

На правах рукописи

РУБЦОВ Алексей Евгеньевич

**Анализ методов адаптации к случайному частотно-
селективному каналу для систем радиосвязи
с ортогональными поднесущими**

01.04.03 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2007

Работа выполнена в Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор Мальцев Александр Александрович.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Плужников Анатолий Дмитриевич,
кандидат физико-математических наук, доцент Дубков Александр Александрович.

Ведущая организация: Институт прикладной физики РАН.

Защита состоится “23” мая 2007 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 в Нижегородском государственном университете им. Н. И. Лобачевского (603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд.420).

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

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим отправлять по указанному адресу ученому секретарю совета

Автореферат разослан “___” апреля 2007 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат физико-математических наук, доцент



Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основным требованием, предъявляемым к современным системам цифровой радиосвязи, является высокая скорость и надежность передачи данных в сложных условиях распространения сигналов. Системы радиосвязи с ортогональными поднесущими (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – OFDM) обеспечивают высокую спектральную эффективность и позволяют наилучшим образом справляться с межсимвольными искажениями сигналов, обусловленными сложным физическим каналом связи с многолучевым распространением (Prasad R., van Nee R., 2000). В настоящее время широкополосные OFDM системы применяются для цифрового радио- и телевидения, а также для скоростной передачи информации как внутри, так и вне помещений. Высокая скорость передачи в OFDM системах достигается путем параллельной передачи информации по большому числу ортогональных частотных подканалов (поднесущих). Формирование ортогональных поднесущих достигается за счет применения алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для повышения помехоустойчивости OFDM систем радиосвязи применяется канальное кодирование, а для защиты от межсимвольной интерференции в начало каждого символа вводится специальный защитный интервал.

Современный стандарт цифровой радиосвязи IEEE 802.11a, регламентирующий работу высокоскоростных *локальных компьютерных радиосетей* (WLAN) диапазона 5 ГГц, позволяет передавать цифровые данные внутри помещений со скоростью до 54 Мбит/с на расстояние в несколько десятков метров в полосе 20 МГц. Однако для удовлетворения постоянно возрастающих требований пользователей скорость передачи информации в локальных радиосетях следующих поколений должна существенно возрасти. Традиционным решением этой задачи является расширение используемой частотной полосы или увеличение излучаемой мощности. Однако указанные ресурсы имеют свои пределы, так как выделяемые стандартами полосы радиочастотных диапазонов ограничены, а максимальный уровень излучаемой мощности не может быть существенно увеличен из-за экологических ограничений и возрастающих требований на время автономной работы портативных радиоустройств. Поэтому наиболее перспективным подходом к решению задачи повышения эффективности систем радиосвязи при жестких ограничениях на выделенные ресурсы является использование новых методов пространственно-временной обработки сигналов и быстрой канальной адаптации (fast link adaptation). В случае применения быстрой канальной адаптации увеличение эффективности системы достигается за счет согласования скорости передачи данных с состоянием текущей реализации частотно-селективного канала (Keller T., Hanzo L., 2000). Такое согласование может производиться путем адаптивного распределения бит (выбора схемы модуляции и кодирования) и мощности по поднесущим, группам поднесущих и различным пространственным подканалам OFDM системы радиосвязи. Анализ различных методов такой быстрой адаптации OFDM системы радиосвязи к текущей реализации передаточной функции случайного частотно-селективного канала и посвящена настоящая диссертационная работа.

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

Современные системы OFDM радиосвязи на основе стандарта IEEE 802.11a предназначены для функционирования в частотно-селективных каналах связи с многолучевым характером распространения сигналов. При этом стандарт предусматривает лишь равномерное распределение мощности и одинаковую схему модуляции и кодирования (МКС) на всех информационных поднесущих, что не является оптимальным в условиях частотно-селективного канала.

В классических работах К.Шеннона (Shannon С.Е., 1949) было показано, что для частотно-селективного канала оптимальным с точки зрения максимизации пропускной способности является распределение передаваемой мощности по методу «заполнения водой» ("*water-filling*") в соответствии с передаточной функцией текущей реализации канала и эффективной мощностью шума на поднесущих. Согласно этому методу для эффективной передачи информации большая мощность сигнала должна распределяться в поднесущие с более низким уровнем эффективного шума. При этом поднесущие с очень высоким уровнем эффективного шума должны быть полностью отключены. Теоретически после такого распределения мощности должна проводиться загрузка битов (распределение видов модуляции и кодирования) по поднесущим в соответствии с вычисленными значениями пропускной способности на каждой поднесущей. Однако такая процедура требует наличия в системе связи оптимальной схемы канального кодирования с непрерывной модуляцией. На практике данный метод невозможно реализовать из-за конечного набора видов модуляции и ограничениями существующих систем помехоустойчивого кодирования. В связи с этим возникает задача по разработке субоптимальных алгоритмов распределения мощности и бит по поднесущим, позволяющих OFDM системе связи эффективно адаптироваться к текущей реализации частотно-селективного канала.

В литературе (см., например, Leke A., Cioffi J.M., 1997 и Fisher R.F.H., Huber J.B., 1996) предложено несколько субоптимальных алгоритмов распределения бит и мощности для систем связи с ортогональными поднесущими. В зависимости от их назначения эти алгоритмы условно можно разделить на две группы: первые максимизируют скорость передачи информации при заданной вероятности битовой (пакетной) ошибки на приемнике; вторые минимизируют вероятность ошибок при фиксированной скорости передачи данных. Большая часть алгоритмов адаптивного распределения бит и мощности, предложенных в печати, относятся ко второму типу и предназначаются для систем проводной связи на основе технологии асимметричной цифровой абонентской линии (Asymmetric Digital Subscriber Line – ADSL). При этом предложенные алгоритмы отличаются большой вычислительной сложностью, допустимой при их реализации в системах проводной связи, в силу высокой степени статичности таких каналов связи. Для OFDM систем радиосвязи, функционирующих в пакетном режиме передачи данных, наибольший практический

интерес представляют быстрые алгоритмы распределения первого типа, максимизирующие скорость передачи данных при заданной вероятности ошибок на приемнике. Поэтому необходимо разработать эффективные и простые с вычислительной точки зрения алгоритмы адаптивного распределения бит и мощности и провести исследование их статистических характеристик, используя модели частотно-селективных каналов, характерных для OFDM систем радиосвязи.

Применение алгоритмов адаптивного распределения бит и мощности позволяет существенно повысить скорость передачи информации при заданной вероятности ошибок на приемнике. Однако при использовании таких алгоритмов необходима передача довольно большого объема служебной информации о распределении мощности и видов модуляции по поднесущим по обратной линии «приемник-передатчик». Это может существенно снизить эффективность пакетных OFDM систем радиосвязи, работающих в нестационарных условиях. Таким образом, возникает задача проведения исследований методов быстрой канальной адаптации, которые могут существенно повысить скорость передачи данных при минимальном количестве дополнительной служебной информации в обратном канале связи и минимальном изменении структуры существующих OFDM систем радиосвязи.

В существующих OFDM системах радиосвязи (например, стандарта IEEE 802.11a) адаптация к каналу связи производится путем выбора схемы модуляции и кодирования (МКС) для всех поднесущих на основе информации об успешности передачи нескольких предыдущих пакетов. Такой *медленный* механизм адаптации не предусматривает использование информации о текущей реализации частотно-селективного канала, что, очевидно, понижает эффективность этих систем радиосвязи. В ряде работ (Simoens S., Bartolome D., 2001; Qiao D., Choi S., 2001) на основе статистического анализа функционирования пакетной OFDM системы радиосвязи в нестационарном частотно-селективном канале было показано, что быстрый адаптивный выбор МКС (для каждого пакета) на основе информации о состоянии текущей реализации частотно-селективного канала может существенно увеличить эффективную скорость передачи данных при незначительном объеме дополнительной служебной информации в обратном канале связи «приемник-передатчик». В работах (Muneta S. et. al., 1999; Lampe M. et. al., 2002) исследовались различные алгоритмы адаптивного выбора МКС для OFDM систем радиосвязи при отсутствии помеховых сигналов. Эти алгоритмы основаны на вычислении так называемого показателя качества канала, который учитывает частотно-селективный характер передаточной функции канала связи. Однако приведенные авторами результаты не содержат количественных выводов о повышении эффективности работы OFDM системы. Поэтому возникает задача разработки практических алгоритмов *быстрого* адаптивного выбора МКС в существующих OFDM системах радиосвязи и исследования их эффективности при отсутствии и наличии помеховых сигналов.

Как отмечалось выше пропускная способность частотно-селективного канала связи с глубокими провалами (замираниями) на некоторых частотах может быть повышена за счет «отключения» слабых поднесущих. В литературе предлагался итеративный алгоритм отключения слабых поднесущих с целью последующего

применения адаптивного распределения бит по оставшимся активным поднесущим (Cioffi J.M., 2002). Однако исследований эффективности применения адаптивного отключения слабых поднесущих в схемах с последующим выбором одного вида модуляции для всех активных поднесущих в известных нам работах не проводилось.

В последнее время возрастает потребность в обеспечении высокоскоростного доступа в Интернет по широкополосным радиоканалам (Broadband Wireless Access). Технология ортогонального частотного уплотнения сигналов с множественным доступом (OFDMA – Orthogonal Frequency Division Multiple Access) является одним из перспективных технических решений обеспечения высокоскоростной передачи информации в *радиосетях городского уровня* (WMAN) путем параллельной передачи данных многим пользователям в одном частотном канале. В реальных условиях использование такой системы радиосвязи предусматривает наличие нескольких соседних базовых станций, работающих в одном частотном диапазоне с полной или частичной загрузкой полосы канала. Было показано (Tiraspol'sky S.A. et al., 2006), что такой способ построения сети максимизирует спектральную эффективность системы, но при этом существенно осложняет помеховую обстановку. Несмотря на интенсивное исследование таких систем, их характеристики, как правило, оценивались для модельных условий, в которых взаимные помехи заменялись аддитивным белым гауссовским шумом (Zheng S.L., 2003). Более детальный анализ помехоустойчивости OFDMA систем связи, работающих в сложной сигнально-помеховой обстановке, в известных нам работах не проводился. Стоит подчеркнуть, что в новом стандарте IEEE 802.16e предусмотрена процедура быстрого адаптивного выбора МКС в OFDMA системах радиосвязи. Поэтому вопрос о разработке и исследовании конкретных алгоритмов быстрой канальной адаптации OFDMA систем радиосвязи при наличии помех от соседних станций также является актуальным.

Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка, исследование статистических характеристик и сравнительный анализ алгоритмов адаптации к случайному частотно-селективному каналу для систем радиосвязи с ортогональными поднесущими.

Задачи диссертационной работы

1. Исследование статистических характеристик пропускной способности случайного частотно-селективного канала связи.
2. Оптимизация распределения мощности по поднесущим на передатчике с целью минимизации вероятности битовых ошибок на приемнике OFDM системы радиосвязи, функционирующей в частотно-селективном канале.
3. Разработка и исследование характеристик алгоритма совместного адаптивного распределения бит и мощности по поднесущим, обладающего высокой эффективностью при достаточно низкой вычислительной сложности.
4. Разработка и исследование характеристик алгоритма адаптивного выбора схемы модуляции и кодирования, общей для всех ортогональных поднесущих.

Нахождение показателя качества частотно-селективного канала, устойчивого к сложной помеховой обстановке.

5. Разработка и исследование характеристик алгоритма адаптивного отключения слабых поднесущих с последующим выбором одного вида модуляции для всех активных поднесущих.

Методы исследований. При решении поставленных задач использовались общие методы статистической радиофизики, теории информации, математической статистики, математическое и имитационное компьютерное моделирование.

Научная новизна работы

1. Исследование пропускной способности случайного частотно-селективного канала связи, в отличие от известных работ, проведено с учетом различных методов распределения мощности по поднесущим и корреляции коэффициентов усиления канала на поднесущих.

2. Впервые поставлена и решена задача оптимизации распределения передаваемой мощности по поднесущим в OFDM системе радиосвязи с целью минимизации вероятности битовых ошибок на приемнике.

3. Предложен оригинальный алгоритм совместного адаптивного распределения бит и мощности по поднесущим, основанный на применении субоптимального распределения мощности между поднесущими с одним видом модуляции.

4. Предложен новый алгоритм адаптивного выбора общей для всех поднесущих схемы модуляции и кодирования. Проведено исследование характеристик этого алгоритма при наличии частотно-селективных помех.

5. Предложен оригинальный алгоритм адаптивного отключения слабых поднесущих с последующим выбором одного вида модуляции для всех активных поднесущих. Показана высокая эффективность его применения.

Практическая значимость результатов. Представленные в диссертации результаты анализа методов канальной адаптации могут быть использованы при проектировании перспективных высокоскоростных систем радиосвязи с ортогональными поднесущими.

Публикации и апробация результатов работы. По теме диссертации опубликовано 32 работы. Среди них 9 статей в рецензируемых журналах (“Intel Technology Journal” [1], “Известия вузов. Радиофизика” [3, 9], “Вестник ННГУ. Серия Радиофизика” [2, 4, 5, 7, 8], “Прикладная радиоэлектроника” [6]), 18 работ, представляющих собой опубликованные материалы докладов на конференциях [10–27], и 5 зарегистрированных патентных заявок на изобретения [28–32].

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- международная конференция 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems (Валенсия, Испания, сентябрь 2006 г);
- X международная конференция «Теория и техника передачи, приема и обработки информации» (ХНУРЭ, Харьков-Туапсе, сентябрь 2004 г);
- ежегодные научные конференции по радиофизике (ННГУ, Н. Новгород, май 2001-2003, 2005 гг.);
- ежегодные нижегородские сессии молодых ученых (Н. Новгород, 2002-2005 гг.);
- московский форум Интел для разработчиков (Москва, апрель 2005 г.).

Результаты работы неоднократно докладывались на семинарах кафедры бионики и статистической радиофизики ННГУ и на технических совещаниях корпорации Интел по системам радиосвязи.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №00-02-17602, №00-15-96620, №03-02-17141 и НШ-1729.2003.2 – “Ведущие научные школы”; гранта Отделения науки НАТО CLG-977419.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, приложения и списка условных сокращений. Объем диссертации составляет 127 страниц, из них основной текст 113 страниц, приложение – 3 страницы, библиографический список – 8 страниц (105 наименований). Работа содержит 43 рисунка и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность рассматриваемой темы исследования, изложено современное состояние подобных исследований в мире, проведен обзор литературы по теме диссертации, приведены результаты, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации было проведено исследование статистических характеристик пропускной способности системы радиосвязи с ортогональными поднесущими, функционирующей в случайном частотно-селективном канале.

В разделе 1.1 рассмотрены основные принципы работы OFDM систем радиосвязи (см. Рис. 1) и основные проблемы, возникающие при проектировании таких систем. Определена пропускная способность OFDM системы радиосвязи и предложена ее статистическая модель для случайного частотно-селективного канала связи.

В разделе 1.2 проведено исследование статистических характеристик пропускной способности частотного подканала (поднесущей) с плоской частотной характеристикой и пропускной способности широкополосного частотно-селективного канала при различных методах распределения передаваемой мощности по поднесущим. Показано, что применение адаптивного отключения поднесущих позволяет получить существенный выигрыш в теоретической пропускной

способности. Причем, этот выигрыш незначительно уступает выигрышу от применения распределения мощности на основе теоретически оптимального (с точки зрения максимизации пропускной способности) “water-filling” метода.

В разделе 1.3 проведено исследование влияния корреляции комплексных коэффициентов передачи канала на статистические характеристики пропускной способности случайного частотно-селективного канала (на примере модели релеевого канала с экспоненциальным профилем затухания). Показано, что увеличение частотной корреляции на поднесущих (уменьшение среднеквадратического времени задержки канала) приводит к росту интенсивности флуктуаций общей пропускной способности канала и снижает интенсивность флуктуаций пропускной способности отдельных поднесущих канальной реализации.

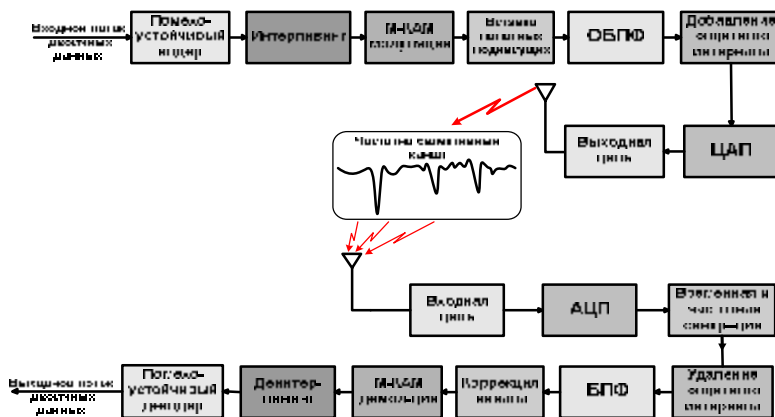


Рис. 1. Структурная схема OFDM системы радиосвязи

Во второй главе рассмотрена проблема повышения эффективности OFDM системы радиосвязи за счет согласования спектральной плотности мощности излучаемого сигнала и скорости передачи данных с состоянием текущей реализации частотно-селективного канала. Такое согласование предлагается производить на передатчике путем адаптивного распределения мощности и бит по поднесущим (группам поднесущих) OFDM системы радиосвязи.

В разделе 2.1 рассмотрена задача оптимизации распределения передаваемой мощности по поднесущим в OFDM системе радиосвязи. В качестве критерия оптимальности выбран критерий минимизации вероятности битовых ошибок на приемнике при ограничении на значение суммарной мощности, излучаемой передатчиком. Для решения оптимизационной задачи используется лог-линейная аппроксимация зависимости вероятности битовых ошибок от отношения

сигнал/шум (ОСШ). Показано, что лог-линейная аппроксимация позволяет хорошо описывать вероятность битовых ошибок ρ для значений γ_i находящихся в пределах 3 дБ окрестности выбранной рабочей точки (заданной вероятности битовых ошибок).

При помощи метода неопределенных коэффициентов Лагранжа найдено аналитическое решение оптимизационной задачи, которое предусматривает распределение бóльшей мощности в поднесущие с высоким уровнем эффективного шума. Оптимальный передатчик, обладая информацией о текущей реализации частотно-селективного канала, должен стремиться к выравниванию значений ОСШ на поднесущих приемника для каналов с относительно небольшим разбросом значений коэффициентов усиления на поднесущих (порядка ± 3 дБ). Для канальных реализаций с бóльшим разбросом коэффициентов усиления лог-линейная аппроксимация становится непригодной для описания вероятности битовых ошибок и формальное использование полученных аналитических выражений в этом случае приводит к распределению практически всей полезной мощности в энергетически слабейшие поднесущие и становится заведомо неоптимальным (приводит к возрастанию вероятности битовых ошибок OFDM системы). Для решения этой проблемы предложен алгоритм адаптивного распределения мощности (АРМ) для OFDM системы радиосвязи, в котором предусмотрена процедура отключения поднесущих с малыми коэффициентами усиления с последующим субоптимальным распределением мощности по оставшимся активным поднесущим.

Проведено сравнение эффективности работы стандартной OFDM системы радиосвязи и OFDM системы с адаптивным распределением мощности по поднесущим. Показано, что применение предложенного алгоритма адаптивного распределения позволяет получить существенный выигрыш в производительности OFDM системы радиосвязи (4÷5 дБ в эквивалентных значениях ОСШ).

В разделе 2.2 рассмотрена задача оптимизации распределения бит и мощности по поднесущим в OFDM системе радиосвязи. Для решения задачи предложен оригинальный алгоритм совместного адаптивного распределения (загрузки) бит и мощности (АРБМ) по поднесущим в OFDM системе связи. Предложенный алгоритм позволяет получить субоптимальное решение оптимизационной задачи путем итеративной процедуры на основе знания информации о состоянии текущей реализации канала. Алгоритм предназначен для максимизации скорости передачи информационных бит с учетом ограничений на вероятность битовых ошибок и на суммарную передаваемую мощность.

Процедура адаптивного распределения предлагается проводить в два этапа. На первом этапе производится начальное распределение мощности в соответствии с классическим «water-filling» методом. На втором этапе производится окончательное распределение мощности и бит по поднесущим. Для каждого вида модуляции итеративно определяется группа поднесущих, на которых может быть достигнуто

значение ОСШ, гарантирующее передачу данных с требуемой вероятностью ошибок. Распределение мощности в каждой группе поднесущих производится в соответствии выражением для субоптимального распределения, полученным в разделе 2.1.

Проведено исследование эффективности работы OFDM системы радиосвязи с применением алгоритма адаптивного распределения бит и мощности (см. Рис. 2–3). Показано, что применение совместного распределения бит и мощности дает выигрыш до 1 дБ (в эквивалентном ОСШ) по сравнению с адаптивным распределением бит (АРБ) или адаптивным распределением мощности (АРМ). Проведено исследование влияния эффекта Доплера на эффективность работы OFDM системы радиосвязи с адаптивным распределением бит и мощности. Путем моделирования получено, что при скорости рассеивателей, равной приблизительно 1 м/с, изменение частотно-селективного канала за время обмена служебными и информационным пакетами ($1 \div 2$ мс) не приведет к существенному снижению производительности OFDM системы радиосвязи с адаптивным распределением бит и мощности (менее 1 дБ в эквивалентном ОСШ).

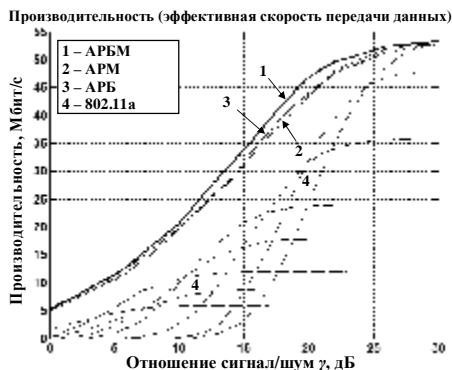


Рис. 2. Производительность OFDM системы радиосвязи с АРБМ



Рис. 3. Вероятности ошибок OFDM системы радиосвязи с АРБМ

В третьей главе рассмотрена задача адаптивного выбора схемы модуляции и кодирования (МКС), потенциально позволяющего повысить итоговую скорость передачи данных при минимальном количестве дополнительной служебной информации и минимальном изменении структуры существующих OFDM систем радиосвязи.

В разделе 3.1 предложен новый алгоритм адаптивного выбора МКС (АВСМК), основанный на вычислении показателя качества канала I . В качестве показателя качества канала предлагается использовать среднюю эффективную пропускную

способность реализации частотно-селективного канала C_e , вычисляемую следующим образом:

$$I(\gamma | L_p, r_t) = C_e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2 \left(1 + \frac{g_i}{\Gamma(L_p, r_t)} \right)$$

где $\gamma = \{\gamma_1, \dots, \gamma_N\}$ – вектор значений ОСШ на поднесущих, c_i – эффективная пропускная способность i -й поднесущей, Γ – так называемый «запас» ОСШ, L_p – длина пакета и ρ_t – требуемая вероятность пакетной ошибки.

Проведено исследование эффективности работы OFDM системы радиосвязи с применением алгоритма адаптивного выбора МКС (см Рис. 4–5). Настройка алгоритма на определенное значение требуемой вероятности пакетной ошибки ρ_t производилась путем подбора значений параметра Γ . Показано, что наибольшей производительностью обладает OFDM система с $\rho_t = 5\%$. Причем, чрезмерное уменьшение вероятности пакетной ошибки до $\rho_t = 0.1\%$ снижает производительность системы на 3 дБ из-за более частого использования более надежных, но менее скоростных МКС. Показано, что применение предложенного алгоритма адаптивного выбора МКС позволяет улучшить производительность OFDM системы радиосвязи на 2÷3 дБ. Производительность OFDM системы с применением алгоритма адаптивного выбора МКС всего на 3 дБ уступает системе с адаптивным распределением бит и мощности при существенном снижении объема необходимой служебной информации.

В разделе 3.2 проведено исследование эффективности применения адаптивного отключения поднесущих (ОП). Предложен оригинальный алгоритм адаптивного выбора МКС с отключением поднесущих (АВСМК-ОП), который предусматривает производить адаптивное отключение поднесущих при помощи процедуры Чоу (Chow's primer). Показано, что дополнительное использование адаптивного отключения поднесущих позволяет заметно повысить производительность OFDM системы радиосвязи с адаптивным выбором МКС (1÷1,5 дБ в эквивалентном ОСШ) и получить заданную вероятность пакетной ошибки в более широкой области значений ОСШ (см. Рис. 4–5). При этом производительность OFDM системы с адаптивным отключением поднесущих всего лишь на 1,5 дБ уступает системе с адаптивным распределением бит и мощности.

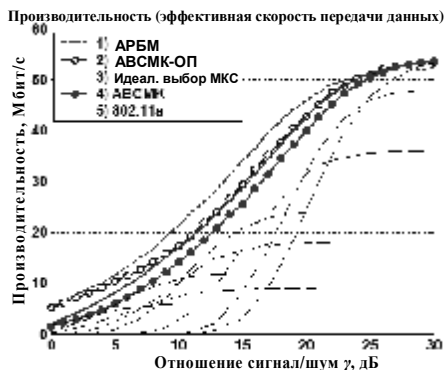


Рис. 4. Производительность OFDM системы радиосвязи с адаптивным выбором МКС

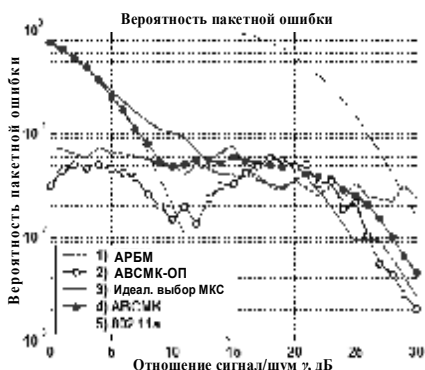


Рис. 5. Вероятность ошибок OFDM системы радиосвязи с адаптивным выбором МКС

В разделе 3.3 рассмотрена задача прогнозирования вероятности ошибок с целью адаптивного выбора МКС в OFDM системах радиосвязи, функционирующих в сложной помеховой обстановке. Эта задача была рассмотрена на примере системы радиосвязи стандарта IEEE 802.16e, предназначенной для обеспечения высокоскоростной передачи информации в радиосетях городского уровня (WMAN – wireless metropolitan area network). В реальных условиях использование такой системы радиосвязи предусматривает наличие нескольких соседних базовых станций, работающих в одном частотном диапазоне с полной или частичной загрузкой канала. Вследствие частотной селективности канала связи и частичной (случайной) его загрузки помехи, создаваемые соседними базовыми станциями для рассматриваемого абонента (приемника), будут существенно частотно зависимыми – что чрезвычайно осложняет помеховую обстановку.

Проведено исследование эффективности прогнозирования вероятности ошибок при помощи показателя качества канала, предложенного в разделе 3.1, для различных сценариев помеховой обстановки. Показано, что в ряде случаев показатель качества канала, вычисленный как среднее значение эффективной пропускной способности поднесущих, не позволяет прогнозировать вероятность ошибок системы радиосвязи. Для устранения этого недостатка предложен *модифицированный* показатель качества канала, который не только характеризует среднее «энергетическое качество» бит кодовой посылки, но и учитывает перемежающие свойства деинтерливера и последовательный характер процесса декодирования кодовой посылки. Показано, что использование модифицированного показателя качества канала позволяет прогнозировать вероятность ошибок с хорошей степенью точности.

В **Заключении** подведены итоги проведенной работы, изложены основные результаты и выводы.

В **Приложении 1** приводится определение производительности (эффективной скорости передачи) системы радиосвязи.

В **Приложении 2** приводится список условных сокращений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Исследование статистических характеристик пропускной способности случайного частотно-селективного канала показало, что применение адаптивного отключения поднесущих позволяет получить существенный выигрыш в теоретической пропускной способности. Причем, этот выигрыш незначительно уступает выигрышу от применения теоретически оптимального распределения мощности на основе “water-filling” метода. Было показано, что увеличение частотной корреляции на поднесущих приводит к росту интенсивности флуктуаций общей пропускной способности канала, и снижает интенсивность флуктуаций пропускной способности отдельных поднесущих канальной реализации.

2. Получено аналитическое выражение для субоптимального распределения мощности на передатчике, минимизирующего вероятность битовых ошибок на приемнике. Применение такого распределения мощности по поднесущим на передатчике приводит к повышению эффективности OFDM системы (снижению вероятности битовых ошибок) в частотно-селективных каналах с относительно небольшим разбросом значений коэффициентов усиления на поднесущих (порядка ± 3 дБ). В каналах с большим разбросом предложено использовать алгоритм адаптивного распределения мощности на передатчике, основанный на отключении поднесущих с малыми коэффициентами усиления и последующем субоптимальном распределении мощности по активным поднесущим.

3. Показано, что применение совместного адаптивного распределения бит и мощности по поднесущим обеспечивает значительное увеличение скорости передачи информации по сравнению с традиционной OFDM системой, гарантируя при этом заданную вероятность битовых ошибок.

4. Показано, что применение адаптивного выбора МКС позволяет существенно повысить эффективную скорость передачи в OFDM системах радиосвязи. Предложенный в работе модифицированный показатель качества канала позволил более эффективно осуществлять выбор МКС при наличии частотно-селективных помех от соседних радиостанций.

5. Применение адаптивного отключения поднесущих с последующим выбором МКС позволило существенно снизить (по сравнению с адаптивным распределением бит и мощности) объем дополнительной служебной информации, необходимой для функционирования системы, при незначительном проигрыше в производительности системы.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. High-Throughput Wireless LAN Air Interface/ Bangerter B., Jacobsen E., Ho M., Stephens A., Maltsev A., Rubtsov A., Sadri A. // Intel Technology Journal. – 2003. – Vol. 7, No. 2. – P. 47-57.
2. Рубцов, А.Е. Адаптивное распределение передаваемой мощности в системах радиосвязи с ортогональными поднесущими / А. А. Мальцев, А. В. Пудеев, А. Е. Рубцов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2004. – Вып. 1(2). – С. 87–96.
3. Рубцов, А.Е. Метод адаптивного распределения бит и мощности по поднесущим в OFDM системах радиосвязи / А. А. Мальцев, А. В. Пудеев, А. Е. Рубцов // Известия вузов. Радиофизика. – 2006. – Т.49, № 2. – С. 174–184.
4. Рубцов, А.Е. Адаптивный выбор схемы модуляции и кодирования в системах радиосвязи с ортогональными поднесущими / А. А. Мальцев, А. Е. Рубцов, А.В. Давыдов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2005. – Выпуск 1(3). – С. 93–101.
5. Рубцов, А.Е. Исследование характеристик OFDM-систем радиосвязи с адаптивным отключением поднесущих / А. А. Мальцев, А. Е. Рубцов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2007 (в печати).
6. Адаптивные MIMO-OFDM системы радиосвязи для высокоскоростной передачи информации / Давыдов А.В., Мальцев А.А., Пудеев А.В., Рубцов А.Е., Тираспольский С.А. // Прикладная радиоэлектроника (г. Харьков). – 2006. – №3. – С. 326–336.
7. Рубцов, А.Е. Практический алгоритм адаптивного оценивания частотно-селективного канала связи в OFDM системах / А. А. Мальцев, А. В. Пудеев, А. Е. Рубцов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2004. – Выпуск 1(2). – С. 87–96.
8. Рубцов, А.Е. Точность оценивания фазы в системах радиосвязи с ортогональными поднесущими / А. А. Артеменко, А. Е. Рубцов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Радиофизика. – 2005. – Выпуск 1(3). – С. 127–134.
9. Рубцов, А.Е. Исследование влияния фазовых флуктуаций на характеристики OFDM системы радиосвязи / А. А. Мальцев, А. Е. Рубцов, А. А. Артеменко // Известия вузов. Радиофизика. – 2007. – Т.50, № 2.
10. Рубцов, А.Е. Адаптивная модуляция и распределение мощности в OFDM системах радиосвязи / А. А. Мальцев, А. В. Пудеев, А. Е. Рубцов // Тезисы докладов X международной конференции ТТППОИ, сентябрь 2004. – Харьков: Изд. ХНУРЭ, 2004. – С. 40–41.
11. Selective interference cancellation using Kalman filtering / Pudeyev A., Maltsev A., Rubtsov A., Tiraspolksky S. // Proceedings 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS'06), Valencia, Spain, 5–8 September, 2006.
12. Mobile WiMAX – Deployment Scenarios Performance Analysis / Tiraspolksky S., Rubtsov A., Maltsev A., Davydov A. // Proceedings 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS'06), Valencia, Spain, 5–8 September, 2006.

13. Рубцов, А.Е. Статистические характеристики пропускной способности случайного частотно-селективного канала связи / А. А. Мальцев, А. Е. Рубцов // Труды (пятой) научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.А.Андропова, 7 мая 2001 г. – Ред. А.В.Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛИАМ. – 2001. – С. 189–190.

14. Rubtsov, A.E. Overview of loading algorithms for OFDM systems / A. A. Maltsev, A. E. Rubtsov, S. A. Tiraspol'sky // Труды (пятой) научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.А.Андропова. 7 мая 2001 г. – Ред. А.В.Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛИАМ. – 2001. – С. 191–192.

15. Rubtsov, A.E. The comparison of capacities of MIMO systems with different numbers of transmitting and receiving elements for random Rayleigh channel / A. A. Maltsev, A. E. Rubtsov, S. A. Tiraspol'sky // Труды (пятой) научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения А.А.Андропова. 7 мая 2001 г. – Ред. А.В.Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛИАМ. – 2001. – С. 199–200.

16. Rubtsov, A.E. The effect of phase tracking errors on BER performance of OFDM systems / A. A. Maltsev, A. E. Rubtsov // Труды (шестой) научной конференции по радиофизике. 13 мая 2002 г. – Ред. А.В.Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛИАМ, 2002. – С. 251–252.

17. Рубцов, А.Е. Влияние неточности оценки канала на вероятность битовых ошибок систем связи с М-QAM модуляцией / А. Е. Рубцов, В.С. Шпагина // Труды (седьмой) научной конференции по радиофизике, посвященной 90-летию со дня рождения В. С. Троицкого, 7 мая 2003. – Ред. А. В. Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛИАМ, 2003. – С. 216–217.

18. Рубцов, А.Е. Исследование влияния фазовых флуктуаций на характеристики OFDM системы связи / А. А. Артеменко, А. Е. Рубцов // Труды (девятой) научной конференции по радиофизике. 7 мая 2005 (<http://rf.unn.ru/rus/sci/books/05/index.html>). – Ред. А. В. Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛИАМ, 2005. – С.186–187.

19. Рубцов, А.Е. Исследование эффективности работы OFDM системы радиосвязи, использующей адаптивный метод оценивания канала / А.Г.Севастьянов, А.Е.Рубцов, А.В.Пудеев // Труды (девятой) научной конференции по радиофизике. 7 мая 2005 (<http://rf.unn.ru/rus/sci/books/05/index.html>). – Ред. А. В. Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛИАМ, 2005. – С.204–205.

20. Рубцов, А.Е. Влияние частотной корреляции на пропускную способность широкополосного канала / А.Н. Южанина, А.Е. Рубцов // Труды (девятой) научной конференции по радиофизике. 7 мая 2005 (<http://rf.unn.ru/rus/sci/books/05/index.html>). – Ред. А. В. Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛИАМ, 2005. – С.212–213.

21. Рубцов, А.Е. Влияние неточности оценивания фазы несущей на вероятность битовых ошибок в М-QAM системах передачи данных / А.А. Мальцев, А.Е. Рубцов // Седьмая нижегородская сессия молодых ученых. Тезисы докладов. – Н.Новгород, 2002. – С. 56–58.

22. Рубцов, А.Е. Адаптивное распределение передаваемой мощности по поднесущим в OFDM системах связи / А.А. Мальцев, А.Е. Рубцов // Восьмая нижегородская сессия молодых ученых. Тезисы докладов. – Н. Новгород, 2003. – С.

99–101.

23. Рубцов, А.Е. Исследование вероятности битовых ошибок OFDM систем связи в канале с аддитивным белым гауссовским шумом / А.А. Мальцев, А.Е. Рубцов, В.С. Шапина // Восьмая нижегородская сессия молодых ученых. Тезисы докладов. – Н. Новгород, 2003. – С. 104–106.

24. Рубцов, А.Е. Исследование вероятности битовых ошибок OFDM систем радиосвязи в частотно-селективном канале с релеевой статистикой / А. Е. Рубцов, А. Г. Севастьянов // Девятая нижегородская сессия молодых ученых. Тезисы докладов. – Н. Новгород, 2004. – С. 126–128.

25. Рубцов, А.Е. Исследование статистических характеристик пропускной способности случайного частотно-селективного канала связи / А.Е. Рубцов, А.Н. Южанина // Десятая нижегородская сессия молодых ученых. Тезисы докладов. – Н. Новгород, 2005.

26. Рубцов, А.Е. Исследование точности оценивания фазы в системах радиосвязи с ортогональными поднесущими / А. А. Артеменко, А. Е. Рубцов // Десятая нижегородская сессия молодых ученых. Тезисы докладов. – Н. Новгород, 2005.

27. Рубцов, А.Е. Исследование статистических характеристик адаптивного метода оценивания канала связи на основе фильтра Калмана / А.Е. Рубцов, А. Г. Севастьянов // Десятая нижегородская сессия молодых ученых. Тезисы докладов. – Н. Новгород, 2005.

28. Патентная заявка 20040190637 США. System and method for adaptive phase compensation of OFDM signals / Maltsev A., Soupikov A., Rubtsov A.

29. Патентная заявка 20040127245 США. System and method for intelligent transmitted power control scheme / Sadri A., Maltsev A., Rubtsov A., Sergeyev V.

30. Патентная заявка 20050031047 США. An adaptive multicarrier wireless communication system, apparatus and associated methods / Maltsev A., Sadri A., Rubtsov A., Tiraspolsky S.

31. Патентная заявка 20050152465 США. System and method for selecting data rates to provide uniform bit loading (UBL) of subcarriers of a multicarrier communication channel / Maltsev A., Sadri A., Rubtsov A., Davydov A.

32. Патентная заявка 20050152466 США. Multicarrier communication system and methods for link adaptation using uniform bit loading and subcarrier puncturing / Maltsev A., Sadri A., Rubtsov A., Davydov A., Pudoyev A.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Глава 1. Статистические характеристики пропускной способности случайного частотно-селективного канала связи

- 1.1. Пропускная способность системы радиосвязи с ортогональными поднесущими, функционирующей в случайном частотно-селективном канале
- 1.2. Статистические характеристики пропускной способности случайного частотно-селективного канала связи
- 1.3. Влияние частотной корреляции на статистические характеристики пропускной способности частотно-селективного канала
- 1.4. Заключение по первой главе

Глава 2. Адаптивное распределение мощности и бит в OFDM системах радиосвязи

- 2.1. Адаптивное распределение передаваемой мощности по поднесущим в OFDM системах радиосвязи
- 2.2. Адаптивное распределение бит и мощности по поднесущим в OFDM системах радиосвязи
- 2.3. Заключение по второй главе

Глава 3. Адаптивный выбор схемы модуляции и кодирования в OFDM системах радиосвязи

- 3.1. Адаптивный выбор схемы модуляции и кодирования в OFDM системах радиосвязи
- 3.2. Адаптивное отключение поднесущих как способ повышения эффективности OFDM системы радиосвязи
- 3.3. Прогнозирование вероятности ошибок в системах радиосвязи с ортогональными поднесущими, функционирующих в сложной помеховой обстановке
- 3.4. Заключение по третьей главе

Заключение

Список литературы

Приложение. Определение производительности (эффективной скорости передачи) системы связи

Список условных сокращений

Подписано в печать 27.04.2007. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

Нижегородский государственный технический университет
Типография НГТУ. 603600, Н.Новгород, ул. Минина, 24