

Аверин Илья Михайлович

**ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ
С АДАПТИВНЫМИ АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ
ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ИНФОРМАЦИИ
И ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ
В УСЛОВИЯХ МНОГОЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН**



05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Нижний Новгород – 2006

Работа выполнена в Нижегородском государственном техническом университете

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Плужников А.Д.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Крылов В.В.
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Турчин В.И.

Ведущая организация

ОАО «Правдинское конструкторское бюро» (Нижегородская обл.)

Защита состоится « 11 » мая 2006 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д212.165.01 в Нижегородском государственном техническом университете по адресу: 603600, г. Н. Новгород, ГСП-41, ул. Минина, 24.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Нижегородского государственного технического университета

Автореферат разослан « » 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Калмык В.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

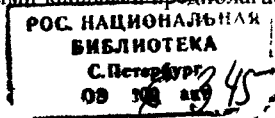
Актуальность темы диссертации. В настоящее время наблюдается интенсивное развитие цифровых систем беспроводной связи, и важнейшим направлением исследований в данной области является повышение их эффективности, то есть увеличение скорости передачи данных и количества обслуживаемых пользователей. Как правило, подобные системы связи работают в сложных условиях многолучевого распространения радиоволны, которое возникает вследствие рассеивающего характера среды распространения и приводит к замираниям принимаемых сигналов.

Скорость передачи данных и количество обслуживаемых пользователей могут быть увеличены, например, за счет расширения используемой частотной полосы. Скорость передачи данных возрастает также при увеличении 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 требований биологической защиты и энергосбережения. Таким образом, задачи повышения эффективности современных систем беспроводной связи необходимо решать при жестких ограничениях на выделенные ресурсы. Поэтому одним из наиболее перспективных подходов к решению этих задач является использование антенных решеток (АР). Применение АР позволяет расширить также функциональные возможности систем связи.

Актуальность темы диссертации подтверждается пристальным вниманием, проявляемым к использованию АР со стороны ведущих компаний-производителей телекоммуникационного оборудования, таких как Samsung, Nokia, Intel, Nortel Networks и прочих, принимающих активное участие в разработке стандартов на системы беспроводной связи. В частности, разворачиваемые в настоящее время системы связи 3-го поколения (стандарты UMTS и CDMA2000), предусматривают использование АР как в составе оборудования базовых станций (БС), так и в составе мобильных терминалов (пользователей).

Целью работы является повышение эффективности и расширение функциональных возможностей цифровых систем беспроводной связи за счет использования АР.

Состояние рассматриваемых вопросов. С точки зрения повышения скорости передачи данных наиболее перспективным является применение АР на обеих сторонах канала связи, когда существенное увеличение скорости передачи данных достигается за счет оптимизации не только приема, но и передачи потоков информации. Адаптивная пространственная обработка сигналов при передаче и приеме может быть реализована с использованием сингулярного разложения канальной матрицы (матрицы коэффициентов передачи между элементами передающей и приемной АР). При этом в качестве весовых векторов пространственной обработки используются собственные векторы канальной матрицы, благодаря чему формируются независимые каналы передачи информации. Каждый такой собственный канал соответствует одному из собственных векторов. Построение системы с собственными каналами предполагает наличие



обратной связи, необходимой для сообщения информации о состоянии канала связи на передающую сторону.

Системы связи с передачей информации по собственным каналам обеспечивают наибольшую пропускную способность (ПС) при заданной мощности передатчика и в заданной полосе частот. В частности, для случайного релейского канала связи показано, что ПС системы увеличивается пропорционально количеству элементов AP. Кроме того, информация по каждому из собственных каналов передается независимо, что дает возможность представить подобную многоканальную систему как совокупность независимых одноканальных систем и значительно упростить процедуру оценивания переданных символов. Однако многие аспекты обработки сигналов в системах связи с собственными каналами являются недостаточно исследованными, и имеется широкий круг задач, требующих своего решения.

Построение системы с собственными каналами невозможно без знания канальной матрицы. Оценивание этой матрицы производится с использованием, как правило, специальных обучающих последовательностей. На практике всегда имеются ошибки оценивания, которые обусловлены влиянием собственных шумов и конечной длиной обучающих последовательностей. Поэтому возникает задача анализа влияния ошибок оценивания канальной матрицы на ПС системы с собственными каналами.

ПС системы связи, определенная Шенноном, является теоретическим пределом увеличения скорости безошибочной передачи данных и достигается при использовании достаточно сложной модуляции. Существующие системы беспроводной связи используют более простые виды модуляции, и другим важным критерием эффективности системы является уровень вероятности битовой ошибки. Для увеличения скорости передачи данных при сохранении заданной вероятности битовой ошибки используются адаптивный контроль мощности излучения (АКМ) и/или адаптивная модуляция и кодирование (АМК). Реализация АКМ и АМК предполагает, что на передающей стороне известно отношение мощности сигнала к мощности шума (ОСШ) в точке приема. Такая информация может быть передана по каналу обратной связи. Однако это приводит к тому, что значение ОСШ становится известным на передающей стороне с некоторой задержкой. В условиях многолучевости принимаемый сигнал подвержен замираниям и скорость изменения его уровня определяется скоростью изменения состояния (коэффициента передачи) канала связи. Поэтому указанная задержка может существенно ограничивать эффективность АКМ и АМК. Одним из возможных решений проблемы является осуществление предсказания состояния канала связи, и поэтому, представляет интерес разработка простого и эффективного алгоритма предсказания.

Особенностью систем мобильной связи является различие в количестве элементов передающей и приемной AP. Для перспективных систем, как правило, предполагается, что количество элементов AP в составе БС существенно превышает количество аналогичных элементов у мобильного пользователя. Достаточно часто пользователь имеет единственную антенну. Поэтому имеется

возможность повысить эффективность системы связи за счет независимого об- живания многих пользователей путем их пространственного разделения.

Известные методы пространственного разделения основаны, как правило, на использовании информации о направлении прихода сигналов от пользова- лей. Однако оценивание направления прихода сигналов в условиях случайной среды распространения радиоволн, когда пользователь может представлять со- бой протяженный источник с достаточно большими угловыми размерами и с флуктуирующим центром излучения, является отдельной сложной задачей. Пространственное разделение пользователей без использования информации о направлении прихода сигналов может быть организовано, например, за счет применения проекционного метода, основанного на процедуре ортогонализа- ции весовых векторов пространственной обработки сигналов на БС. Проекци- онный метод обладает высокой эффективностью, поэтому представляют инте- рес детальное его исследование, то есть определение аналитических выраже- ний, позволяющих изучить влияние параметров системы с пространственным разделением пользователей на ее эффективность, а также анализ вычислитель- ной сложности пространственной обработки сигналов в такой системе.

Применение AP в составе БС позволяет не только существенно повысить эффективность передачи информации, но и расширить также функциональные возможности систем связи. Одной из важнейших задач повышения функцио- нальности систем связи является задача определения местоположения мобиль- ных пользователей. Она вызвана появлением новых видов услуг, требующих знания местоположения пользователя (например, целевая пересылка различной информации), а также требованиями со стороны специальных служб (полиции, служба спасения и т.д.). Особенный интерес представляет задача определения местоположения пользователя в условиях города.

Определение местоположения пользователя может быть реализовано на основании измерений уровня, времени или угла прихода сигнала от пользова- теля на БС. Основное преимущество такого подхода состоит в том, что не тре- буются какие-либо изменения и дополнения в связанном оборудовании пользова- телей. При широком использовании AP наибольшее внимание привлекает три- ангуляционный метод определения местоположения. В его основе лежит пред- положение о том, что угол прихода сигнала на БС определяет направление на пользователя (линию пеленга), а местоположение пользователя на плоскости определяется пересечением двух или более линий пеленга (при использовании нескольких БС).

Эффективность оценивания местоположения пользователей в значитель- ной степени зависит от точности измерения их пеленгов. Городские условия распространения радиоволн являются типичным примером рассеивающей сре- ды, когда сигнал, излучаемый пользователем и принимаемый БС, является суммой многих отраженных от рассеивателей сигналов. При этом, как правило, антенна БС расположена на высоких зданиях, а антенна пользователя – вблизи земной поверхности и окружена рассеивателями. Поэтому направления прихо- да сигнала на антенну БС сосредоточены в некотором секторе углов, а прямая видимость между БС и пользователем часто отсутствует. В этом случае высо-

кая точность определения углов прихода отдельных сигналов не гарантирует точности пеленгации пользователя в целом. Поэтому привлекает внимание использование достаточно простого и эффективного суммарно-разностного метода. Кроме того, при исследовании эффективности методов пеленгации пользователя представляет интерес разработка модели канала связи, адекватно отражающей городские условия распространения радиоволн.

Другим важным фактором, влияющим на точность определения местоположения, является взаимное размещение БС и пользователя. Местоположение пользователя на плоскости однозначно определяется пересечением двух линий пеленга, то есть для оценки местоположения достаточно использования двух БС. Однако, как правило, существует возможность использования большего количества БС. Вероятность того, что сигнал пользователя принимается как минимум тремя БС сети сотовой связи, оценивается в 75%, а четырьмя БС – в 30%. Поэтому представляет интерес повышение точности оценки местоположения пользователя за счет использования дополнительной информации, получаемой от третьей БС.

Задачи диссертационной работы:

1. Анализ влияния ошибок оценивания канальной матрицы на эффективность системы связи с параллельной передачей информации по собственным каналам.

2. Разработка алгоритма предсказания состояния канала связи, обладающего приемлемой эффективностью при достаточно простой практической реализации.

3. Исследование проекционного метода пространственного разделения пользователей.

4. Разработка способа пеленгации мобильного пользователя в условиях многолучевости, соответствующих городской среде распространения.

5. Исследование возможностей определения местоположения пользователей в сети связи по их пеленгам.

Положения, выносимые на защиту:

1. Дополнительная мощность, необходимая для компенсации энергетических потерь, возникающих из-за ошибок оценивания канальной матрицы, прямо пропорциональна количеству элементов передающей антенной решетки, обратно пропорциональна длине обучающей последовательности и практически не зависит от количества элементов приемной антенной решетки.

2. Состояние канала связи с замираниями сигналов (набор соответствующих коэффициентов передачи) может быть эффективно предсказано путем полиномиальной экстраполяции во времени значений мощности процесса на выходах элементов приемной антенной решетки при достаточно простой практической реализации.

3. Использование проекционного метода, обеспечивающего пространственное разделение пользователей в условиях рассеивающей среды, при оптимизации количества разделяемых пользователей позволяет значительно увеличить пропускную способность системы с собственными каналами.

4. Такие характеристики многолучевого канала связи между пользователем и базовой станцией, как плотность вероятности углов прихода сигнала и дисперсия флуктуаций центра излучения протяженного источника (пользователя, окруженного рассеивателями), в городских условиях адекватно описываются гауссовской статистической моделью и определяют точность измерения пеленга пользователя.

5. Результаты применения триангуляционного метода в системах связи, работающих в условиях города, удовлетворяют существующим требованиям к точности определения местоположения пользователя, причем использование третьей базовой станции позволяет увеличить точность на (30-50)% по сравнению со случаем двух базовых станций.

Научная новизна работы состоит в том, что:

1. Определение пропускной способности системы с собственными каналами, в отличие от известных работ, проведено при анализе влияния ошибок оценивания канальной матрицы.

2. Впервые предложен полиномиальный предсказатель состояния канала связи с замираниями сигналов.

3. Исследование проекционного метода пространственного разделения пользователей в системе с собственными каналами, в отличие от известных, позволяет найти аналитические выражения для среднего ОСШ на выходе собственных каналов и средней пропускной способности системы связи.

4. Результаты исследования многолучевого канала связи между пользователем и базовой станцией в городских условиях аналитически определяют выражения для плотности вероятности углов прихода сигнала на базовую станцию и дисперсии флуктуаций центра излучения протяженного источника, которые отличаются от известных тем, что достаточно хорошо совпадают с результатами измерений.

5. Предложена модификация суммарно-разностного метода пеленгации, которая, в отличие от известных реализаций метода, основана на использовании пеленгационных характеристик, согласованных с многолучевым каналом связи.

6. Исследование эффективности оценивания местоположения мобильного пользователя в условиях города отличается от известных тем, что имеет результатом аналитическую зависимость эффективности оценивания от точности пеленгации пользователя и параметров сети связи.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Предложен алгоритм полиномиального предсказателя, обеспечивающий возможность эффективного использования адаптивных модуляции и кодирования в реальных системах связи, для которых характерны задержки обновления информации о состоянии канала (скорость передачи данных увеличивается на 20-30%).

2. Полученные аналитические выражения позволяют осуществить выбор оптимальных значений параметров системы с пространственным разделением

пользователей и таким образом увеличить полную пропускную способность системы (в 3-5 раз при современных параметрах антенных систем).

3. Предложена модификация суммарно-разностного метода, которая позволяет осуществить пеленгацию мобильных пользователей в условиях многолучевости и сравнительно просто выполняется на основе компонентов реальных систем связи.

4. Предложен алгоритм квазиоптимального оценивания местоположения пользователя при использовании трех БС, для которого характерны простота реализации и достаточно высокая эффективность (точность определения местоположения лишь на 10% хуже по сравнению с алгоритмом максимального правдоподобия).

Методы исследования. Все представленные в диссертационной работе аналитические результаты были получены с использованием теории статистической радиотехники и теории информации. Экспериментальные исследования выполнены методом математического моделирования.

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

Реализация и внедрение результатов: Полиномиальный предсказатель состояния канала связи с замираниями сигналов, проекционный метод пространственного разделения пользователей, модифицированный суммарно-разностный метод пеленгации пользователя в условиях многолучевости и алгоритмы определения местоположения мобильных пользователей внедрены в ООО «Мера-НН». Гауссовская модель многолучевого канала связи в городских условиях внедрена в Центре беспроводных систем связи при Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского. Полученные научные результаты используются в Нижегородском государственном техническом университете в учебном процессе при изучении дисциплины «Радиотехнические системы передачи информации».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных мероприятиях:

1. 10-я Всероссийская научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве», НГТУ, Н. Новгород, декабрь 2003 г.

2. 6-я научная конференция по радиофизике, ННГУ, Н. Новгород, май 2002 г.

3. 7-я научная конференция по радиофизике, ННГУ, Н. Новгород, май 2003 г.

4. 4th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'03), Sevastopol, Ukraine, September 2003.

5. 10-я международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь», Воронеж, апрель 2004 г.

6. Международная научная конференция «Теория и техника передачи, приема и обработки информации», Туапсе, сентябрь 2004 г.

7. 13th European Signal Processing Conference, Antalya, September 2005.

8. 12-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», Москва, март 2006 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 4 статьи и патент на изобретение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, пяти разделов и заключения. Она содержит 145 страниц основного текста, библиографию из 116 наименований, 60 рисунков, 4 таблицы и два приложения (расшифровка используемых сокращений, сведения о практическом использовании результатов).

Во введении дана краткая характеристика диссертационной работы, в частности, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первом разделе диссертации рассматриваются системы связи, использующие адаптивные передающую и приемную АР для формирования независимых параллельных каналов передачи информации. Формирование таких каналов обеспечивается за счет использования в качестве весовых векторов пространственной обработки собственных векторов канальной матрицы. Приводятся известные выражения для пространственной обработки сигналов в системах связи с передачей информации по собственным каналам.

Анализируются потенциальные характеристики систем с собственными каналами при частотно-неселективном канале связи. ПС таких систем связи равна сумме ПС всех собственных каналов. Потенциальные характеристики соответствуют точному знанию канальной матрицы как на передающей, так и приемной сторонах. Подтверждается, что в условиях релейского канала ПС системы связи с передачей информации по собственным каналам значительно выше, чем ПС системы с одной передающей и одной приемной антенной.

Указывается, что ПС системы с собственными каналами зависит от способа распределения мощности передатчика по формируемым собственным каналам. Рассматриваются два варианта распределения мощности по собственным каналам: оптимальное распределение и равномерное распределение. Приводятся результаты моделирования, показывающие, что в условиях релейского канала применение вместо оптимального более простого равномерного распределения не приводит к значительному уменьшению ПС системы.

Проводится анализ вычислительной сложности реализации адаптивной пространственной обработки на базе сингулярного разложения канальной матрицы. Устанавливается, что вычислительная сложность, определяемая как требуемое количество n операций сложения и умножения, определяется соотношением:

$$n \approx 100(M^3 + N^3), \quad (1)$$

где M и N – количество элементов передающей и приемной АР, соответственно.

Во втором разделе проводится исследование влияния ошибок оценивания канальной матрицы на эффективность системы с собственными каналами. Ошибки оценивания канальной матрицы обусловлены конечной длиной обучающих последовательностей и воздействием собственных шумов приемника. Анализ проводится при допущении, что для оценивания используются ортогональные обучающие последовательности, а мощность передатчика распределяется равномерно между элементами передающей АР.

Доказывается, что ошибки оценивания канальной матрицы приводят к нарушению ортогональности собственных каналов, то есть являются причиной возникновения взаимных помех между собственными каналами и уменьшения их коэффициентов передачи. Определяются аналитические выражения для средних значений коэффициентов передачи мощности собственными каналами, средних значений коэффициентов передачи мощности между каналами (количественной характеристики взаимных помех), средней ПС системы в зависимости от длины обучающей последовательности, ОСШ и количества элементов передающей и приемной АР. Представлено сравнение полученных результатов и результатов математического моделирования.

Устанавливается, что неточное оценивание канальной матрицы приводит к возникновению ошибок определения оптимальных весовых коэффициентов пространственной обработки и к соответствующим энергетическим потерям. Эти потери определяют дополнительное увеличение мощности передатчика, необходимое для сохранения заданной ПС. Получено, что при малых ошибках оценивания величина энергетических потерь определяется как

$$\gamma = 1 + (K - 1)MK^{-1}L^{-1}, \quad (2)$$

где K – количество собственных каналов, L – длина обучающей последовательности.

Предложен полиномиальный предсказатель состояния канала с замираниями сигналов. Его использование позволяет преодолеть негативное влияние задержек обновления информации о состоянии канала на эффективность адаптивной регулировки мощности и адаптивной модуляции/кодирования. Предсказание осуществляется за счет полиномиальной экстраполяции во времени значений мощности процесса на выходах элементов приемной АР. Незвестные коэффициенты полинома определяются с использованием метода наименьших квадратов. Даются рекомендации по выбору степени полинома. Математическое описание алгоритма приводится в компактной матричной форме.

Для улучшения характеристик предсказания предлагается предварительная процедура сглаживания собственного шума. При использовании такой процедуры отсчеты мощности процесса на выходах элементов приемной АР разбиваются на группы, и для каждой из этих групп определяется среднее значение. Полученные усредненные значения используются далее при полиномиальной экстраполяции. Проводится детальное исследование предложенной процедуры. Доказывается, что результат применения процедуры сглаживания эквивалентен увеличению ОСШ с коэффициентом, равным количеству усредняемых выбо-

рок. Аналитически определяется максимально возможное количество усредняемых выборок.

Для канала связи с релеевскими замираниями сигналов оценивается эффективность полиномиального предсказателя. Оказывается, что в условиях канала связи с релеевскими замираниями сигналов оптимальным является использование квадратичного полинома. Величина компенсируемых за счет предсказания задержек (время предсказания) не превосходит времени корреляции замираний сигналов. Представлены результаты, показывающие, что применение полиномиального предсказателя приводит к увеличению скорости передачи данных на 20% по сравнению с алгоритмом "без предсказания", использующего вместо предсказанного значения текущее значение уровня принимаемого сигнала. Анализируется вычислительная сложность предложенного алгоритма.

В третьем разделе диссертации рассматривается повышение эффективности систем связи с передачей информации по собственным каналам за счет увеличения количества обслуживаемых пользователей. Исследуется проекционный метод пространственного разделения пользователей, не требующий оценки направлений прихода сигналов и основанный на ортогонализации весовых векторов пространственной обработки сигналов на БС. Проводится детальный анализ эффективности системы с собственными каналами, обслуживающей двух пользователей. Рассматриваются случаи с разделением и без разделения пользователей. Определяется энергетический выигрыш, который появляется за счет пространственного разделения пользователей. Представлены аналитические соотношения, определяющие среднее отношение мощности сигнала к суммарной мощности шума и помехи (ОСШП) на выходе заданного собственного канала и среднюю ПС системы для канала связи с релеевскими замираниями сигналов и канала без замираний.

Рассматривается также пространственное разделение произвольного количества пользователей и проводится оценивание соответствующей вычислительной сложности. Представлены приближенные аналитические соотношения

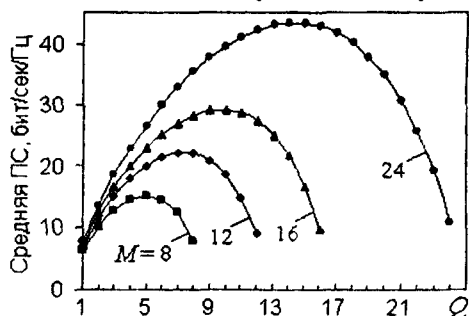


Рис 1

для средних значений ОСШ и ПС системы в канале с релеевскими замираниями сигналов, справедливые для произвольных значений количества элементов передающих и приемных АР. Представленные соотношения позволяют определить оптимальные значения параметров системы.

Приводятся результаты, показывающие увеличение эффективности системы связи при пространственном разделении пользователей. Это иллюстрируется рис. 1, на котором

представлена средняя ПС в зависимости от количества Q разделяемых пользователей, каждый из которых имеет единственную антенну, для различного ко-

личества M элементов АР БС. Мощность передатчика БС считается фиксированной и соответствующей ОСШ 10 дБ при $Q=1$.

Четвертый раздел диссертации посвящен задаче пеленгации пользователя в условиях многолучевого канала связи. Предлагается модель канала связи между пользователем и БС в городских условиях, когда пользователь находится в окружении большого количества рассеивателей, а антенна БС поднята выше окружающих ее предметов, причем с увеличением расстояния от пользователя вероятность появления рассеивателей уменьшается по гауссовскому закону.

Определяется выражение для плотности вероятности углов прихода сигнала на антенну БС. Оказывается, что относительно точки размещения БС, пользователь, окруженный облаком рассеивателей, можно рассматривать как протяженный источник излучения. Такой источник характеризуется угловым размером и направлением на центр излучения, причем положение центра излучения подвержено угловым флуктуациям. Дисперсия указанных флуктуаций обратно пропорциональна количеству рассеивателей, окружающих пользователя. Полученные результаты сравниваются с результатами для известных моделей и с экспериментальными данными.

Предлагается модификация суммарно-разностного метода пеленгации пользователя. Модификация состоит в использовании пеленгационных характеристик, согласованных с многолучевым пространственным каналом. Найдены функции, определяющие такие пеленгационные характеристики. Анализ эффективности представленного метода проводится на примере 3-лучевой диаграммы направленности (ДН) антенны БС в условиях релейского канала связи. Выбор такой ДН определяется реальными требованиями к системе связи, когда требуется обеспечить наилучшие ПС и покрытие, а определение местоположения пользователя является второстепенной задачей. Приводятся результаты, подтверждающие достаточно высокую эффективность предложенного метода. Доказывается, что статистическое распределение ошибки пеленгации близко к нормальному закону с нулевым средним. Устанавливается зависимость дисперсии такой ошибки от характеристик среды распространения и ОСШ.

В пятом разделе диссертации решается задача определения местоположения мобильных пользователей. Предлагается использование триангуляционного метода, основанного на измерении пеленга пользователя относительно некоторых опорных точек с известными координатами. В качестве таких опорных точек целесообразно выбрать точки размещения БС сети связи.

Исследуется эффективность оценивания местоположения пользователя на основании измерения его пеленга двумя БС при допущении об отсутствии смещения оценки пеленга и её нормальном законе распределения. Аналитически определены плотности вероятности максимально правдоподобных оценок угловых и декартовых координат пользователя. Оценивается точность определения местоположения при разнообразном взаимном размещении пользователя и БС, а также при различных значениях дисперсии ошибки пеленгации.

Рассматривается обобщение триангуляционного метода на случай трех БС. Представлена система уравнений, решение которой определяет максимально

правдоподобную оценку декартовых координат пользователя по результатам измерения его пеленга тремя БС. Даются рекомендации по поиску решения указанной системы уравнений численными методами. Предлагается упрощенное квазиоптимальное оценивание местоположения пользователя как определение координат точки пересечения биссектрис пеленгационного треугольника.

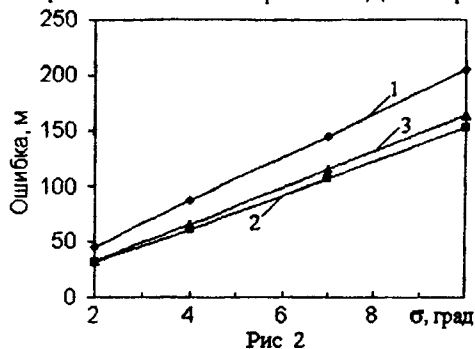


Рис 2

использование третьей БС существенно увеличивает точность определения местоположения. На рис.2 показана ошибка определения местоположения пользователя, соответствующая уровню вероятности 67%, в зависимости от СКО σ оценки пеленга при использовании двух БС (кривая 1) и трех БС (кривая 2 — максимально правдоподобное оценивание, кривая 3 — квазиоптимальное оценивание). Расстояние между БС выбрано равным 1 км.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Исследовано влияние ошибок максимально правдоподобной оценки канальной матрицы, обусловленных конечной длиной используемых ортогональных обучающих последовательностей и собственными шумами, на эффективность системы связи с передачей информации по собственным каналам. Получены приближенные аналитические выражения для средних значений коэффициентов передачи мощности собственными каналами, средних значений коэффициентов передачи мощности между каналами, средней пропускной способности при произвольных значениях отношения сигнал/шум, длины обучающей последовательности, количестве элементов передающей и приемной антенных решеток. Доказано, что полученные выражения имеют точность, достаточную для практического использования.

2. Проведен анализ энергетических потерь в системе с собственными каналами, возникающих из-за ошибок определения оптимальных весовых коэффициентов пространственной обработки вследствие неточного оценивания канальной матрицы. Установлено, что при использовании ортогональных обучающих последовательностей величина этих энергетических потерь слабо зависит от количества элементов приемной антенной решетки, пропорциональна количеству элементов передающей антенной решетки и обратно пропорциональна длине обучающей последовательности.

3. Предложен полиномиальный предсказатель состояния канала связи с замираниями сигналов, в основе которого лежит полиномиальная экстраполяция значений мощности процесса на выходах элементов приемной антенной

решетки во времени. Показано, что применение полиномиального предсказателя позволяет преодолеть негативное влияние задержек обновления информации о состоянии канала, повысив тем самым, эффективность практической реализации адаптивной регулировки мощности и адаптивной модуляции. Для улучшения характеристик предсказания в области малых значений отношений сигнал/шум предложена дополнительная процедура сглаживания собственного шума. Доказано, что применение такой процедуры позволяет получить приемлемые точности предсказания при достаточно низких отношениях сигнал/шум. Установлено, что полиномиальный предсказатель достаточно прост для практической реализации, так как обладает невысокой вычислительной сложностью и не требует использования специальных обучающих последовательностей.

4. Рассмотрен проекционный метод пространственного разделения пользователей в системе с собственными каналами, основанный на ортогонализации весовых векторов пространственной обработки на базовой станции и не требующий оценки направлений прихода сигналов. Проведен сравнительный анализ эффективности системы без разделения двух пользователей и с их пространственным разделением. Определен энергетический выигрыш, который появляется за счет разделения пользователей. Установлено, что этот выигрыш увеличивается с ростом отношения сигнал/шум. Получены простые приближенные аналитические выражения для среднего значения отношения сигнал/шум на выходе заданного собственного канала и средней пропускной способности системы в условиях релейского канала, справедливые при произвольных значениях количества пользователей, а также количества элементов передающей и приемной антенных решеток.

5. Найдено, что увеличение количества пространственно разделяемых пользователей увеличивает полную пропускную способность системы за счет увеличения общего количества собственных каналов. Однако при этом возрастают потери в отношении сигнал/шум на выходе собственных каналов, что приводит к уменьшению пропускной способности. В связи с этим установлено, что существует оптимальное количество пользователей, для которых следует применять пространственное разделение пользователей. При такой оптимизации максимизируется полная пропускная способность системы. Оптимальное количество пользователей зависит от количества элементов в передающих и приемных антенных решетках, а также от излучаемой мощности.

6. Предложена модель канала связи между пользователем и базовой станцией в городских условиях распространения радиоволн, когда пользователь находится в окружении большого количества рассеивателей, а антенна базовой станции поднята выше окружающих ее предметов. Модель основана на предположении, что при увеличении расстояния от пользователя вероятность появления рассеивателей уменьшается по гауссовскому закону. Проведен анализ статистических характеристик модели и получено выражение для плотности вероятности углов прихода сигнала на базовую станцию. Представлено сопоставление полученных результатов с известными экспериментальными данными, которое подтверждает соответствие предложенной модели реальному каналу. Показано, что пользователя, окруженного облаком рассеивателей, можно

рассматривать как протяженный источник излучения. Получены выражения, определяющие дисперсию углового положения центра излучения такого источника в зависимости от количества окружающих пользователя рассеивателей.

7. Рассмотрена задача пеленгации мобильного пользователя в условиях многолучевого распространения радиоволн. Предложена модификация суммарно-разностного метода пеленгации пользователя, состоящая в применении пеленгационных характеристик, согласованных с многолучевым каналом связи. Доказано, что статистическое распределение ошибки пеленга соответствует нормальному закону с нулевым средним. Установлено, что при достаточно больших отношениях сигнал/шум, точность оценки пеленга определяется дисперсией угловых флуктуаций центра излучения протяженного источника и обратно пропорциональна количеству рассеивателей, окружающих пользователя.

8. Проведен анализ задачи определения местоположения пользователей в сети связи, базовые станции которой используют антенные решетки для передачи информации и могут производить оценивание пеленгов пользователей. Получены аналитические выражения для функции плотности вероятности максимально правдоподобной оценки местоположения пользователя с использованием двух базовых станций. Определена ошибка оценивания при различных взаимных расположениях пользователя и базовых станций, а также при различных значениях дисперсии ошибки пеленгации пользователя.

9. Выполнено обобщение триангуляционного метода на случай использования трех базовых станций. Получены выражения для максимально правдоподобной оценки декартовых координат пользователя. Установлено, что использование третьей БС позволяет увеличить точность определения местоположения пользователя на (30-50)%. Предложено упрощенное квазиоптимальное оценивание местоположения пользователя как определение координат точки пересечения биссектрис пеленгационного треугольника. Доказано, что применение такой оценки приводит к снижению точности определения местоположения пользователя лишь на (5-10)% относительно оптимальной (максимально правдоподобной), не требуя при этом сложных вычислений.

Список опубликованных работ по теме диссертации:

1. Ермолаев В.Т., Аверин И.М., Ковалев И.П., Флакман А.Г. Влияние ошибок оценки канальной матрицы на пропускную способность ММО систем с параллельной передачей информации // Труды (шестой) научной конференции по радиофизике, посвященной 100-летию со дня рождения М.Т.Греховой. – Н. Новгород: ТАЛАМ, май 2002. – С. 264-265. -

2. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Аверин И.М., Грибов Д.В. Эффективность пространственного разделения пользователей в ММО-системах связи с параллельной передачей информации // Труды (седьмой) научной конференции по радиофизике, посвященной 90-летию со дня рождения В.С.Троицкого. – Н. Новгород: ТАЛАМ, май 2003. – С. 197-198.

3. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Аверин И.М., Грибов Д.В. Эффективность пространственного разделения пользователей в ММО-системах связи с

параллельной передачей информации // Изв. Вузов. Радиофизика.– 2004.– Т.47.– № 2.– С. 143-154.

4. V.T. Ermolayev, A.G. Flaksman, I.P. Kovalyov and I.M. Averin Weight Error Loss in MIMO Systems with Adaptive Transmit and Receive Beamformers // Proceedings of the 4th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT'03).– Sevastopol, Ukraine, September 2003.– P. 333-336.

5. Аверин И.М. Полиномиальный метод предсказания мощности канала связи // Материалы десятой Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве».– Н. Новгород, 2003 г.– С. 43.

6. Аверин И.М., Флакман А.Г. Пространственное разделение пользователей в MIMO-системах связи // Материалы десятой Всероссийской научно-технической конференции «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве».– Н. Новгород, 2003 г.– С. 43.

7. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Аверин И.М. Гауссовская модель многолучевого канала в городских условиях // Труды X международной научно-технической конференции “Радиолокация, навигация, связь”: в 3 т.– Воронеж, 2004.– Т. 1.– С. 295.

8. D.D.N. Bevan, V.T. Ermolayev, A.G. Flaksman, I.M. Averin “Gaussian channel model for mobile multipath environment”, EURASIP Journal on Applied Signal Processing.– 2004.– №9.– P. 1321-1329.

9. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Аверин И.М. Точность оценки местоположения пользователя в системах сотовой связи // Тезисы докладов международной научной конференции «Теория и техника передачи, приема и обработки информации»: в 2 частях.– Туапсе, сентябрь 2004.– Часть 1.– С. 6-7.

10. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Аверин И.М. Полиномиальный предсказатель мощности федингующего канала связи // Тезисы докладов международной научной конференции «Теория и техника передачи, приема и обработки информации»: в 2 частях.– Туапсе, сентябрь 2004.– Часть 1.– С. 42-43.

11. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Аверин И.М. Гауссовская модель многолучевого канала связи в городских условиях // Вестник ННГУ, сер. Радиофизика.– 2004.– Вып. 2.– С. 127-137.

12. D.D.N. Bevan, V.T. Ermolayev, A.G. Flaksman, I.M. Averin and P.M. Grant Gaussian channel model for macrocellular mobile propagation // Proceedings of 13th European Signal Processing Conference.– Antalya, September 2005.

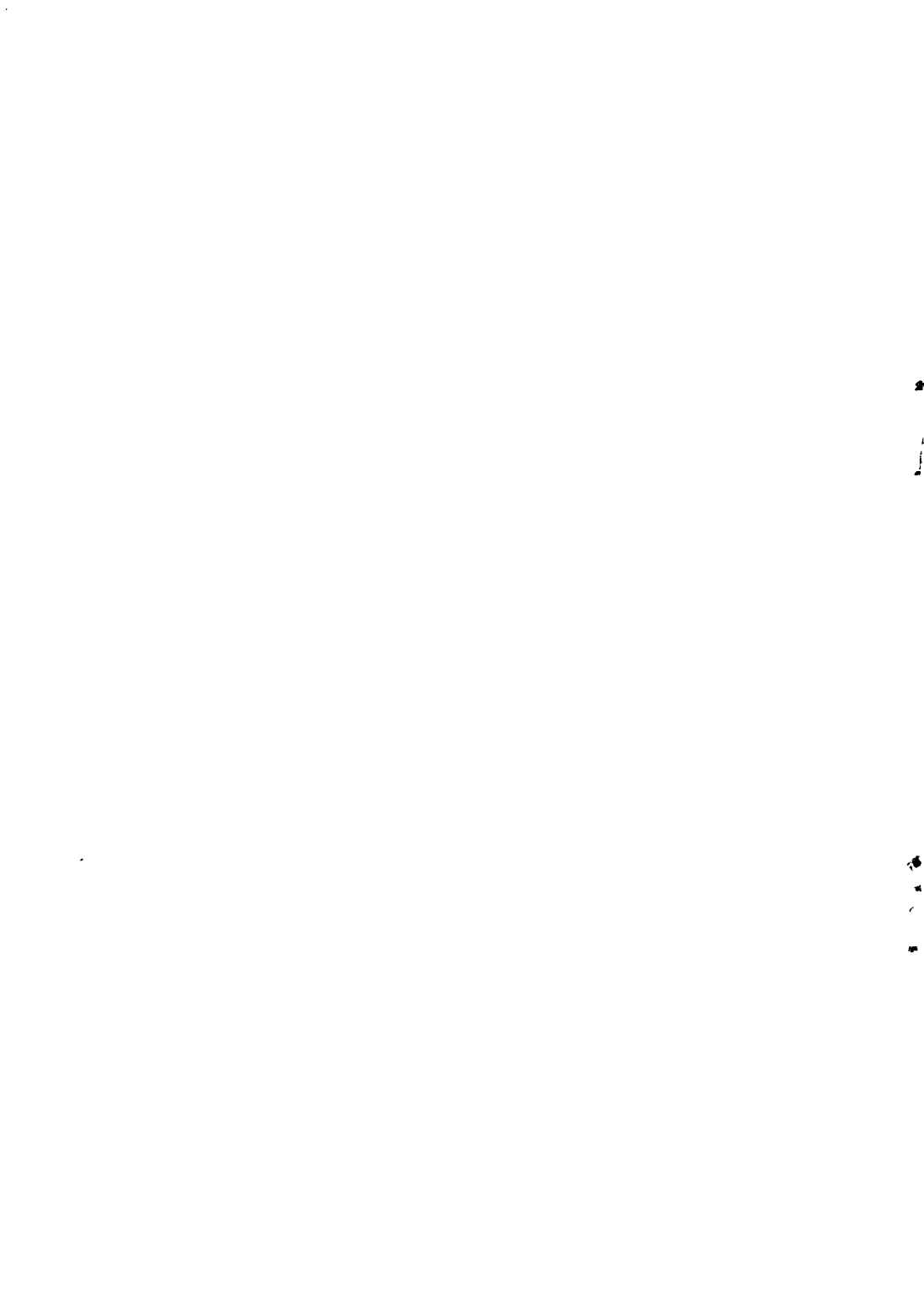
13. Аверин И.М. Полиномиальный предсказатель мощности // Труды НГТУ, сер. Радиоэлектронные и телекоммуникационные системы и устройства.– Н. Новгород, 2005.–Т. 55.– Вып.10.– С. 30-38.

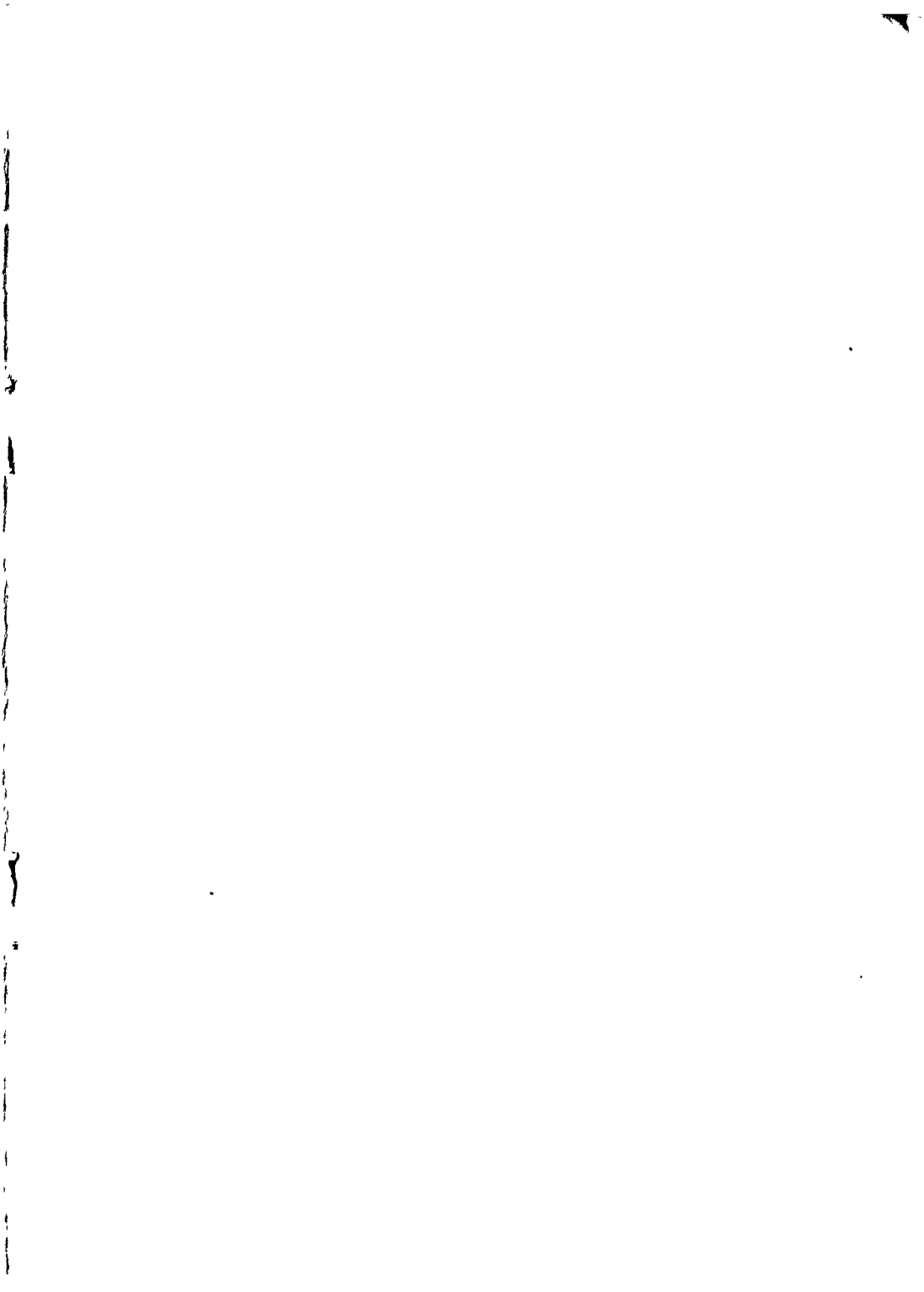
14. Аверин И.М. Точность оценки местоположения пользователя в системах сотовой связи // Тезисы докладов 12-й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: в 3 т.– Москва: МЭИ, март 2006.– Т. 1.– С. 156-157.

15. Method of predicting wireless signal power // D.D.N. Bevan, V.T. Ermolayev, A.G. Flaksman, I.M. Averin.– Патент США № US6993293 от 31.01.06.

Подписано в печать 28.03.06. Формат 60 x 84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Уч -изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 257.

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





2006 A
8620

№ - 8620