПК H04B 1/10 / Полушин П.А., Сеницин Д.В., Джулани И. - № 2014123973/07; заявл. 10.06.2014; опубл. 27.10.2014; Бюл. № 30.

Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.  
Подписано в печать 2.12.2014. Заказ  
Издательство  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.