

На правах рукописи

Лысяков Денис Николаевич

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ
СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ
С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ ИНФОРМАЦИИ
ПО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ПОДКАНАЛАМ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Флакман А.Г.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
профессор Есипенко В.И.
доктор технических наук
профессор Орлов И.Я.

Ведущая организация: Институт прикладной физики РАН

Защита состоится «28» апреля 2010г. в 15.00 на
заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском
государственном университете им. Н.И.Лобачевского по адресу:
Нижегород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан «25» марта 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации

В настоящее время происходит интенсивное развитие цифровых систем беспроводной связи, и одним из наиболее приоритетных направлений исследований в этой области является повышение эффективности такого рода систем, связанное в первую очередь с увеличением скорости передачи информации при сохранении высокого качества обслуживания абонентов (низкой вероятности ошибки при передаче информации). Основными препятствиями для достижения этой цели являются сложные условия многолучевого распространения сигналов в случайной рассеивающей среде, вызывающие глубокие замирания (фединги) сигналов.

Одним из путей повышения скорости передачи данных и увеличения количества обслуживаемых пользователей может являться расширение используемой полосы частот. Скорость передачи информации возрастает также при увеличении излучаемой мощности. Однако, указанные ресурсы имеют свои пределы, обусловленные ограниченностью, выделяемых стандартами полос радиочастотного диапазона, требованиями биологической защиты, а также возрастающими требованиями на продолжительность автономной работы портативных радиоустройств. Таким образом, задачи повышения эффективности беспроводных систем связи необходимо решать при жестких ограничениях на выделенные ресурсы, что особенно актуально при современном быстро развивающемся рынке мобильной связи и беспроводного Интернета.

Скорость передачи данных можно увеличить за счет использования разнесенного в пространстве приема (или передачи) сигналов с помощью нескольких антенн и применения специальной адаптивной обработки. Расстояние между антеннами выбирается таким, чтобы замирания сигналов в разных антеннах были слабо коррелированы друг с другом. Это позволяет увеличить эффективность системы за счет когерентного суммирования сигналов на приемном конце линии связи или за счет использования методов пространственной обработки (кодирования) на передающей стороне. Однако только разнесенный прием (или передача) не позволяет сформировать параллельные потоки информации, что существенно ограничивает их возможности в смысле повышения скорости передачи данных.

Наиболее перспективным подходом к решению задачи повышения эффективности современных систем радиосвязи при жестких ограничениях на частотные, мощностные и временные ресурсы является использование антенных решеток на обоих концах линии связи, то есть применение так называемых ММО (multiple-input multiple-output) систем, а также методов адаптивной пространственно-временной обработки сигналов. Анализ эффективности и синтезу такого типа методов пространственной обработки

сигналов в системах радиосвязи и посвящена настоящая диссертационная работа.

Актуальность выбранной темы подтверждается не только большим объемом публикаций в научно-технических изданиях, посвященных этому вопросу, но также активной работой проводимой в данном направлении в ведущих компаниях-производителях коммуникационного оборудования (Samsung, Motorola, Intel, Alcatel, Nokia, Siemens, Philips и др.).

MIMO-системы можно классифицировать по наличию или отсутствию обратной связи. К первому классу относятся системы без обратной связи, в которых адаптация к изменяющимся условиям распространения сигналов возможна только на приемнике. Ко второму классу относятся MIMO-системы с линией обратной связи, по которой приемник сообщает передатчику информацию о пространственном канале, что делает возможным реализацию также и адаптивной передачи. Оценивание характеристик канала делается, например, с помощью обучающих последовательностей, состоящих из пилотных сигналов.

Для описания свойств многолучевого пространственного канала используется понятие импульсной характеристики. Поскольку существует несколько путей распространения радиоволн от передатчика к приемнику, то результирующий сигнал представляет собой сумму случайного числа сигналов, ослабление и временная задержка каждого из которых изменяются во времени случайным образом. В результате интерференции некоторые частотные компоненты результирующего сигнала ослабляются, а некоторые усиливаются, что приводит к неравномерности частотной характеристики.

Современные широкополосные системы сотовой связи, например OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) системы, обычно функционируют в условиях частотно-селективного канала. Свойства такого канала описываются канальной матрицей, состоящей из парциальных (из каждой передающей в каждую приемную антенну) коэффициентов передачи, которые являются случайными комплексными величинами, зависящими от частоты. Следовательно, преобразования сигналов при их передаче и приеме также оказываются различными для разных частот. Однако, если полный диапазон частот разделить на поддиапазоны с шириной меньшей интервала частотной когерентности канала, то внутри каждого из них пространственный канал можно считать частотно-неселективным и реализовать единую адаптивную обработку сигналов. Поэтому достаточно рассмотреть частотно-неселективный канал связи.

Наибольший интерес представляет релеевский многолучевой канал, когда прямой луч между передатчиком и приемником практически отсутствует. В этом случае возникают глубокие замирания (фединги) сигнала, которые являются характерными для систем сотовой (мобильной) связи, работающих в городских условиях.

Адаптивная пространственная обработка сигналов при передаче и приеме в MIMO-системе может быть реализована с использованием сингулярного разложения канальной матрицы. Сформированные таким

образом параллельные подканалы для передачи данных называются собственными, так как используют в качестве весовых векторов пространственной обработки собственные векторы канальной матрицы. Каждый собственный подканал соответствует одному из собственных векторов и собственных чисел. Максимальное количество подканалов, которое можно сформировать, определяется статистическими свойствами среды распространения радиоволн и равно рангу канальной матрицы. В случае некоррелированного релейского канала вероятность вырождения канальной матрицы является ничтожно малой и ее ранг определяется минимальным числом передающих или приемных антенн.

Формирование параллельных информационных потоков в ММО-системе ведет к увеличению шенноновской пропускной способности (ПС), равной максимальному числу бит, которые можно безошибочно передать в единичной полосе частот в единицу времени. В частности, для релейского канала шенноновская ПС увеличивается пропорционально числу используемых антенн без повышения излучаемой мощности и расширения полосы частот. Кроме того, информация по каждому из собственных подканалов передается независимо, что дает возможность представить подобную многоканальную систему как совокупность одноканальных систем и, тем самым, значительно упростить процедуру оценивания переданных символов.

Несмотря на то, что шенноновская ПС ММО-системы с параллельной передачей данных по собственным подканалам исследовалась в достаточно большом числе работ, вероятность битовой ошибки в отдельных подканалах и во всей системе является неизвестной. Так как коэффициент усиления по мощности каждого подканала представляет собой соответствующее собственное число канальной матрицы, то для нахождения вероятности битовой ошибки необходимо сначала найти плотности вероятности собственных чисел. Эти функции для произвольной конфигурации ММО-системы (числа передающих и приемных антенн) также являются неизвестными.

Особенностью систем мобильной связи является различие в числе антенн используемых на базовой станции и у пользователя, так как на базовой станции можно разместить значительно больше антенн. При этом число собственных подканалов в ММО-системе определяется числом антенн у пользователя. Практический интерес представляет случай, когда пользователь имеет две антенны и, следовательно, можно сформировать только два собственных подканала.

Имея значительно большее число антенн, базовая станция обладает возможностью одновременного обслуживания многих пользователей за счет их пространственного разделения. Такой способ разделения пользователей может использоваться дополнительно к каждому из широко применяемых в настоящее время временному, частотному и кодовому методам и позволяет значительно увеличить ПС сети.

Проекционный метод пространственного разделения пользователей в ММО-системах не требует оценки направлений прихода сигналов и обеспечивает значительное увеличение шенноновской ПС в условиях некоррелированных релейских замираний сигналов. Однако такая важная характеристика системы как вероятность битовой ошибки при использовании данного метода в литературе не рассматривалась.

Шенноновская ПС является удобным параметром, так как не зависит от способа модуляции и помехоустойчивого кодирования, а определяется только статистическими свойствами замираний сигналов и мощностью передатчика. Однако для обеспечения высоких скоростей передачи данных близких к шенноновской ПС необходимо использовать модуляции, которые формируют сигналы близкие к гауссовским, что на практике не применяется. Более того, шенноновская ПС не учитывает, что в системах беспроводной связи необходима периодическая оценка пространственного канала. Для этого используются известные последовательности сигналов, которые не несут информации, но используют часть ресурса системы и, тем самым ведут к уменьшению ее производительности. Поэтому представляет интерес разработка такого критерия эффективности системы, который учитывал бы не только мощность передатчика (которая определяет вероятность ошибки передачи информации), но и выбранный тип модуляции и кодирования, а также необходимые затраты ресурса системы на оценивание пространственного канала.

Наибольшая скорость передачи данных в ММО-системе обеспечивается при использовании всех собственных подканалов. Однако при этом вероятность битовой ошибки может оказаться большой из-за влияния энергетически слабых подканалов. Допуская определенные потери в скорости, можно не использовать подканалы с низким отношением сигнал/шум (ОСШ) и, тем самым, уменьшить ошибку передачи данных. Известен метод, обеспечивающий компромисс между скоростью передачи информации и вероятностью битовой ошибки. Однако выбор оптимального числа собственных подканалов при его использовании не производился.

В настоящее время широко используются системы связи с кодовым разделением пользователей, для реализации которого применяется модуляция информационных символов ортогональными кодовыми последовательностями Уолша. Каждому пользователю назначается своя последовательность Уолша, которая представляет собой его адрес. Если на базовой станции и у каждого пользователя имеется только по одной антенне, то для оценки пространственного канала достаточно использовать одну (общую для всех пользователей) последовательность Уолша. При увеличении числа передающих антенн на базовой станции соответственно должно увеличиться число последовательностей Уолша, необходимых для оценки пространственного канала, что приводит к дополнительным затратам и к соответствующему уменьшению производительности системы. Если передающей стороной являются пользователи, то число последовательностей Уолша, необходимых для оценки пространственного

канала, определяется числом пользователей и становится другим. Поэтому представляет анализ производительности системы с кодовым и пространственным разделением пользователей.

Задачи работы

1. Анализ вероятности битовой ошибки в ММО-системе с двумя собственными подканалами при передаче информации одному пользователю в условиях многолучевого распространения сигналов.

2. Анализ вероятности битовой ошибки в ММО-системе с одновременной передачей данных нескольким пользователям на основе проекционного метода разделения пространственных информационных потоков.

3. Синтез метода адаптивной обработки сигналов в системах радиосвязи с параллельной передачей информации по пространственным подканалам, обеспечивающего максимальную эффективную пропускную способность системы.

Методы исследований

При решении поставленных задач использовались методы статистической радиофизики, теории информации, высшей алгебры, векторного анализа и теории матриц, а также математическое и имитационное компьютерное моделирование.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается как в постановке ряда не решенных ранее задач, так и в полученных оригинальных результатах:

1. Результаты исследования эффективности ММО-системы с двумя собственными подканалами в условиях некоррелированных релейских замираний сигналов аналитически определяют неизвестные до этого выражения для интегральных функций распределения и функций плотности вероятности собственных чисел канальной матрицы.

2. Результаты исследования эффективности ММО-системы с двумя собственными подканалами аналитически определяют неизвестные до этого выражения для вероятности битовой ошибки при передаче данных одному пользователю в условиях некоррелированных релейских замираний сигналов и при использовании сигналов бинарной и квадратурной фазовых модуляций, а также 16- и 64-ричной квадратурной амплитудной модуляции.

3. Результаты исследования эффективности ММО-системы с параллельной передачей информации нескольким пользователям на основе проекционного метода разделения пространственных информационных потоков аналитически определяют неизвестные до этого выражения для вероятности битовой ошибки при произвольном числе передающих антенн

на базовой станции и приемных антенн у пользователей и некоррелированных релейских замираний сигналов.

4. Предложен оригинальный критерий производительности систем беспроводной связи – эффективная пропускная способность, который учитывает вероятность битовой или пакетной ошибки, выбранную модуляцию, скорость помехоустойчивого кодирования, число пространственно разделяемых пользователей, а также потери в скорости передачи данных, обусловленные необходимостью оценки пространственного канала всех пользователей.

5. Предложен новый пороговый метод увеличения эффективной пропускной способности ММО-системы с параллельной передачей информации по собственным подканалам, который основан на использовании только подканалов с большим ОСШ. Проведено исследование эффективной пропускной способности при использовании этого метода в условиях некоррелированных релейских замираний сигналов.

Практическая значимость результатов

Представленные в диссертации результаты анализа и синтеза адаптивной обработки сигналов в системах радиосвязи с параллельной передачей информации по пространственным подканалам могут быть использованы при проектировании перспективных высокоскоростных цифровых систем мобильной связи и беспроводного Интернета нового поколения.

Обоснованность и достоверность

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается их сравнением с результатами, полученными с помощью математического моделирования, с опубликованными результатами для частных случаев, а также отсутствием противоречий результатов диссертации известным положениям теории статистической радиофизики и теории информации.

Положения, выносимые на защиту

1. Интегральные функции распределения и функции плотности вероятности собственных чисел канальной матрицы в ММО-системе с двумя собственными подканалами при некоррелированных релейских замираний сигналов могут быть вычислены с помощью полученных аналитических выражений.

2. Вероятность битовой ошибки в ММО-системе с двумя собственными подканалами при передаче информации одному пользователю в условиях некоррелированных релейских замираний сигналов и при использовании бинарной или квадратурной фазовой модуляции, а также 16-

или 64-ричной квадратурной амплитудной модуляции, может быть найдена на основе полученных аналитических выражений.

3. Вероятность битовой ошибки в ММО-системе с пространственным разделением произвольного числа пользователей в условиях некоррелированных релеевских замираний сигналов, при произвольном числе передающих антенн на базовой станции и приемных антенн у пользователей может быть определена с помощью полученных аналитических выражений.

4. Пороговый метод обеспечения максимальной эффективной пропускной способности ММО-системы с параллельной передачей информации по собственным подканалам, основанный на использовании только подканалов с большим ОСШ.

5. Эффективную пропускную способность ММО-системы с пороговым методом передачи информации по собственным подканалам в условиях некоррелированных релеевских замираний сигналов можно найти на основе полученных аналитических выражений.

Апробация результатов и публикации

Основные материалы диссертации опубликованы в 10 работах. Среди них 3 статьи в рецензируемых журналах («Известия вузов. Радиофизика» [1], «Вестник ННГУ. Серия Радиофизика» [2], Актуальные проблемы статистической физики (Малаховский сборник) [3]) и 7 работ, представляющие собой опубликованные материалы докладов на научных конференциях [5-10].

Результаты диссертационной работы докладывались на 10-й научной конференции по радиофизике, (ННГУ, Нижний Новгород, 2006 г.), на 12-й и 14-й Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2007 г.), на 14-й межрегиональной научно-технической конференции «Обработка сигналов в системах телефонной связи и оповещения» (Нижний Новгород-Москва, 2006 г.), на 1-й международной конференции «Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития» (Харьков - Туапсе, ХНУРЕ, 2006 г.), на 11-й международной конференции и выставке "Цифровая обработка сигналов и ее применение" (Москва, 2009 г.), а также на семинаре кафедры бионики и статистической радиофизики ННГУ.

Работа выполнена при поддержке гранта Роснауки НШ-1729.2003.2 («Ведущие научные школы», 2003–2005 гг.) и государственного контракта № 02.740.11.0003 («Исследование и разработка систем беспроводной широкополосной связи»).

Личный вклад автора

Диссертант принимал непосредственное участие, как в постановке задач, так и в расчетах, построении аналитических моделей, обсуждении и физической интерпретации результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка сокращений. Общий объем диссертации составляет 126 страниц, включая 33 рисунка и список литературы из 103 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении освещается современное состояние проблемы повышения эффективности методов пространственной обработки сигналов в ММО-системах радиосвязи в условиях многолучевого распространения сигналов, обосновывается актуальность темы диссертации, кратко излагается содержание работы.

В первой главе рассмотрены основные принципы передачи данных в ММО-системе радиосвязи, использующей передающую и приемную антенные решетки и параллельную передачу данных по собственным подканалам. Исследована вероятность битовой ошибки в системе с двумя собственными подканалами в практически наиболее интересном случае некоррелированных релейских замираний сигналов.

В разделе 1.1 описываются общие принципы, на которых основана работа системы сотовой связи с разнесенной передачей и приемом сигналов при использовании неадаптивной и адаптивной пространственной обработки. Приводятся исходные выражения, описывающие адаптивную обработку сигналов в ММО-системе с параллельной передачей информации по собственным подканалам.

В разделе 1.2 исследуются статистические характеристики собственных чисел канальной матрицы в ММО-системе с конфигурациями $(M \times 2)$ и $(2 \times N)$ в условиях некоррелированных релейских замираний сигналов, где M – число передающих антенн на базовой станции (БС), N – число приемных антенн у пользователя.

Получены аналитические выражения (1)-(2) для функций плотности вероятности максимального (первого) и минимального (второго) собственных чисел канальной матрицы ММО-системы с произвольным числом передающих (или приемных) антенн и двумя приемными (или передающими) антеннами:

$$f_{\lambda_1}(\lambda) = \frac{\lambda^{M-2} e^{-\lambda}}{(M-1)!} \left[\lambda^2 - 2(M-1)\lambda + M(M-1) - \sum_{m=0}^{M-2} \frac{m(m-2M+1) + M(M-1)}{m!} \lambda^m \right], \quad (1)$$

$$f_{\lambda_2}(\lambda) = \frac{\lambda^{M-2} e^{-2\lambda}}{(M-1)!} \sum_{m=0}^{M-2} \frac{m(m-2M+1) + M(M-1)}{m!} \lambda^m \quad (2)$$

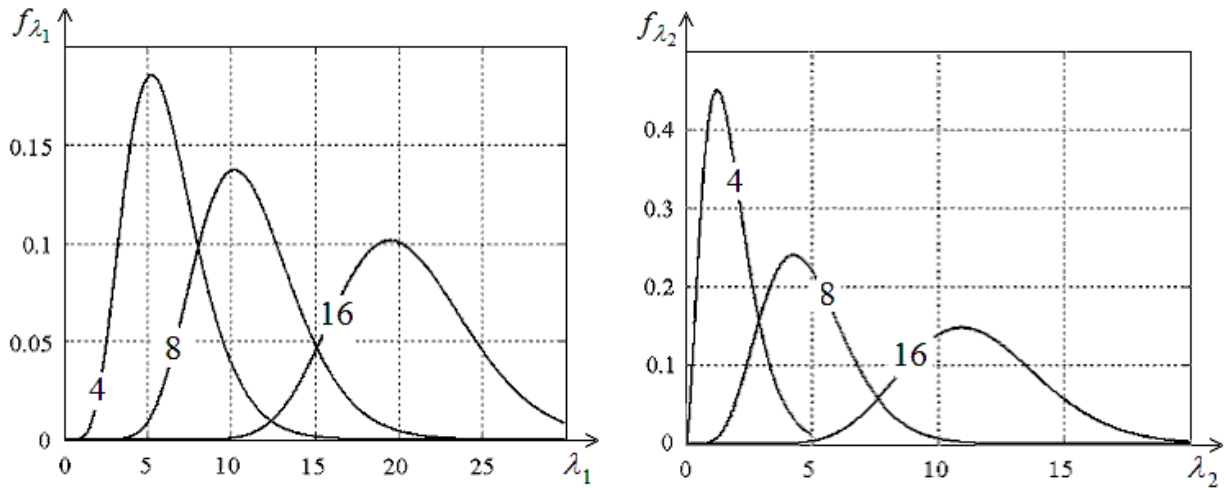


Рис. 1. Функции плотности вероятности первого (слева) и второго (справа) собственных чисел в ММО-системе с двумя приемными ($N=2$) и несколькими ($M=4,8,16$) передающими антеннами (цифра возле каждой кривой)

В разделе 1.3 исследовано поведение вероятности битовой ошибки (BER – Bit Error Rate) в ММО-системе в зависимости от ОСШ. Показано, что вероятность битовой ошибки полностью определяется статистическими свойствами собственных чисел канальной матрицы. Использовались выражения (3) для вероятности битовой ошибки BER_0 в статическом канале:

$$BER_0(\eta) = Q(\sqrt{\eta}), \quad Q(x) = 0.5 - \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt. \quad (3)$$

Получены точные выражения для вероятности битовой ошибки в сильном (4) и слабом (5) подканалах ММО-системы (рис.2) для сигналов квадратурной фазовой модуляции (QPSK – Quadrature Phase Shift Key). Также в диссертации найдены аналогичные выражения для вероятности битовой ошибки в случае использования сигналов бинарной (BPSK – Binary Phase Shift Key) фазовой модуляции и 16- и 64-ричной квадратурной амплитудной модуляции (QAM – Quadrature Amplitude Modulation):

$$BER_1^{QPSK}(\rho) = \frac{1}{2} - \sum_{k=0}^M \delta_k \left(\frac{\rho}{\rho+2} \right)^{k+1/2} + \sum_{m=0}^{M-2} \sum_{k=0}^{m+M-2} \chi_{mk} \left(\frac{\rho}{\rho+4} \right)^{k+1/2}, \quad (4)$$

$$BER_2^{QPSK}(\rho) = \frac{1}{2} - \sum_{m=0}^{M-2} \sum_{k=0}^{m+M-2} \chi_{mk} \left(\frac{\rho}{\rho+4} \right)^{k+1/2}, \quad (5)$$

где коэффициенты δ_k и χ_{mk} равны

$$\delta_k = \frac{\Gamma(M+3/2)}{\sqrt{\pi}M!} \frac{(-1)^k}{2k+1} C_M^k \frac{Mk^2 - 2(M-1/2)k + 2M(M-5/8)}{(M+1/2)(M-1/2)}, \quad (6)$$

$$\chi_{mk} = \frac{1}{\sqrt{\pi}(M-1)!} \frac{m(m-2M+1) + M(M-1)}{m!} \frac{\Gamma(m+M-1/2)}{2^{(m+M-1)}} \frac{(-1)^k}{2k+1} C_{m+M-2}^k \quad (7)$$

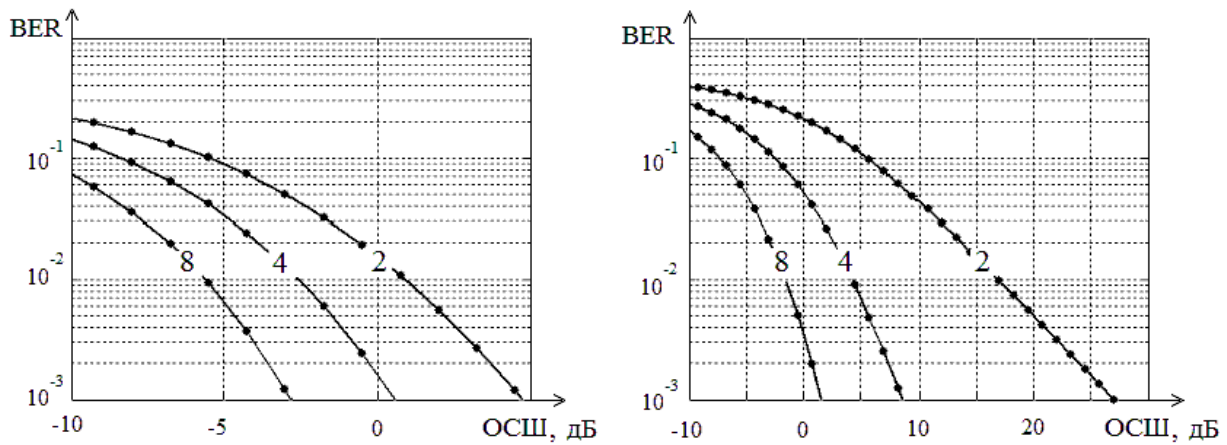


Рис. 2. Вероятность битовой ошибки для бинарной фазовой модуляции в сильном (слева) и слабом (справа) собственном подканале ММО-системы с разным числом передающих антенн (цифра возле каждой кривой) и двумя ($N=2$) приемными антеннами. Кривые соответствуют теоретическим формулам, кружочки – результатам моделирования

В разделе 1.4 рассмотрено асимптотическое поведение кривых для вероятности битовой ошибки в области больших ОСШ. Получены выражения (8)-(10) для асимптотик, когда число передающих антенн $M=2, 3$ или 4 для бинарной фазовой модуляции:

$$BER_1^{(2 \times 2)} \approx 0.27 \frac{1}{\rho^4}, \quad BER_2^{(2 \times 2)} \approx 0.5 \frac{1}{\rho}, \quad (8)$$

$$BER_1^{(3 \times 2)} \approx 0.56 \frac{1}{\rho^6}, \quad BER_2^{(3 \times 2)} \approx 0.56 \frac{1}{\rho^2}, \quad (9)$$

$$BER_1^{(4 \times 2)} \approx 1.38 \frac{1}{\rho^8}, \quad BER_2^{(4 \times 2)} \approx 0.62 \frac{1}{\rho^3}. \quad (10)$$

Показано, что в ММО-системе с произвольным числом передающих (или приемных) антенн и двумя приемными (или передающими) антеннами вероятность битовой ошибки обратно пропорциональна ОСШ в степени равной произведению MN числа антенн для сильного собственного подканала и $(|M-N|+1)$ для слабого.

Во второй главе рассматривается адаптивная обработка сигналов в ММО-системах с передачей информации по параллельным собственным подканалам произвольному числу пользователей. Показывается, что для одновременного обслуживания нескольких пользователей необходимо реализовывать дополнительную обработку сигналов на основе проекционного метода ортогонализации всех собственных подканалов всех пользователей. Исследуется эффективность данного метода.

В разделе 2.1 рассматривается процесс одновременной передачи данных нескольким пользователям в одной полосе частот. Показывается, что в случае отсутствия пространственного разделения пользователей неизбежно

возникают взаимные помехи, обусловленные неортогональностью собственных подканалов у разных пользователей. Описывается проекционный метод разделения пользователей и приводятся выражения, показывающие возможность исключения помеховых сигналов на выходе собственных подканалов всех пользователей, то есть обеспечения их полного пространственного разделения.

В разделе 2.2 исследуется эффективность ММО-систем с параллельной передачей информации по собственным подканалам и с пространственным разделением произвольного числа пользователей в случае некоррелированных релеевских замираний сигналов. Показано, что при пространственном разделении пользователей на основе проекционного метода возникают энергетические потери в ОСШ на выходе собственных подканалов, которые возрастают с ростом числа пользователей и приводят к увеличению вероятности битовой ошибки.

Получены точные выражения для функций плотности вероятности ОСШ ρ (11) и для вероятности битовой ошибки (12) при использовании сигналов QPSK модуляции в ММО-системе при использовании проекционного метода разделения пользователей в случае произвольного числа передающих антенн на БС и приемных антенн у Q пользователей:

$$f_{\rho}(\rho) = \frac{1}{\rho_0^{(M-QN+1)}(M-QN)!} \rho^{(M-QN)} \exp\left(-\frac{\rho}{\rho_0}\right), \quad (11)$$

$$BER(\rho) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho}{\rho+1}} \left[1 + \sum_{l=1}^{M-QN} \frac{(2l-1)!!}{(2l)!!} \frac{1}{(\rho+1)^l} \right], \quad (12)$$

где ρ_0 – среднее ОСШ на входе каждой антенны.

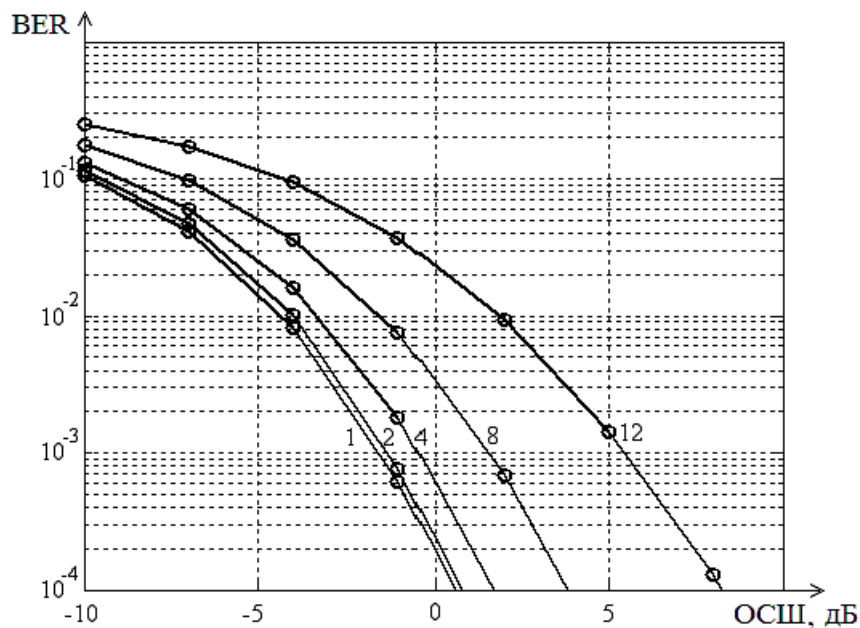


Рис 3 Вероятность битовой ошибки в ММО-системе для разного числа Q разделяемых пользователей (цифра возле каждой кривой) при $M=16$ передающих антеннах на БС и одной антенне ($N=1$) у каждого пользователя. Кривые соответствуют теоретическим формулам, а кружочки – результатам численного моделирования

Рассмотрено асимптотическое поведение кривых вероятности битовой ошибки в области больших ОСШ. Показано, что вероятность битовой ошибки обратно пропорциональна ОСШ в степени равной $M_{eff}=M-(QN-1)$ с коэффициентом пропорциональности не зависящим от мощности.

В третьей главе описывается критерий производительности систем беспроводной связи – эффективная пропускная способность, который учитывает основные параметры системы и определяется как среднее число правильно переданных информационных бит в единицу времени в единичном интервале частот. На основе этого критерия исследуется эффективность системы связи с кодовым и пространственным разделением пользователей. Предлагается пороговый метод совместной оптимизации скорости передачи данных и вероятности битовой ошибки в ММО-системе.

В разделе 3.1 предлагается и обосновывается новый критерий производительности беспроводных систем связи – эффективная пропускная способность, который учитывает вероятность ошибки, выбранный тип модуляции (битовую загрузку символа), скорость помехоустойчивого кодирования, число пространственно разделяемых пользователей, а также потери в ресурсе системы, обусловленные необходимостью оценки пространственного канала всех пользователей. Будем считать, что данные передаются блоками размером n бит в частотно-временной области. Каждый блок характеризуется следующими параметрами: N_s – общее число поднесущих; N_t – число символов; N_p – число пилотных поднесущих, L – уровень модуляции. Тогда эффективная пропускная способность будет равна

$$Th = (1 - BLER) \frac{L(N_s N_t - N_p)}{N_s N_t} R_c, \quad (13)$$

где R_c – скорость кодирования, $BLER$ – вероятность ошибки передачи информационного блока, которая представляет собой вероятность того, что число ошибочно переданных бит в блоке будет больше v бит:

$$BLER = 1 - \sum_{j=0}^v C_n^j BER^j (1 - BER)^{n-j}, \quad (14)$$

В разделе 3.2 описывается способ увеличения эффективной пропускной способности с помощью порогового метода, который заключается в разделении собственных чисел на две группы чисел, превышающих или не превышающих некоторый порог, который зависит как от мгновенного состояния канала, так и от среднего ОСШ. Эффективная пропускная способность ММО-системы в этом случае будет равна

$$Th = \sum_{i=1}^K \gamma_i Th_i = R_c L \sum_{i=1}^K \gamma_i \sum_{j=0}^v C_n^j BER_i^j (1 - BER_i)^{n-j}, \quad (15)$$

где γ_i – вероятность использования i -го подканала для передачи данных.

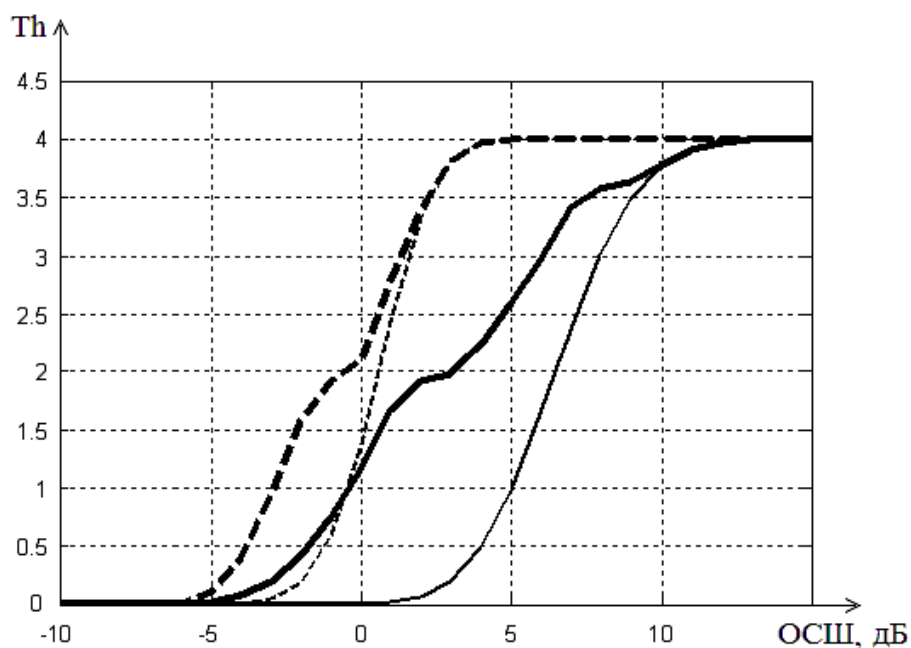


Рис. 4. Эффективная ПС в ММО-системе с конфигурациями (2×2) – сплошные кривые и (4×2) – пунктирные кривые в зависимости от ОСШ, полученная при использовании всех подканалов (тонкие кривые) и при помощи метода выбора оптимального числа собственных подканалов (толстые кривые)

Результаты, отображенные на рис. 4 показывают, что энергетический выигрыш за счет применения порогового метода больше для конфигурации (2×2) чем для (4×2). Например, эффективная пропускная способность равная 1,2 и 3 бит/символ достигается при ОСШ меньшем на 5.5, 3 и 2 дБ, соответственно. Для конфигурации (4×2) этот выигрыш составляет 2.5, 1 и 0.5 дБ. Такие результаты являются следствием того, что при одинаковом числе передающих антенн (конфигурация (2×2)) собственные подканалы различаются по ОСШ значительно больше, чем в случае разного числа передающих и приемных антенн.

В разделе 3.3 на основе критерия эффективной пропускной способности исследована эффективность системы связи с кодовым и пространственным разделением пользователей. Получены точные выражения (15)-(16) для эффективной пропускной способности при передаче информации от БС к пользователям (DL – downlink) и от пользователей к БС (UL – uplink):

$$Th_{DL} = \frac{Q(1 - FER_{DL})N_{fr}(N_w - M)N}{T_{fr}\Delta F}, \quad (16)$$

$$Th_{UL} = \frac{Q(1 - FER_{UP})N_{fr}(N_w - QN)N}{T_{fr}\Delta F}, \quad (17)$$

где N_{fr} – число информационных бит, содержащихся в одном фрейме, ΔF – ширина используемого частотного диапазона, T_{fr} – длительность фрейма, N_w

– общее число последовательностей Уолша, FER_{DL} – вероятность фреймовой ошибки при передаче данных от БС к пользователям, FER_{UL} – вероятность фреймовой ошибки при передаче данных от пользователей к БС

Показано, что энергетические потери при разделении пользователей для линии от пользователей к БС являются большими, чем для линии от БС к пользователям. Это связано с тем, что линия от пользователей к БС не является синхронизированной, и при увеличении мощности отношение сигнал/(шум+помеха) остается ограниченным.

В **заключении** приведены основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Получены аналитические выражения для интегральных функций распределения и функций плотности вероятности собственных чисел канальной матрицы в ММО-системе с двумя собственными подканалами в условиях некоррелированных релеевских замираний сигналов.

2. Получены аналитические выражения для вероятности битовой ошибки в ММО-системе с двумя собственными подканалами, обслуживающей одного пользователя, в условиях некоррелированных релеевских замираний сигналов и при использовании бинарной или квадратурной фазовой модуляции, а также 16- или 64-ричной квадратурной амплитудной модуляции.

3. Получены аналитические выражения для вероятности битовой ошибки в ММО-системе с параллельной передачей информации нескольким пользователям на основе проекционного метода разделения пространственных информационных потоков при произвольном числе передающих антенн на базовой станции и приемных антенн у пользователей и некоррелированных релеевских замираний сигналов.

4. Предложен пороговый метод обеспечения максимальной пропускной способности ММО-системы с параллельной передачей информации по собственным подканалам, основанный на использовании только подканалов с большим ОСШ.

5. На основе найденных выражений для вероятности битовой ошибки в ММО-системе с двумя собственными подканалами, получены аналитические формулы для эффективной пропускной способности ММО-системы с пороговым методом передачи информации по собственным подканалам в условиях некоррелированных релеевских замираний сигналов.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Ермолаев, В.Т. Вероятность ошибки передачи информации в ММО-системах связи с пространственным разделением пользователей в условиях релеевских замираний сигналов / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, Д.Н. Лысяков // Изв. ВУЗов. Радиофизика. – 2006, – Т.49, – № 9, – С. 816-828.
2. Ермолаев, В.Т. Вероятность битовой ошибки в ММО-системах с двумя собственными подканалами. / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, А.М. Зуев, Д.Н. Лысяков // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского, – 2009, № 2, С. 55-61.
3. Ермолаев, В.Т. Эффективность пространственного разделения пользователей в CDMA-системах связи в релеевском федингующем канале с частотной дисперсией. / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, Д.Н. Лысяков // Актуальные проблемы статистической физики (Малаховский сборник), Нижний Новгород, 2006. – Т.5, – С. 136-148.
4. Лысяков, Д.Н. Анализ вероятности битовой ошибки в ММО-системах связи с пространственным разделением пользователей / Д.Н. Лысяков // Труды 10-й научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2006.
5. Шилов, М.С. Эффективная пропускная способность OFDM системы связи / М.С. Шилов, Д.Н. Лысяков // Труды 12-й Нижегородской сессии молодых ученых, Нижний Новгород, 2007.
6. Ермолаев, В.Т. Вероятность битовой ошибки в многоканальных системах связи с антенными решетками при пространственном разделении пользователей / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, Д.Н. Лысяков // Материалы четырнадцатой межрегиональной научно-технической конференции «Обработка сигналов в системах телефонной связи и оповещения», Нижний Новгород-Москва, 2006, – С. 60-62.
7. Ермолаев, В.Т. Вероятность битовой ошибки в ММО-системах связи при пространственном разделении пользователей / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман, Д.Н. Лысяков // Материалы первой международной конференции «Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития», Харьков - Туапсе, ХНУРЕ, 2006, – С. 18-19.
8. Лысяков, Д.Н. Эффективность пространственного разделения пользователей в CDMA-системах связи в условиях релеевских замираний сигналов / Д.Н. Лысяков, М.С. Шилов // Труды 12-й Нижегородской сессии молодых ученых, Нижний Новгород, 2007.
9. Лысяков, Д.Н. Вероятность ошибки передачи информации в беспроводных системах связи с антенными решетками / Д.Н. Лысяков // Материалы 11-й международной конференции и выставки "Цифровая обработка сигналов и ее применение", Москва, 2009.
10. Лысяков, Д.Н. Вероятность некодированной битовой ошибки в ММО-системе связи с двумя собственными подканалами в условиях релеевских замираний сигналов / Д.Н. Лысяков // Труды 14-й Нижегородской сессии молодых ученых, Нижний Новгород, 2009.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

ГЛАВА I. Эффективность адаптивной пространственной обработки сигналов в системах радиосвязи с антенными решетками

- 1.1 Основные принципы передачи данных в ММО-системе
- 1.2 Функции плотности вероятности собственных чисел канальной матрицы в ММО-системе с двумя собственными подканалами
- 1.3 Вероятность битовой ошибки в ММО-системе с двумя собственными подканалами
- 1.4 Асимптотические выражения для вероятности битовой ошибки при больших отношениях сигнала к шуму
- 1.5 Заключение по первой главе

ГЛАВА II. Проекционный метод пространственного разделения пользователей в ММО-системе

- 2.1 Одновременная передача данных нескольким пользователям в одной полосе частот
- 2.2 Вероятность битовой ошибки при проекционном методе разделения пользователей в условиях релеевских замираний сигналов
- 2.3 Заключение по второй главе

ГЛАВА III. Методы совместной оптимизации скорости передачи данных и вероятности битовой ошибки в ММО-системе

- 3.1 Критерий эффективной пропускной способности
- 3.2 Пороговый метод увеличения эффективной пропускной способности
- 3.3 Эффективная пропускная способность в системах связи с кодовым и пространственным разделением пользователей
- 3.4 Заключение по третьей главе

Заключение

Список литературы

Список сокращений