Зайцев Андрей Анатольевич. Синтез и анализ алгоритмов обработки сверхширокополосных сигналов, прошедших многолучевой канал распространения : диссертация ... кандидата физико-математических наук : 01.04.03 / Зайцев Андрей Анатольевич; [Место защиты: Воронеж. гос. ун-т].- Воронеж, 2009.- 162 с.: ил. РГБ ОД, 61 09-1/1108

**ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

На правах рукописи

**04200960274**

C:\Users\Pavel\AppData\Local\Temp\Rar$DIa0.094\media\image1.jpeg

Зайцев Андрей Анатольевич

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИГНАЛОВ, ПРОШЕДШИХ МНОГОЛУЧЕВОЙ КАНАЛ РАСПРОСТРАНЕНИЯ**

Специальность 01.04.03 - «Радиофизика»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико - математических наук

Научный руководитель: доктор физико - математических наук

Радченко Ю.С.

Воронеж - 2009

Введение *2*

1. [Технологии и архитектура беспроводных сетей 10](#bookmark1)
   1. [Архитектура беспроводных систем 10](#bookmark2)
   2. [Существующие сверхширокополоспые технологии связи 11](#bookmark3)
   3. Совместимость СШП систем с традиционными радиотехническими системами 15
2. [Модели СШП сигналов и каналов 19](#bookmark4)
   1. [Модели кодированных сигналов для СШП связи 19](#bookmark5)
   2. [Кодовые законы модуляции 21](#bookmark7)
   3. [Обобщенная функция неопределенности импульсной последовательности 25](#bookmark10)
   4. [Спектрально-корреляционные свойства кодированных сигналов 26](#bookmark12)
   5. Модели капала связи. Классификация каналов 30
3. [Алгоритмы многоальтернативного обнаружения сигналов 41](#bookmark23)
   1. [Модуляция и множественный доступ в СШП системах 41](#bookmark22)
   2. Общие положения мног^альтернативного обнаружения сигналов как задачи проверки гипотез 44
   3. [Субоптимальная обработка сигналов в неизвестных каналах 52](#bookmark33)
   4. [Оптимальная обработка сигналов с известной многолучевостью 55](#bookmark37)
   5. [Оптимальная обработка сигналов с неизвестной многолучевостью 59](#bookmark40)
   6. [Обработка сигналов на выходе каналов с неопределенной структурой 61](#bookmark43)
   7. [Обработка сигналов в канале с «плотной» многолучевостью 63](#bookmark48)
4. [Характеристики многоальтернативного обнаружения сигналов 69](#bookmark21)
   1. Многоальтернативное обнаружение-различение ортогональных сигналов 69
   2. Вероятности ошибок асинхронного субоптимального обнаружения- различения М сигналов с неизвестной многолучевостью (однолучевой

приемник) 73

* 1. Вероятности ошибок асинхронного оптимального обнаружения-различения

М сигналов с кластерной многолучевостью (Rake-прием) 80

* 1. Вероятности ошибок асинхронного оптимального обнаружения-различения

М сигналов с неизвестной многолучевостью (Rake-прием) 84

* 1. Вероятности ошибок асинхронного субоптимального обнаружения- различения М сигналов в канале с неопределенной структурой (модель

потока Бернулли) 88

* 1. Вероятности ошибок асинхронного оптимального обнаружения-различения М кластерных сигналов в канале с «плотной» многолучевостью (Rake-

прием) 94

* 1. Вероятности ошибок асинхронного субоптимального обнаружения-

различения М кластерных сигналов в канале с «плотной» многолучевостью 98

* 1. [Сравнительный анализ алгоритмов обработки многолучевых сигналов 102](#bookmark87)

Заключение 131

[Библиографический список использованных источников 134](#bookmark89)

Приложения 144

1. [Идентификация СШП канала 144](#bookmark90)
   1. [Алгоритмы разрешения сигналов и оценки числа лучей 144](#bookmark91)
   2. [Характеристики идентификации канала связи 148](#bookmark98)
2. [Оценка скорости передачи информации по СШП многолучевому каналу 155](#bookmark105)
3. [Излучение и прием СШП сигналов 158](#bookmark107)
4. [Статистическое моделирование обнаружения-различения 160](#bookmark108)

**Актуальность работы.** Для современных телекоммуникационных систем весьма актуальным является повышение емкости системы, скорости передачи мультимедийной информации. Бурное развитие беспроводных персональных сетей передачи данных привело к потребности беспроводного доступа в теле­коммуникационную сеть большого числа пользователей на ограниченной тер­ритории. Появившиеся компактные мобильные устройства, часто подключае­мые как друг к другу, так и к стационарным компьютерам выдвинули новые требования к устройствам соединения. Методы, при помощи которых решают­ся указанные проблемы, имеют ограничения в виде стандартов на радиоканалы, электромагнитную совместимость.

Одним из новых направлений повышения эффективности информацион­ных систем является применение импульсных сверхширокополосных (СШП) сигналов без несущей. Сверхширокополосньте сигналы без несущей, обладая высоким временным разрешением, применяются в локации, пригодны для ра­диосвязи вне выделенного диапазона и создания беспроводных персональных сетей большой емкости. В системе связи, использующей подобные сигналы, все пользователи работают в общей спектральной полосе, что диктует использова­ние кодового метода разделения абонентов. В таком случае они представляют собой последовательности сверхкоротких импульсов, модулированные вы­бранными кодовыми последовательностями.

Работа любой системы связи с множественным доступом начинается с поиска абонента (установления факта его работы) и его идентификации. Что и приводит к задаче совместного обнаружения-различения сигналов от многих пользователей. В отличие от традиционной радиосвязи, где большую роль иг­рают замирания, в данном случае основной проблемой, возникающей при приеме СШП сигналов, является многолучевой характер распространения от передатчика к приемнику. Реальные экспериментальные исследования СШП сигнала внутри здания показали, что он обладает сложной многолучевой струк-

турой, образованной'кластерами лучей с неизвестными параметрами, как то: неизвестным временем прихода кластеров, как целого, неизвестными времен­ными задержками лучей в кластере и кластеров друг относительно друга, а также неизвестными амплитудами: Однако высокая временная разрешающая способность таких сигналов делает актуальной «задачу синтеза и анализа алго­ритмов обработки: сигнала, обусловленного разделяющейся многолучевостью. Практическая: реализация таких алгоритмов в СШП диапазоне предъявляет весьма жесткие требования-к быстродействию системы, поэтому также пред­ставляет интерес определение эффективности обработки сигналов в системах без компенсации многолучевости.

**Цель работы.** Целью работы является синтез и анализ алгоритмов обра­ботки СШП сигналов, используемых в многопользовательских сетях передачи данных, прошедших многолучевой канал распространения. Для: реализации этой цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Развитие феноменологической модели: многолучевого канала распростране­ния, учитывающей, как физические характеристики канала, так и его вероят­ностные характеристики. Классификация каналов по данным признакам для формализации моделей СШП сигналов на входе приемной системы.
2. Исследование кодовых законов, модулирующих позиции и амплитуды им­пульсов в СШП последовательности с целью создания ансамбля сигналов с «хорошими» авто- и взаимокорреляционными свойствами, пригодными для высокоскоростной передачи информации в многопользовательских систе­мах. ,
3. Синтез асимптотически оптимальных и суббптимальных алгоритмов много­альтернативного обнаружения кодированных СШП сигналов на выходе ка­налов с комбинированной многолучевостью: когда каждый кластер, образо­ван разрешаемой («разреженной») и неразрешаемой («плотной») многолуче­востью.
4. Разработка методики анализа характеристик многоальтернативного обнару­жения кодированных СШП сигналов с неизвестным временем прихода на выходе каналов с различной априорной неопределенностью относительно свойств каналов на основе теории выбросов гауссовских и негауссовских случайных процессов.
5. Исследование характеристик СШП приемников многолучевых сигналов с различной априорной неопределенностью в зависимости от параметров мно­голучевости, числа сигналов, отношения сигнал/шум и разработка рекомен­даций по выбору алгоритма обработки исходя из компромисса эффективно­сти и сложности.
6. Установление методами статистического моделирования границ примени­мости асимптотически точных расчетных соотношений.

**Методы проведения исследований.** При решении поставленных задач в диссертации используются методы статистической радиофизики, математиче­ского анализа, теории вероятностей, математической статистики и случайных процессов, теории статистических решений. Для экспериментального исследо­вания характеристик алгоритмов обработки сигналов на фоне помех применя­лись методы статистического моделирования, современные численные методы. При разработке пакета прикладных программ активно использовались методы объектно-ориентированного программирования на языке C++, а также проце­дурное программирование в пакете Mathcad.

**Научная новизна работы.** В данной работе получены следующие новые научные результаты:

1. Предложена модель многолучевого канала, описывающая распространение сигнала внутри помещений и учитывающая как физические причины воз­никновения многолучевости, так и вероятностные характеристики канала. Данная модель обобщает существующие модели, а также позволяет класси­фицировать их по физическим и априорно-статистическим характеристикам.
2. Исследована применимость ряда кодовых законов для модуляции СШП им­пульсной последовательности по амплитудам и позициям элементарных им­пульсов с целью увеличения ансамбля квазиортогональных сигналов.
3. Разработаны асимптотически оптимальные и субоптимальные алгоритмы многоальтернативного обнаружения множества сигналов с неизвестным временным положением на выходе каналов различного типа.
4. Получены распределения абсолютного максимума гауссовского или негаус­совского процесса на выходе приемной системы с учетом многопиковой структуры сигнальной функции, априорно-вероятностных характеристик ка­нала распространения. На их основе найдены вероятности правильных и ошибочных решений при многоальтернативном обнаружении сигналов, точ­ность которых возрастает с ростом отношения сигнал/шум и величины ап­риорного интервала возможного времени прихода сигнала.
5. Проведен анализ характеристик оптимальных и субоптимальных приемных систем, обрабатывающих сигналы на выходе каналов с комбинированной кластерной многолучевостью («разреженной» и «плотной») с учетом апри­орной информации о числе лучей, их относительных амплитуд, расположе­нии лучей, затухании в канале связи, а также влиянии\* числа сигналов от пользователей, отношении сигнал/шум.
6. Получены количественные результаты, которые позволяют провести доста­точно полный сравнительный анализ различных вариантов построения СШП приемных систем, обрабатывающих широкий класс многолучевых сигналов на выходе каналов с различными физическими и вероятностными характе­ристиками.
7. Методами статистического моделирования установлены границы примени­мости асимптотически точных расчетных формул, а также предположений, лежащих в основе методики расчета характеристик приемной системы.

**Основные положения и1 результаты, выносимые на защиту.** На защиту

выносятся следующие результаты, впервые полученные в данной работе:

1. Модель многолучевого канала распространения, учитывающая как его фи­зические, так и вероятностные характеристики. Модели СШП сигналов на выходе многолучевых каналов с различной априорной информацией о ха­рактеристиках канала.
2. Результаты исследования корреляционных свойств СШП- последовательно­стей, модулированных по амплитуде и позиции импульсов различными ко­довыми законами..
3. Асимптотически; оптимальные и субоптимальные алгоритмы совместного обнаружения-различения- сигналов на выходе многолучевых каналов; раз- личноготипа. Структура сигнальных функций на выходе оптимальных и су- боптимальных приемных устройств;
4. Методика анализа характеристик, многоальтернативного обнаружения коди­рованных СШП сигналов.на основе теории выбросов гауссовских и негаус­совских процессов, описывающих выходную статистику приемников;
5. Результаты исследования характеристик оптимальных. и субоптимальных приемников СШП сигналов на выходе многолучевых каналов- различного типа, выявление закономерностей их поведения; при;различном;числе сигна- лов\* наличии «разреженной» и «плотной» многолучевости с различной ап­риорной информацией^ свойствах канала, отношении сигнал/шум.
6. Сравнительный анализ различных алгоритмов многоальтернативного обна­ружения' СШП сигналов на выходе каналов; с комбинированной; многолуче­востью при различных априорных сведениях о характеристиках каналов, ре­комендации-, по\* выбору алгоритмов на основе компромисса\* между эффек­тивностью и сложностью.
7. Результаты статистического моделирования позволяющие оценить границы применимости асимптотически точных расчетных характеристик приема.

**Практическая ценность.** На основе разработанных оптимальных и субоп­тимальных, алгоритмов, можно строить приемные устройства для обработки сигналов; прошедших через различные многолучевые каналы распространения.

Полученные выражения, для характеристик указанных алгоритмов позво­ляют количественно определить, при каких параметрах в условиях многолуче­вого распространения (отношение сигнал/шум в; основном луче, число исполь­зуемых сигналов) телекоммуникационная система, использующая сверхширо- кополосные сигналы, будет функционировать с заданными ошибками.

Сравнение эффективности оптимальных и субоптимальных алгоритмов при учете сложности их реализации позволяет оценить целесообразность по­строения и использования более сложного оптимального приемного устройства вместо более простого, но менее эффективного субоптимального приемного устройства.

**Достоверность.** Достоверность результатов, полученных в диссертацион­ной работе, подтверждается корректностью использования математического аппарата, совпадением новых результатов с известными в частных и предель­ных случаях, результатами статистического моделирования.

**Апробация работы.** Результаты исследований, приведенные в данной дис­сертации, были представлены в виде докладов и обсуждались на:

VIII, IX и X Международных конференциях «Цифровая обработка сигналов и ее применения - DSPA», Москва, 2006, 2007, 2008 г.,

XI, XII и XIII Международных научно-технических конференциях «Радио­локация, навигация и связь», Воронеж, 2005, 2006, 2007.

**Публикации.** По теме исследования опубликовано 10 печатных работ, из них 3 - в печати, рекомендованной ВАК к защите диссертации.

**Структура и объем работы.** Диссертациониая работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения и списка литературы.

В первой главе работы рассмотрена архитектура беспроводных систем пе­редачи данных. Приведено определение сверхширокополосных сигналов, дан обзор существующих стандартов сверхширокополосной связи. Рассмотрена электромагнитная совместимость СШП систем на основе стандартов, принятых в Российской федерации, Европе и США, устанавливающих ограничения на уровни излучений радиотехнических систем.

Во второй главе представлена модель составного СШП сигнала. Приве­дено определение амплитудно-кодовой и внутриблочной позиционно­импульсной модуляции. Рассмотрены различные кодовые последовательности для модуляции составных СШП сигналов, такие как модифицированные (дво­ичные) кодовые последовательности Баркера, кодовые последовательности со

свойством не более одного совпадения, М-последовательности, псевдослучай­ные последовательности GMW, троичные кодовые последовательности. Полу­чены автокорреляционные функции и обобщенные функции неопределенности составных сверхширокополосных сигналов, проведен их анализ, который по­зволяет установить пригодность рассмотренных кодовых последовательностей для модуляции СШП сигналов. Кроме того, рассмотрены физические причины возникновения многолучевой структуры СШП сигнала при распространении внутри помещений. На основе модели, используемой в зарубежной литературе [57, 61, 65, 77] получена обобщенная модель многолучевого канала распростра­нения. С помощью данной модели приведена классификация многолучевых ка­налов распространения сигнала.

Третья глава посвящена алгоритмам многоальтернативного обнаружения сигналов для различных каналов распространения. Рассмотрены асимптотиче­ски оптимальный алгоритм приема многолучевых сигналов с энергетическим сложением лучей, а также предложен субоптимальный алгоритм приема без компенсации многолучевости. Получены выражения для выходных статистки приемных устройств для различных каналов распространения. Представленные алгоритмы были получены как для случая известного, так и неизвестного зату­хания в канале распространения.

В четвертой главе приведено исследование характеристик алгоритмов оп­тимального и субоптимального приема. Получены формулы для средней веро­ятности ошибки совместного обнаружения-различения сигналов от многих пользователей, средней вероятности пропуска сигнала и вероятности ложной тревоги. Характеристики получены на основе теории выбросов гауссовских и негауссовских случайных процессов, являются асимптотически точными с уве­личением отношения сигнал/шум и величины априорного интервала возможно­го времени прихода сигнала, достаточно просты для расчетов. В заключитель­ной части главы представлен сравнительный анализ разработанных алгоритмов приема многолучевых сигналов. Установлено, что при увеличении числа раз­личаемых сигналов характеристики алгоритмов «насыщаются». Показано, что наилучшими характеристиками обладает оптимальный прием кластерных сиг­налов с известными амплитудами. Алгоритм с неизвестными амплитудами дает несколько худшие результаты, но в большинстве случаев выигрывает у еубоп- тимального приема многолучевого сигнала. Поведение характеристик приема групповых сигналов на выходе канала с плотной многолучевостью отражают случай приема сигнала, состоящего из одного кластера лучей, однако подме­ченные особенности имеют более выраженный характер.

В приложении рассмотрены некоторые вопросы идентификации каналов распространения. Разработан итерационный алгоритм определения числа до­полнительных лучей распространения сигнала. Получены выражения для веро­ятности ошибки определения числа дополнительных лучей, а также проведен расчет вероятности ошибки определения в зависимости от отношения сиг­нал/шум в основном луче, проведено статистическое моделирование указанно­го алгоритма. Рассмотрена потенциальная точность оценки времени запаздыва­ния кодированного СШП сигнала как для случая известного, так и неизвестного затухания в канале распространения. В заключение приведена оценка скорости передачи данных по многолучевому каналу и теоретические сведения об излу­чении СШП сигналов.

В результате исследований получены следующие результаты:

1. Развита существующая модель многолучевого СШП канала, учитывающая вероятностное наличие лучей в сигнале, априорную неопределенность отно­сительно затухания лучей и их расположения, группировку лучей в «плот­ные» и «разреженные» кластеры, различные априориые данные о структуре клас теров и их затухании.
2. Проанализированы как классические, так и новые виды кодовых законов, модулирующих амплитуду и позиции импульсов СШП последовательно­стей. Даны рекомендации по выбору сигналов для многопользовательских систем, основанные на анализе обобщенной функции неопределенности СШП сигнала с амплитудно-кодовой и внутриблочной позиционно­импульсной модуляцией.
3. Разработаны асимптотически оптимальные и субоптимальные алгоритмы совместного обнаружения-различения сигналов с неизвестным временным положением от многих пользователей на выходе многолучевых каналов раз­личного типа. Субоптимальные алгоритмы рассчитаны на обработку одного «плотного» кластера или одного луча в разреженном кластере, не использу­ют априорной информации о структуре канала «в целом», существенно проще в реализации, но менее эффективны, чем оптимальные.
4. Рассчитаны сигнальные функции на выходе оптимальных и субоптимальных приемников при «разреженной» и «плотной» кластерной структуре сигнала

и различных априорных сведениях о затухании лучей, их взаимном распо­ложении.

1. Получены асимптотически точные распределения выходных статистик при­емников на основе теории выбросов гауссовских и негауссовских случайных процессов, применительно к различным моделям каналов. На основе этих распределений найдены асимптотически точные с ростом отношения сиг­нал/шум и априорного интервала возможных временных положений сигна­лов выражения для средней вероятности ошибки, средней вероятности про­пуска множества сигналов, вероятности ложной тревоги для оптимального и субоптимального приема. Исследованы закономерности поведения характе­ристик алгоритмов при вариации различных параметров: числа и амплитуд лучей, числа различаемых сигналов, отношения сигнал/шум. Определены границы применимости асимптотически точных расчетных формул путем статистического моделирования оптимальных и субоптимальных алгорит­мов многоальтернативного обнаружения.
2. Для' канала с неизвестной многолучевостью предложена новая методика расчета плотности вероятности и функции распределения абсолютного мак­симума выбросов негауссовской статистики на' выходе оптимального при­емника при помощи ряда Эджворта, подтвержденная, результатами стати­стического моделирования.
3. Установлены следующие закономерности в поведении характеристик:

* При увеличении числа различаемых сигналов вероятности ошибочных решений приемников многолучевых сигналов замедляют свое измене­ние, т. е. характеристики «насыщаются».
* Ухудшение характеристик приема из-за неизвестного затухания кла­стеров и распределения энергии лучей в кластере составляет до двух порядков.
* Оптимальный алгоритм приема сигналов с неизвестными амплитудами в большинстве случаев выигрывает у субоптимальных алгоритмов об­работки многолучевых сигналов, даже при известных амплитудах.
* Поведение характеристик при приеме группы кластеров с «плотной» многолучевостью соответствует поведению аналогичных характери­стик приемника «разреженного» кластера, однако имеют более выра­женный характер.
* Потери в эффективности приемника при субоптимальной обработке одного самого мощного луча по сравнению с оптимальной обработкой одного кластера или группы кластеров составляют от одного до пяти порядков. Это может позволить ответить на вопрос о целесообразности идентификации канала связи по пилотному сигналу и усложнения при­емной системы в конкретных разработках.

1. Рассмотрены некоторые вопросы идентификации многолучевого СШП ка­нала связи, в частности, оценки числа лучей и оценки их положения, а также влияние многолучевости на скорость передачи информации по СШП каналу связи.

Основные результаты диссертационной работы имеют достаточно общий характер и могут быть использованы в задачах синтеза и анализа алгоритмов обработки ансамбля многолучевых сверхширокополосных сигналов в условиях априорной неопределенности.

**Библиографический список использованных источников**

1. Астанин Л.Ю. Основы сверхширокополосных радиолокационных изме­рений / Л.Ю. Астанин, А.А. Костылев - М.: Радио и связь, 1989. - 192 с.
2. Астанин Л.Ю. Сложные сверхширокополосные импульсные радиолока­ционные сигналы и возможности их формирования / Л.Ю. Астанин, А.А. Флерова // Известия высш. учеб. заведений. Радиоэлектроника. - 2003. - №4. -С. 11-20.
3. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. — М.: Лаб. базовых знаний, 2000. — 624 с.
4. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике / В.В. Быков. - М. : Сов. радио, 1971. - 328 с.
5. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. / Л.Е. Вара­кин-М.: Радио и связь, 1985. -384 с.
6. Витерби Э.Д. Принципы когерентной связи. / Э.Д. Витерби Пер. с англ. Б.А. Смиренина. Под ред. Б.Р. Левина. - М.: Сов. радио, 1970. -—392 с.
7. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский — М.: Радио и связь, 1971. — 672 с.
8. ГОСТ Р 51319-99. Совместимость технических средств электромагнит­ная. Приборы для измерения индустриальных радиопомех. Технические требования и методы испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 2002.
9. ГОСТ Р 51318.11-99. Совместимость технических средств электромаг­нитная. Радиопомехи индустриальные от промышленных, научных, ме­дицинских и бытовых (ПНМБ) высокочастотных устройств. Нормы и ме­тоды испытаний. — М.: Изд-во стандартов, 2000.
10. ГОСТ Р 51318.2299. Совместимость технических средств электромаг­нитная. Радиопомехи индустриальные от оборудования информационных технологий. Нормы и методы испытаний. - М.: Изд-во стандартов, 2000.