

На правах рукописи

Давыдов Алексей Владимирович

**ПОДАВЛЕНИЕ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ В СОТОВЫХ
СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ С ОРТОГОНАЛЬНЫМИ
ПОДНЕСУЩИМИ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2013

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
профессор Мальцев А.А.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
доцент Морозов О.А.
кандидат технических наук
доцент Мякинков А.В.

Ведущая организация: НПО «Завод им. М.В. Фрунзе»

Защита состоится «_____» _____ 2013г. в _____ на
заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском
государственном университете им. Н.И.Лобачевского по адресу:
Нижегород, пр. Гагарина, 23, корп. _____, ауд. _____.

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

Автореферат разослан «_____» _____ 2013 г.

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



Черепенников В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

Актуальность темы диссертации

Основным требованием, предъявляемым к современным системам цифровой радиосвязи, является высокая скорость и надежность передачи данных большому числу пользователей в сложных условиях распространения сигналов. Системы радиосвязи с таким множественным доступом и ортогональным частотным разделением поднесущих между различными пользователями (Orthogonal Frequency Division Multiple Access – OFDMA-системы) позволяют обеспечить требуемую спектральную эффективность системы в физических каналах связи с многолучевым распространением (Prasad R., van Nee R., 2000). Высокая спектральная эффективность передачи в OFDMA-системах достигается посредством параллельной передачи информации нескольким обслуживаемым абонентам по большому числу ортогональных частотных поднесущих (логических каналов), формируемых с помощью схемы модуляции с ортогональными поднесущими (OFDM – Orthogonal Frequency Division Multiplexing). При этом защита от межсимвольной интерференции в каналах связи с многолучевым распространением, обеспечивается введением в начало каждого OFDM-символа специального защитного интервала, занимающего относительно небольшую часть символа и позволяющего существенно упростить процедуру обработки принятых сигналов.

В настоящее время технология OFDMA получила большое распространение в системах передачи информации. OFDMA-системы были реализованы рабочими группами (Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, 3rd Generation Partnership Project – 3GPP) в современных стандартах радиосвязи IEEE 802.16e, IEEE 802.16m и 3GPP LTE-A, используемых в сотовых радиосетях городского уровня (Wireless Metropolitan Area Network – WMAN). Данные системы позволяют передавать цифровую информацию многим пользователям с пиковой скоростью до ~300 Мбит/с в нисходящем канале на расстояния в несколько километров. Однако наблюдаемый в последние годы экспоненциальный рост числа абонентов сотовых сетей, требует дальнейшего увеличения пропускной способности OFDMA-систем радиосвязи последующих поколений.

Традиционными решениями задачи повышения пропускной способности радиосетей является расширение используемой частотной полосы или увеличение излучаемой мощности. Однако указанные способы не всегда являются эффективными для сотовых систем связи. Так максимальный уровень излучаемой мощности не может быть существенно увеличен из-за экологических ограничений и требований на электромагнитную совместимость с другими радиосистемами. Частотный диапазон, как правило, тоже ограничен в силу дороговизны частотного ресурса. Поэтому наиболее перспективным подходом к решению задачи повышения эффективности работы современных OFDMA-систем радиосвязи, является использование

многоэлементных адаптивных антенн на передатчике и приемнике (Multiple-Input Multiple-Output – MIMO-схем) и применение новых методов пространственно-временной обработки сигналов.

В случае применения пространственно-временной обработки сигналов, спектральная эффективность системы радиосвязи повышается за счет формирования множества параллельных пространственных подканалов и одновременной передачи данных по ним одному или нескольким пользователям (Andersen J.B., 2003). Формирование нескольких пространственных подканалов между передатчиком и приемником осуществляется путем специальной адаптивной настройки диаграмм направленности антенных систем передатчика и приемника. Однако из-за одновременной передачи нескольких потоков данных по пространственным подканалам между ними возникают взаимные непреднамеренные помехи. В этом случае, эффективность применения MIMO-схем, будет определяться уровнем создаваемых взаимных помех и возможностью их подавления (разделения пространственных подканалов) на приемнике абонента.

Другим способом увеличения пропускной способности современных OFDMA-систем радиосвязи является повышение плотности установки передающих базовых станций, работающих в одном частотном канале (Farber M., 2011). Такая более плотная установка передающих станций, приводит к увеличению уровня взаимных непреднамеренных помех от соседних базовых станций. Как следствие, помехи от соседних станций являются одним из основных факторов, ограничивающим пропускную способность современных систем сотовой связи. Очевидно, что при таком плотном размещении базовых станций пропускная способность системы сотовой радиосвязи, будет определяться возможностью подавления помех от соседних мешающих станций на приемнике абонента. Однако существующие минимальные требования, предъявляемые к помехоустойчивости приемника абонента для современных OFDMA-систем, не предусматривают реализацию и использование специальных методов борьбы с непреднамеренными помехами от соседних базовых станций. В тоже время многочисленные теоретические исследования показывают, что информация о статистических характеристиках таких непреднамеренных помех может быть эффективно использована для повышения помехоустойчивости систем сотовой связи.

Настоящая диссертация посвящена разработке и анализу эффективности новых методов борьбы с непреднамеренными помехами в MIMO/OFDMA-системах сотовой радиосвязи.

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 (Qualcomm, Intel, Samsung, Nokia Siemens, и др.) и в рабочих группах IEEE и 3GPP, отвечающих за стандартизацию протоколов передачи данных на физическом уровне.

В зависимости от числа антенн на приемнике абонента алгоритмы подавления непреднамеренных помех от соседних базовых станций в системах сотовой связи можно разделить на две группы.

Первая группа алгоритмов подавления помех применяется в приемниках абонентов с одной антенной, и повышает помехоустойчивость приема сигнала путем учета характеристик непреднамеренных помех в процедурах канального (помехоустойчивого) декодирования с «мягкими» решениями. Информация о статистических характерах помех на ортогональных поднесущих OFDMA-системы связи используется для соответствующего «взвешивания» входной последовательности символов, поступающих на устройство декодирования. Следует отметить, что в известных нам публикациях такие алгоритмы подавления непреднамеренных помех в OFDMA-системах радиосвязи не рассматривались, хотя их применение в определенных помеховых обстановках оказывается весьма эффективным.

Вторая группа алгоритмов подавления помех повышает помехоустойчивость OFDMA-систем связи путем оптимальной обработки сигналов принятых с нескольких антенных элементов приемника абонента. При этом пространственная обработка сигналов в многоэлементной адаптивной антенне позволяет компенсировать помеховые сигналы от соседних станций, приходящие на приемник абонента с определенных направлений. Несмотря на то, что имеется большое число публикаций, посвященных анализу различных алгоритмов пространственного подавления помех с использованием адаптивных антенных решеток (Монзинго Р., Миллер Т., 1986), специфика их применения в OFDMA-системах радиосвязи не исследовалась.

Следует отметить, что, в большинстве работ для описания непреднамеренных помех используются упрощенные модели: узкополосного или широкополосного гауссовского шума. Как отмечалось выше, в реальных условиях функционирования систем сотовой радиосвязи необходимо учитывать наличие нескольких соседних базовых станций, работающих в одном частотном диапазоне с полной или частичной загрузкой канала. Поэтому непреднамеренные помехи в OFDMA-системах радиосвязи имеют более сложную структуру. Вследствие частотной селективности канала связи и частичной (случайной) его загрузки, помехи, создаваемые соседними базовыми станциями для рассматриваемого абонента (приемника), будут существенно частотно зависимыми. Например, при неполной загрузке канала может наблюдаться частичное или полное перекрытие поднесущих соседних базовых станций, мощность помехи от соседней базовой станции может зависеть от частоты вследствие частотной селективности широкополосного канала связи и/или индивидуального контроля мощности. Для приемников абонента с несколькими антеннами наличие сильных помех от соседних базовых станций, работающих в одном частотном диапазоне, также приводит к созданию пространственно-коррелированной помехи. При этом вследствие многолучевости распространения сигналов, пространственно-

коррелированные помехи, создаваемые соседними станциями, могут быть существенно частотно-селективными. Анализ помехоустойчивости OFDMA-систем радиосвязи, работающих в таких сложных сигнально-помеховых условиях, в известных работах не проводился.

С учетом вышесказанного, разработка новых эффективных методов обработки сигналов в приемнике абонента с одной или несколькими антенными элементами и исследование характеристик помехоустойчивости OFDMA-систем сотовой радиосвязи с учетом воздействия непреднамеренных помех от соседних базовых станций является актуальной задачей.

Для подавления непреднамеренных взаимных помех, возникающих из-за одновременной передачи нескольких потоков данных по пространственным подканалам в MIMO/OFDMA-системах, в принципе могут использоваться линейные алгоритмы пространственной обработки сигналов, аналогичные применяемым для подавления помех от соседних базовых станций (Paulraj A., Nabar R., Gore D., 2008). Однако эти алгоритмы учитывают только оценку пространственно-частотных параметров мешающего подканала и не используют другую, доступную в данном случае, информацию о характере помеховых сигналов (используемые модуляции и схемы кодирования). В существующей литературе для решения задачи разделения пространственных подканалов в основном рассматривались именно такие подходы. В тоже время, теоретически очевидно, что эффективность разделения пространственных подканалов в MIMO/OFDMA-системах можно попытаться повысить путем использования известной информации о характере одновременно передаваемых сигналов.

Таким образом, в MIMO/OFDMA-системах связи возникает задача разработки и анализа усовершенствованных алгоритмов разделения пространственных подканалов на стороне приемника абонента, использующих дополнительную информацию о структуре взаимных помеховых сигналов. При этом предлагаемые алгоритмы должны иметь приемлемую сложность для их практической реализации в приемнике абонента MIMO/OFDMA-системы сотовой радиосвязи.

Задачи работы

1. Разработка и исследование помехоустойчивости алгоритмов обработки кодированных сигналов с учетом параметров непреднамеренных помех для приемника абонента с одной антенной в сотовых системах радиосвязи с ортогональными поднесущими.
2. Разработка и исследование помехоустойчивости алгоритмов подавления непреднамеренных помех путем пространственной обработки сигналов в многоэлементной антенне приемника абонента в сотовых системах радиосвязи с ортогональными поднесущими.

3. Сравнительный анализ существующих алгоритмов подавления взаимных помех в пространственных подканалах ММО/OFDMA-систем радиосвязи.
4. Разработка и исследование характеристик новых усовершенствованных алгоритмов разделения пространственных подканалов в ММО/OFDMA-системах радиосвязи.
5. Оптимизация параметров передаваемых сигналов (схем кодирования и модуляции) в пространственных подканалах, с целью повышения пропускной способности ММО/OFDMA-систем радиосвязи.
6. Разработка вычислительно эффективных алгоритмов подавления взаимных помех пространственных подканалов в ММО/OFDMA-системах радиосвязи.

Методы исследований

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

Научная новизна

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

1. Предложены и исследованы новые оригинальные алгоритмы обработки кодированных сигналов в OFDMA-системах связи с ортогональными поднесущими, для приемников абонентов, использующих одну антенну и работающих при наличии частотно-селективных непреднамеренных помех от соседних мешающих станций.
2. Предложены и исследованы новые оригинальные приемники, использующие адаптивные антенны с несколькими элементами для OFDMA-систем связи, работающих при наличии взаимных частотно-селективных пространственно-коррелированных непреднамеренных помех от соседних мешающих станций.
3. Предложен и исследован оригинальный алгоритм последовательного декодирования сигнала в ММО/OFDMA-системе связи, использующей несколько пространственных подканалов одновременно, при наличии взаимных помех между ними. Выработано правило использования формата передачи данных (схемы модуляции и кодирования) в пространственных подканалах, позволяющее повысить эффективность работы таких ММО/OFDMA-систем связи.
4. Предложена оригинальная схема реализации максимально правдоподобного метода подавления взаимных непреднамеренных помех для пространственно-временной схемы кодирования с четырьмя передающими и двумя приемными антеннами (обобщение известной схемы пространственно-временного кодирования Аламоути с двумя передающими и одной приемной

антеннами), позволяющая существенно сократить вычислительные затраты при обработке принятого сигнала в ММО/OFDMA-системах связи.

Практическая значимость результатов

Практическая значимость результатов работы состоит в разработке новых эффективных алгоритмов подавления непреднамеренных помех, которые могут быть реализованы в приемниках абонентов современных и перспективных OFDMA и ММО/OFDMA-систем связи.

Обоснованность и достоверность

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается их сравнением с результатами, полученными с помощью математического моделирования, соответствием с опубликованными ранее результатами в этой области, а также отсутствием противоречий результатов диссертации с известными положениям теории статистической радиофизики и теории информации.

Положения, выносимые на защиту

Новые алгоритмы подавления непреднамеренных помех для приемника абонента с одной приемной антенной, учитывающие характеристики непреднамеренных помех в процедуре помехоустойчивого декодирования с «мягкими» решениями, в системах сотовой радиосвязи с ортогональными поднесущими. Результаты сравнительного анализа помехоустойчивости предложенных алгоритмов.

Новые алгоритмы подавления непреднамеренных помех для приемников с многоэлементными антеннами OFDMA-систем сотовой связи, учитывающие информацию о пространственно-частотной структуре помех при пространственной обработке сигналов. Результаты сравнительного анализа помехоустойчивости предложенных алгоритмов.

Алгоритм последовательного подавления взаимных помех между пространственными подканалами для максимально правдоподобного приемника ММО/OFDMA-системы радиосвязи. Правило использования формата передачи данных (схем кодирования и модуляции) в пространственных подканалах такой системы связи.

Схема максимально правдоподобного метода подавления взаимных непреднамеренных помех для пространственно-временной схемы кодирования с четырьмя передающими и двумя приемными антеннами (обобщение известной схемы пространственно-временного кодирования Аламоути с двумя передающими и одной приемной антеннами), позволяющая существенно сократить вычислительные затраты при обработке принятого сигнала в ММО/OFDMA-системах связи.

Апробация результатов и публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ. Среди них 5 статей в рецензируемых изданиях (“Известия вузов. Радиофизика” [1-3], “Вестник ННГУ. Серия Радиофизика” [4-5]), 3 работы, представляющие собой опубликованные материалы докладов на конференциях [6-8], и 1 патент на изобретение [9].

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

- Ежегодные научные конференции по радиофизике (ННГУ, Н. Новгород, май 2007 г.).
- Международные конференции (International Symposium on Wireless Communication Systems, ISWCS 2006 и Vehicular Technology Conference, VTC 2007).
- Регулярные конференции IEEE для разработчиков 802.16e и 802.16m (2005-2010 гг.).
- Регулярные конференции 3GPP для разработчиков LTE-A (2010-2012 гг.).

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 03-02-17141 (2003- 2005 гг.), НШ-1729.2003.2 (2003-2005 гг.) – “Ведущие научные школы”, ФЦНТП контракт № 02.445.11.7100 (2005 г.) и контракт № 02.740.11.0003 (2009-2011 гг.).

Личный вклад автора

Диссертант принимал непосредственное участие в получении всех результатов изложенных в диссертационной работе. Он участвовал в постановке задач, выполнении аналитических расчетов и математического моделирования, а также в обсуждении полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка сокращений. Общий объем диссертации составляет 99 страниц, включая 30 рисунков, 7 таблиц и список литературы из 80 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

В первой главе диссертации проведено исследование методов подавления непреднамеренных помех в OFDMA-системах сотовой радиосвязи для приемников абонентов с одной приемной антенной.

В разделе 1.1 проанализирован уровень непреднамеренных помех, создаваемых соседними базовыми станциями в OFDMA-системах сотовой радиосвязи. С помощью математического моделирования работы сотовой сети показано, что создаваемые непреднамеренные помехи являются одним из основных факторов ограничивающим эффективность работы системы в целом.

В разделе 1.2 изложены основные принципы построения OFDMA-систем сотовой радиосвязи. На примере современного стандарта IEEE 802.16e рассмотрена частотно-временная структура кадра (фрейма) передачи данных (см. Рис. 1). Показано, что с помощью обучающих опорных сигналов (преамбулы и пилотных поднесущих), а также самих информационных сообщений, возможна оценка основных параметров непреднамеренных помех (частотной характеристики канала помехи, индикатора перекрытия поднесущих, коэффициента контроля мощности), создаваемых соседними базовыми станциями.

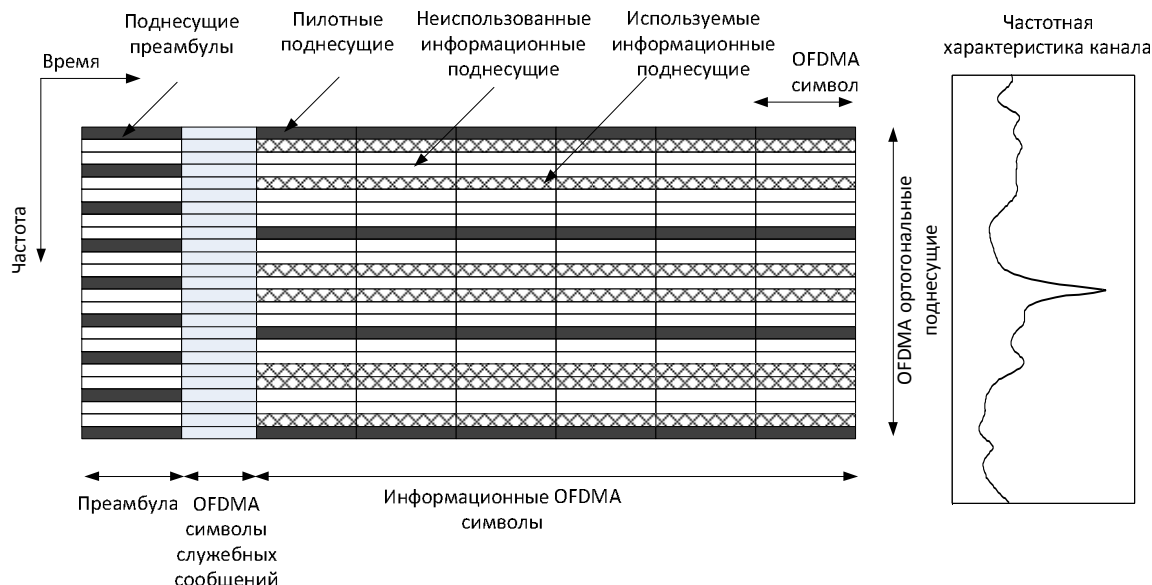


Рис. 1. Частотно-временная структура кадра (фрейма) передаваемых сигналов OFDMA-системы радиосвязи

В разделе 1.3 обсуждаются возможные методы обработки сигналов в присутствии непреднамеренных помех в приемниках с одной антенной. Предложены три оригинальных алгоритма (три типа приемников) для обработки кодированных сигналов, учитывающие характеристики непреднамеренных помех в процедуре помехоустойчивого декодирования с «мягкими» решениями. Исследуемые приемники используют различную априорную информацию о частотной структуре непреднамеренной помехи, которая используется при обработке принятого сигнала (см. Таблицу 1).

В разделе 1.4 приведены результаты математического моделирования предложенных алгоритмов. Проведено сравнительное исследование помехоустойчивости четырех типов приемников, использующих при

декодировании сигналов различную информацию о структуре непреднамеренной помехи. Показано, что для случая частичной загрузки канала и малого числа мешающих станций использование более «интеллектуальных» приемников (с оценкой параметров непреднамеренной помехи) приводит к существенному увеличению помехоустойчивости OFDMA-системы радиосвязи. В Таблице 1 показан выигрыш в отношении сигнал/помеха для различных типов приемников по сравнению с наиболее простым не использующим информацию о непреднамеренной помехе приемником (приемником 1.1).

Таблица 1. Сравнение помехоустойчивости различных типов приемников абонентов с одной антенной (относительный выигрыш в ОСП для заданной вероятности пакетной ошибки)

Тип приемника	33% перекрытие, контроль мощности	33% перекрытие	66% перекрытие	100% перекрытие	Информация, используемая при обработке принятого сигнала
1.1	0 дБ	0 дБ	0 дБ	0 дБ	Информация о канале обслуживающей станции
1.2	1 дБ	1 дБ	1 дБ	0,5 дБ	Информация о каналах обслуживающей и мешающих станций
1.3	11 дБ	8 дБ	2,5 дБ	0 дБ	Информация о канале обслуживающей станции, коэффициент контроля мощности и перекрытия поднесущих
1.4	14 дБ	12 дБ	4 дБ	0,5 дБ	Информация о каналах обслуживающей и мешающих станций коэффициент контроля мощности и перекрытия поднесущих

Во второй главе исследуются методы подавления непреднамеренных помех в OFDMA-системах сотовой радиосвязи, использующих на приемниках абонентов многоэлементные антенны.

В разделе 2.1 описана математическая модель принимаемого сигнала в OFDMA-системах радиосвязи для приемников с адаптивными многоэлементными антеннами при наличии непреднамеренных помех от N_{int} соседних базовых станций. Предполагается, что OFDMA-система радиосвязи функционирует в условиях частотно-селективных замираний. В этом случае

модель сигнала принимаемого абонентом на каждой поднесущей описывается следующим выражением

$$\mathbf{y} = \mathbf{h} \cdot s + \sum_{i=1}^{N_{\text{int}}} \mathbf{h}_i \cdot g_i \cdot s_i + \mathbf{n},$$

где \mathbf{y} – принятый сигнальный вектор (размерности N – число приемных антенных элементов), \mathbf{h} – комплексный вектор канала между обслуживающей базовой станцией и приемными антеннами абонента, s – переданный символ, \mathbf{h}_i – комплексный вектор канала между i -ой мешающей базовой станцией и абонентом, s_i переданный сигнал i -ой станцией, \mathbf{n} – случайный вектор собственных шумов в антенных элементах (шумы в антенных элементах предполагаются независимыми с одинаковой мощностью σ_n^2). Коэффициенты g_i задают мощность мешающего сигнала на рассматриваемой поднесущей с учетом возможного частичного перекрытия каналов обслуживающей и соседних станций.

Пространственная обработка в приемной адаптивной антенне заключается в оптимальном взвешивании и суммировании сигналов (на каждой поднесущей) с отдельных антенных элементов с помощью весового вектора \mathbf{w} :

$$\hat{s} = \mathbf{w}^H \cdot \mathbf{y}.$$

При полностью известной ковариационной матрице помех и шумов \mathbf{R} оптимальный весовой вектор выражается в следующем виде:

$$\mathbf{w}^H = (\mathbf{h}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{h})^{-1} \mathbf{h}^H \mathbf{R}^{-1}.$$

В заключение раздела обсуждены основные способы определения параметров непреднамеренных помех и использования их для оценки ковариационной матрицы \mathbf{R} .

В разделе 2.2 рассматриваются возможные практические способы реализации пространственной обработки сигналов в приемниках с многоэлементными адаптивными антеннами. Предложены четыре новых алгоритма (четыре типа приемников) для пространственной обработки сигналов в присутствии непреднамеренных помех. Рассматриваемые приемники для вычисления ковариационной матрицы помех и шумов \mathbf{R} используют различную степень априорной информированности о пространственно-частотной структуре помехи. Информация, используемая при обработке сигналов в различных типах приемников, приведена в Таблице 2.

В разделе 2.3 приведен сравнительный анализ помехоустойчивости рассмотренных типов приемников с многоэлементными адаптивными антеннами. Показано, что для случая малого числа мешающих станций использование приемников, проводящих более подробную оценку пространственно-частотных и временных параметров непреднамеренных помех, приводит к существенному увеличению помехоустойчивости OFDMA-систем радиосвязи.

Таблица 2. Сравнение помехоустойчивости различных типов приемников абонентов с адаптивной антенной
(относительный выигрыш в ОСП для заданной вероятности пакетной ошибки)

Тип приемника	33% перекрытие, 1 мешающая станция	66% перекрытие, 1 мешающая станция	100% перекрытие, 1 мешающая станция	100% перекрытие, 2 мешающие станции	Информация, используемая при обработке принятого сигнала
2.1	0 дБ	0 дБ	0 дБ	0 дБ	Информация о канале обслуживающей станции
2.2	1 дБ	1 дБ	1 дБ	0,5 дБ	Информация о канале обслуживающей станции. Средняя мощность помехи на поднесущей.
2.3	1,5 дБ	1,5 дБ	1,5 дБ	1 дБ	Информация о канале обслуживающей станции. Мощность помехи на отдельном антенном элементе.
2.4	1 дБ	1 дБ	0,5 дБ	0,5 дБ	Информация о канале обслуживающей станции. Среднее значение ковариационной матрицы помехи.
2.5	9 дБ	10 дБ	10 дБ	2 дБ	Информация о канале обслуживающей станции. Мгновенное значение ковариационной матрицы помехи.

В Таблице 2 показан выигрыш в отношении сигнал/помеха для различных типов приемников по сравнению с наиболее простым приемником 2.1, не использующим информацию о параметрах непреднамеренной помехи и

осуществляющим обработку сигналов в многоэлементной адаптивной антенне в соответствии с критерием максимизации отношения сигнал/шум.

Третья глава диссертации посвящена исследованию методов подавления взаимных непреднамеренных помех, используемых для решения задачи разделения сигналов, одновременно передаваемых по нескольким пространственным подканалам в MIMO/OFDMA-системах радиосвязи.

В разделе 3.1 рассмотрены основные принципы передачи и приема сигналов в MIMO/OFDMA-системах радиосвязи. Для примера типичная структурная схема реализации простой MIMO/OFDMA-систем радиосвязи с двумя передающими и двумя приемными антеннами приведена на Рис. 2.

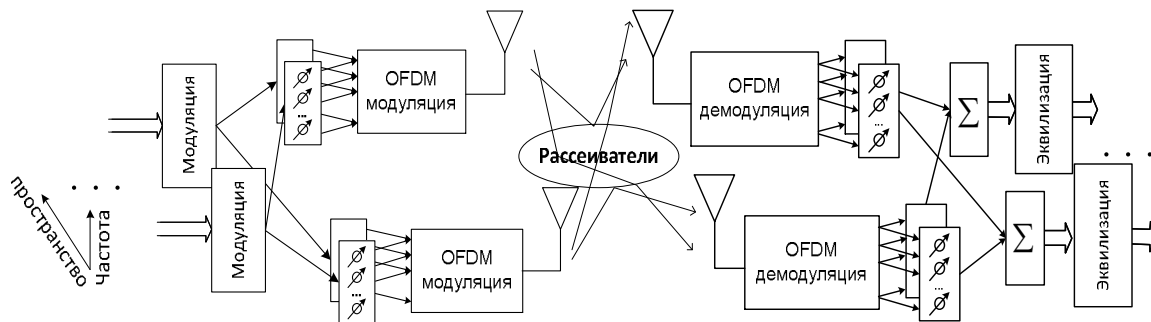


Рис. 2. Структурная схема MIMO/OFDMA-системы радиосвязи

На рисунке схематично показаны процедуры формирования двух независимых пространственных подканалов и их последующего разделения, с помощью линейной весовой обработки сигналов на каждой поднесущей как на стороне передатчика, так и на стороне приемника.

В разделе 3.2 проведен сравнительный анализ помехоустойчивости двух MIMO-приемников, реализующих разделение сигналов в пространственных подканалах по критерию наименьших квадратов (Zero-Forcing – ZF) и критерию максимального-правдоподобия (ML – Maximum Likelihood). Показано, что ML MIMO-приемник, дополнительно использующий информацию о модуляции в пространственных подканалах для повышения эффективности подавления взаимных помех, выигрывает около 4-7 дБ в отношении сигнал/шум для низких порядков M-QAM модуляций (BPSK и QPSK). Однако для высоких порядков M-QAM модуляций (16-QAM и 64-QAM) этот выигрыш уменьшается до 2-4 дБ.

В разделе 3.3 проведен анализ помехоустойчивости MIMO-приемника, реализующего обработку сигналов по критерию минимума среднеквадратичной ошибки (Minimum Mean Square Error – MMSE). Было показано, что MMSE MIMO-приемник, дополнительно использующий информацию о мощности собственного шума, выигрывает около 3-4 дБ в отношении сигнал/шум по сравнению с ZF MIMO-приемником для низких порядков M-QAM модуляций (BPSK и QPSK). Однако для высоких порядков

модуляций (16-QAM и 64-QAM) эти приемники становятся практически эквивалентными. Сравнительный анализ помехоустойчивости MMSE и ML MIMO-приемников показывает, что ML MIMO-приемник для всех используемых модуляций имеет выигрыш около 2-3 дБ в отношении сигнал/шум.

В разделе 3.4 предложена схема усовершенствованного ML MIMO-приемника с последовательным подавлением взаимных непреднамеренных помех, использующая информацию о формате передачи данных в пространственных подканалах. Приведены результаты сравнения помехоустойчивости обычной схемы ML MIMO-приемника и новой схемы ML MIMO-приемника с последовательным подавлением взаимных помех. Выработано правило использования формата передачи данных (схемы модуляции и кодирования) в пространственных подканалах, позволяющее повысить эффективность работы таких MIMO/OFDMA-систем связи. Показано, что новая схема обработки сигналов обеспечивает выигрыш в спектральной эффективности системы связи около 10-20% при отношениях сигнал/шум (>20 дБ), необходимых для реализации эффективной параллельной передачи данных по нескольким пространственным подканалам (см. Рис. 3).

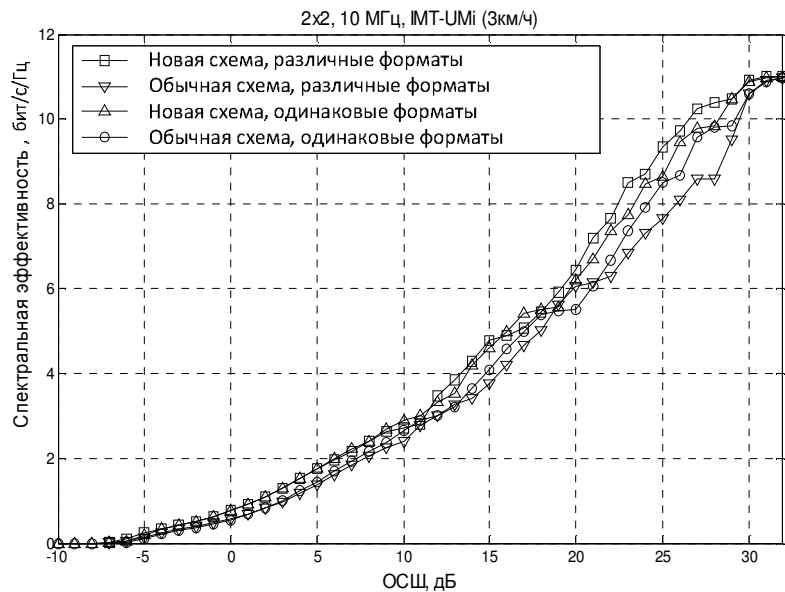


Рис. 3. Спектральные эффективности MIMO/OFDMA-системы связи с различными и одинаковыми форматами передачи данных в пространственных подканалах при использовании обычной схемы ML MIMO-приемника и новой схемы ML MIMO-приемника с последовательным подавлением помех

В разделе 3.5 обсуждается сложность реализации максимально правдоподобного разделения сигналов в пространственных подканалах MIMO/OFDMA-систем радиосвязи. Для стандартной схемы системы радиосвязи с четырьмя передающими и двумя приемными антеннами

(обобщение известной схемы пространственно-временного кодирования Аламоути (Alamouti S.M., 1998)) предлагается использовать оригинальный алгоритм, реализующий максимально правдоподобный метод подавления взаимных непреднамеренных помех. Показано, что предложенный алгоритм позволяет существенно сократить вычислительные затраты (более чем в 4 раза в зависимости от используемой модуляции) при обработке принятых сигналов.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы и выводы.

В **приложении** дан список условных сокращений, используемых в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Реализована модель физического уровня сотовой OFDMA-системы радиосвязи с ортогональными поднесущими, описывающая работу системы при наличии частотно-селективных пространственно-коррелированных непреднамеренных помех, создаваемых соседними базовыми станциями. С помощью данной модели проведено подробное исследование помехоустойчивости системы радиосвязи для различных схем и алгоритмов подавления непреднамеренных помех.

2. Предложены и исследованы новые алгоритмы подавления непреднамеренных помех в OFDMA-системах радиосвязи для приемников абонентов с одной приемной антенной, учитывающие характеристики непреднамеренных помех в процедуре помехоустойчивого декодирования с «мягкими» решениями. Результаты сравнительного анализа помехоустойчивости предложенных алгоритмов показывают что, в условиях частичной загрузки канала, предложенные алгоритмы, имеют существенное преимущество (выигрыш до 14 дБ в отношении сигнал/помеха) перед более простыми приемниками, не осуществляющими оценку параметров непреднамеренных помех.

3. Предложены и исследованы новые приемники, использующие многоэлементные адаптивные антенны, позволяющие за счет использования дополнительной информации о пространственно-частотной структуре непреднамеренных помех в определенных сценариях (с небольшим числом сильно мешающих соседних станций) получить выигрыш в отношении сигнал/помеха до 10 дБ по отношению к простым приемникам, не осуществляющим эту оценку.

4. Предложен и исследован новый алгоритм максимально правдоподобной оценки сигнала с последовательным подавлением взаимных помех от пространственных подканалов для MIMO/OFDMA-систем радиосвязи. Показано, что путем использования дополнительно доступной информации о формате передачи данных (модуляции и схеме кодирования) в мешающем подканале, предложенный алгоритм обеспечивает повышение спектральной эффективности системы связи до 10-20%. Выработано правило использования

формата передачи данных в пространственных подканалах, позволяющее повысить эффективность работы таких ММО/OFDMA-систем связи.

5. Предложена новая схема реализации максимально правдоподобного метода подавления взаимных непреднамеренных помех для пространственно-временной схемы кодирования с четырьмя передающими и двумя приемными антеннами (обобщение известной схемы пространственно-временного кодирования Аламоути), позволяющая существенно сократить вычислительные затраты (более чем в 4 раза в зависимости от вида модуляции) при обработке принятого сигнала в ММО/OFDMA-системах связи по сравнению с прямым методом реализации максимально правдоподобного ММО-приемника.

СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Давыдов, А. В. Анализ помехоустойчивости OFDMA-систем связи, работающих при наличии интерферирующих станций / А. В. Давыдов, А. А. Мальцев // Известия вузов. Радиофизика. – 2007. – Т.60, № 6. – С. 533-543.
2. Давыдов, А. В. Анализ методов подавления помех в OFDMA-системах, использующих приемные адаптивные антенные решетки / А. В. Давыдов, А. А. Мальцев // Известия вузов. Радиофизика. – 2011. – Т.54, № 6. – С. 474-484.
3. Давыдов, А. В. Анализ метода разделения пространственных каналов с последовательным подавлением интерференции для современных МИМО/OFDMA-систем сотовой связи / А. В. Давыдов, А. А. Мальцев // Известия вузов. Радиофизика. – 2011. – Т.54, № 5. – С. 381-390.
4. Давыдов, А. В. Сравнительный анализ методов детектирования сигналов в МИМО-OFDM системах связи / А. В. Давыдов, А. А. Мальцев // Вестник ННГУ. Серия Радиофизика. – 2004. – № 1. – С. 80-86.
5. Давыдов, А. В. MMSE метод детектирования пространственных сигналов в МИМО-OFDM системах связи / А. В. Давыдов, А. А. Мальцев // Вестник ННГУ. Серия Радиофизика. – 2005. – № 1. – С. 102-108.
6. Tiraspol'sky, S. Mobile WiMAX – Deployment Scenarios Performance Analysis / Tiraspol'sky S., Rubtsov A., Maltsev A., Davydov A. // Proceedings 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), September 2006. – P. 353-357.
7. Srinivasan, R. Downlink Spectral Efficiency of Mobile WiMAX / R. Srinivasan, S. Timiri, A. Davydov, A. Papathanassiou // Vehicular Technology Conference (VTC), April 2007. – P. 2786-2790.
8. Давыдов, А. В. Быстрый алгоритм максимально правдоподобной демодуляции пространственно-временных квазиортогональных кодов / А. В. Давыдов, А. А. Мальцев // Труды (одиннадцатой) научной конференции по радиофизике. 7 мая 2007. – Ред. А. В. Якимов. – Нижний Новгород: ТАЛАН, 2007. – С. 138-140.
9. Патент 20050190800 США. Method and apparatus for estimating noise power per subcarrier in a multicarrier system / Maltsev A., Davydov A., Sadri A.

ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

ГЛАВА I. ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ В OFDMA-СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ ДЛЯ ПРИЕМНИКОВ С ОДНОЙ АНТЕННОЙ

- 1.1. Анализ уровня непреднамеренных помех в сотовых системах радиосвязи
- 1.2. Основные принципы построения OFDMA-системы радиосвязи и методы оценки параметров сигналов и помех
- 1.3. Оптимальная обработка сигналов в присутствии непреднамеренных помех в приемниках с одной антенной
- 1.4. Анализ помехоустойчивости OFDMA-систем радиосвязи для приемников с одной антенной
- 1.5. Заключение по первой главе

ГЛАВА II. МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ В OFDMA-СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПРИЕМНИКИ С МНОГОЭЛЕМЕНТНЫМИ АДАПТИВНЫМИ АНТЕННАМИ

- 2.1. Оптимальная пространственная обработка сигналов в OFDMA приемниках с адаптивными антеннами
- 2.2. Практические методы обработки сигналов в приемниках с адаптивными антеннами при различных априорных предположениях о пространственно-частотной структуре непреднамеренных помех
- 2.3. Сравнительный анализ помехоустойчивости различных типов OFDMA-приемников с многоэлементными адаптивными антеннами
- 2.4. Заключение по второй главе

ГЛАВА III. ПОДАВЛЕНИЕ ВЗАИМНЫХ ПОМЕХ В ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПОДКАНАЛАХ MIMO/OFDMA-СИСТЕМ СВЯЗИ

- 3.1. Модель MIMO/OFDMA-системы радиосвязи с несколькими пространственными подканалами
- 3.2. Сравнительный анализ помехоустойчивости MIMO-приемников, реализующих разделение сигналов в пространственных подканалах по критериям наименьших квадратов (ZF) и максимального правдоподобия (ML)
- 3.3. Анализ помехоустойчивости MIMO-приемника, реализующего обработку сигналов по критерию минимума среднеквадратичной ошибки (MMSE)
- 3.4. Максимально-правдоподобный MIMO-приемник, использующий метод последовательного подавления взаимных помех

- 3.5. Эффективная реализация алгоритма максимально правдоподобного разделения пространственных подканалов для MIMO/OFDMA-системы связи с четырьмя передающими и двумя приемными антеннами
- 3.6. Заключение по третьей главе

Заключение

Список литературы

Список сокращений