

*На правах рукописи*



Соколов Максим Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ  
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ С УГЛОВОЙ ДИСПЕРСИЕЙ**

01.04.03 – радиофизика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2011

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

Научный руководитель: доктор технических наук,  
профессор Ермолаев В.Т.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Орлов И.Я.

доктор технических наук  
Кейстович А.В.

Ведущая организация: Институт прикладной физики РАН

Защита состоится « 21 » \_\_\_\_\_ декабря \_\_\_\_\_ 2011 г. в \_\_\_\_\_ 15-00 \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И.Лобачевского по адресу: Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420 .

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

Автореферат разослан « 21 » \_\_\_\_\_ ноября \_\_\_\_\_ 2011 г.

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



Черепенников В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИИ

### Актуальность темы диссертации

В настоящее время происходит бурное развитие систем беспроводной связи различного назначения. Постоянное увеличение числа пользователей систем связи, а также появление новых интернет-сервисов, таких как IP-телефония, видеоконференции, требуют как увеличения скорости передачи данных, так и повышения качества связи. Большая скорость и высокое качество связи должны обеспечиваться, в том числе для абонента, движущегося с большой скоростью в поезде, самолете или автомобиле. При этом положение абонента в пространстве обычно известно с большой априорной неопределенностью. Основные препятствия для достижения большой скорости и высокого качества передачи информации обусловлены теми радиофизическими эффектами, которые возникают при многолучевом распространения сигнала в случайной рассеивающей среде, например, в городской среде. К таким эффектам относятся, прежде всего, замирание сигнала, его временная, частотная и угловая дисперсии.

Скорость передачи данных и количество обслуживаемых пользователей могут быть увеличены, например, за счет расширения используемой полосы частот. Также скорость передачи данных можно повысить за счет увеличения излучаемой мощности. Однако частотные ресурсы имеют свои пределы, так как выделяемые стандартами полосы радиочастотных диапазонов весьма ограничены, а максимальный уровень излучаемой мощности не может быть существенно увеличен из-за требований биологической защиты и энергопотребления. Таким образом, задачи повышения эффективности беспроводных систем связи необходимо решать при жестких ограничениях на выделенные ресурсы, что особенно актуально при современном быстро развивающемся рынке различных портативных устройств и беспроводного Интернета.

Одним из наиболее перспективных подходов к повышению эффективности современных систем радиосвязи при существующих ограничениях на различные ресурсы является использование антенных решеток (АР). Это позволяет расширить функциональные возможности систем связи следующим образом:

- 1) В дополнение к временному, частотному или кодовому разделению пользователей АР позволяет реализовать пространственное разделение, что может значительно увеличить число обслуживаемых абонентов. В этом случае АР на базовой станции должна одновременно формировать несколько ортогональных лучей, по одному на каждого пользователя. При этом обеспечивается максимальное отношение сигнал/шум за счет усиления антенны, а также ослабление взаимных помех. К сожалению, пространственное разделение пользователей в настоящее время не применяется на практике, в основном, из-за отсутствия эффективных алгоритмов обработки сигналов. Эти алгоритмы должны учитывать

радиофизические эффекты, возникающие при многолучевом распространении сигнала, а также быть относительно простыми с вычислительной точки зрения.

2) Применение АР в системах подвижной связи позволяет формировать диаграмму направленности АР адаптивным путем так, чтобы непрерывно обеспечивать прием сигнала с максимальным отношением сигнал/шум. Трудность решения задачи заключается в том, что положение подвижного абонента задается с большой априорной неопределенностью. Кроме того, необходимо учитывать многолучевой характер распространения сигнала. Подобные системы пока не нашли применения на практике также в связи с отсутствием эффективных алгоритмов пространственной обработки сигналов.

3) Ряд беспроводных систем связи предназначен для работы в помещениях. В этом случае наблюдается очень сильная угловая дисперсия сигнала, вследствие чего радиус пространственной корреляции сигнала может быть существенно меньше размера АР. В таких условиях когерентная обработка сигнала, связанная с формированием диаграммы направленности АР, является неэффективной. Более перспективным является применение так называемых МИМО (Multiple-Input-Multiple-Output) систем. В настоящее время такого рода системы исследуются и рекомендуются для перспективных систем связи.

Актуальность этих проблем подтверждается активной работой в области применения АР ведущих компаний-производителей телекоммуникационного оборудования, таких как Samsung, Nokia, Intel, Nortel Networks и многих других, а также большим объемом публикаций в научно-технических журналах, посвященных данным вопросам.

Все сказанное выше определяет актуальность темы диссертации.

#### Задачи работы

1. Исследование возможности формирования весового вектора антенной решетки в базисе степенных векторов для обработки сигналов с угловой дисперсией.

2. Анализ эффективности обработки сигнала от источника с угловой дисперсией и неизвестными параметрами (угловым положением и распределением мощности), а также от движущегося источника.

3. Анализ эффективности обработки сигналов от нескольких источников с угловой дисперсией и неизвестными параметрами, а также исследование возможности разделения пользователей в системах связи с использованием базиса степенных векторов.

4. Исследование эффективности адаптивной обработки сигналов с использованием оценки корреляционной матрицы по конечной выборке сигналов, построенной на основе метода степенных векторов, а также оценка необходимого объема вычислений для работы данного метода.

## Методы исследований

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

## Научная новизна

1. Показана возможность формирования весового вектора антенной решетки в базисе степенных векторов для обработки сигналов с угловой дисперсией. С увеличением числа базисных векторов формируемый весовой вектор быстро приближается к собственному вектору корреляционной матрицы сигнала, соответствующему максимальному собственному числу и являющемуся оптимальным вектором. Трех базисных векторов достаточно, чтобы обеспечить точность приближения к оптимальному вектору 0.3% и менее, независимо от характера угловой дисперсии.

2. Предложен итерационный метод поиска весового вектора адаптивной антенной решетки с использованием базиса степенных векторов для приема сигнала от источника с угловой дисперсией на фоне собственных шумов приемных устройств. Метод не требует точного знания углового положения и распределения мощности излучения источника. Он может быть использован для приема сигналов от подвижного источника. Данный метод обладает высокой эффективностью при малых вычислительных затратах.

3. Предложен итерационный метод поиска весового вектора адаптивной антенной решетки с использованием базиса степенных векторов для приема сигналов от нескольких источников с угловой дисперсией и неизвестными параметрами, который может быть использован для пространственного разделения пользователей в системах беспроводной связи.

4. Показано, что предложенные итерационные методы сохраняют высокую эффективность, когда базисные степенные векторы оцениваются по конечной выборке сигналов как корреляционные векторы. При этом потери в эффективности остаются приемлемыми даже при числе выборок, меньшем числа элементов антенной решетки, когда корреляционная матрица сигналов становится вырожденной.

## Практическая значимость результатов

Представленные в диссертации результаты анализа и синтеза адаптивной обработки сигналов в системах радиосвязи с антенными решетками с использованием базиса степенных векторов, а также с использованием параллельной передачи информации по пространственным подканалам могут быть использованы при проектировании перспективных высокоскоростных цифровых систем радиосвязи нового поколения.

## Обоснованность и достоверность

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

## Положения, выносимые на защиту

1. Формирование весового вектора антенной решетки для обработки сигнала с пространственной дисперсией может быть реализовано в базисе степенных векторов. С увеличением числа базисных векторов формируемый весовой вектор быстро приближается к собственному вектору корреляционной матрицы сигнала, соответствующему максимальному собственному числу и являющемуся оптимальным вектором.

2. Итерационный метод поиска весового вектора адаптивной антенной решетки с использованием базиса степенных векторов позволяет обеспечить прием сигнала от источника с угловой дисперсией на фоне собственных шумов приемных устройств. Метод не требует точного знания углового положения и распределения мощности излучения источника и может быть использован для приема сигналов от подвижного источника, в частности в системах мобильной связи.

3. Итерационный метод поиска весового вектора адаптивной антенной решетки с использованием базиса степенных векторов позволяет обеспечить обработку сигналов с угловой дисперсией от нескольких источников. Метод может быть использован для пространственного разделения пользователей в системах беспроводной связи.

4. Базисные степенные векторы могут оцениваться по конечной выборке сигналов как корреляционные векторы с помощью корреляционных устройств. Формирование весового вектора остается возможным при числе выборок, меньшем числа элементов антенной решетки, когда корреляционная матрица сигналов становится вырожденной и поиск оптимального вектора затруднен.

## Апробация результатов и публикации

Основные материалы диссертации опубликованы в 12 работах. Среди них 4 статьи в рецензируемых журналах («Вестник ННГУ. Серия Радиофизика» [1-2], «Известия вузов России. Радиоэлектроника» [3], «Радиоэлектроника. Известия вузов» [4]) и 8 работ, представляющие собой опубликованные материалы докладов на научных конференциях [5-12].

Результаты диссертационной работы докладывались на конференции «Информационные системы и технологии» (НГТУ, Нижний Новгород, 2008), на Международном радиоэлектронном Форуме «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» (Харьков, 2008), на

12-й, 13-й и 14-й научных конференциях по радиофизике (ННГУ, Нижний Новгород, 2008-2010), на международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA'2009» (Москва, 2009), Нижегородской сессии молодых ученых (Нижний Новгород, 2009 г.), а также на семинаре кафедры бионики и статистической радиофизики ННГУ.

Работа выполнена в рамках ФТНЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (ГК № 02.740.11.0003 и ГК № 02.740.11.0163).

### Личный вклад автора

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

### Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы и списка сокращений. Общий объем диссертации составляет 138 страниц, включая 40 рисунков и список литературы из 98 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

**В первой главе** диссертации рассматриваются основные принципы корреляционной обработки сигналов в АР. Приводится описание метода степенных векторов для обработки сигналов от точечных неподвижных источников, который позволяет значительно снизить объем вычислений за счет сокращения количества членов разложения степенного ряда, при этом позволяя обеспечить малые потери в эффективности обработки. Данный метод заключается в представлении оптимального весового вектора  $\mathbf{W}_{opt}$  АР в виде конечного разложения по степенным векторам  $\mathbf{M}_n^i \Phi_s$ . Каждый из степенных векторов образован циклическим воздействием матрицы помехи  $\mathbf{M}_n$  на вектор сигнала  $\Phi_s$ :

$$\mathbf{W}_{opt} = b_0 \Phi_s + b_1 \mathbf{M}_n \Phi_s + b_2 \mathbf{M}_n^2 \Phi_s + \dots + b_{K-1} \mathbf{M}_n^{K-1} \Phi_s. \quad (1)$$

Исследуется влияние расширения пространственного спектра сигнала, которое наблюдается во многих практических случаях на свойства его корреляционной матрицы (КМ). Далее приводятся соотношения для количества собственных чисел, превышающих шумовой порог, в

зависимости от отношения ширины источника сигнала к ширине диаграммы направленности АР для различных видов распределений углового спектра и затем исследуется возможность применения метода степенных векторов для обработки сигналов с угловой дисперсией.

**Во второй главе** исследуется эффективность метода степенных векторов для приема сигнала и подавления помех от источников с угловой дисперсией для случая, когда корреляционная матрица полезного и помехового сигнала являются точно известными. Так, для случая приема сигнала от источников с угловой дисперсией на фоне собственных шумов приемных устройств приводится теоретический вывод выражений для отношения сигнал-шум (ОСШ) при построении весового вектора тремя различными методами, основанных на использовании степенного базиса: с параллельным и последовательным нахождением коэффициентов разложения, а также поиска весового вектора методом прямых итераций. Также приводятся схемы реализации параллельного и последовательного нахождения коэффициентов разложения ортонормированных степенных векторов  $\tilde{\mathbf{F}}_i$ :

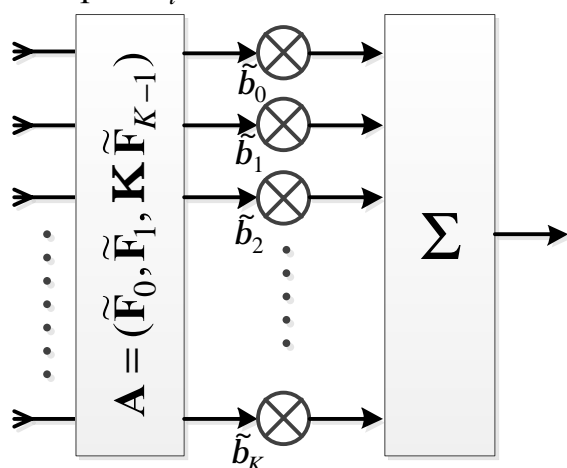


Рис. 1. Схема параллельной двухэтапной обработки сигналов в АР

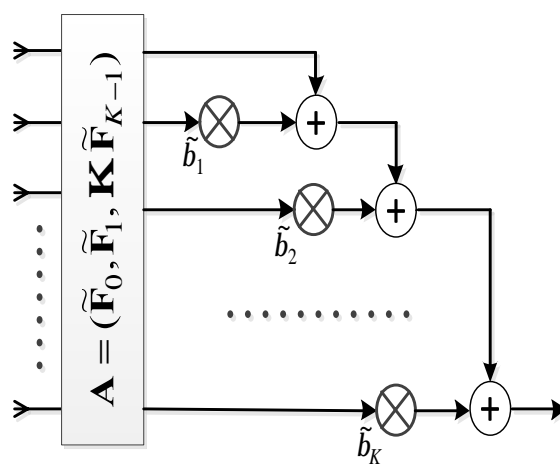


Рис. 2. Схема последовательной двухэтапной обработки сигналов в АР

Далее исследуется возможность применения метода степенных векторов для нахождения весового вектора АР в системах связи, обслуживающих нескольких пользователей с точно известными КМ. Рассматривается случай, когда обмен информацией осуществляется с одним из пользователей, а другие пользователи являются помехами:



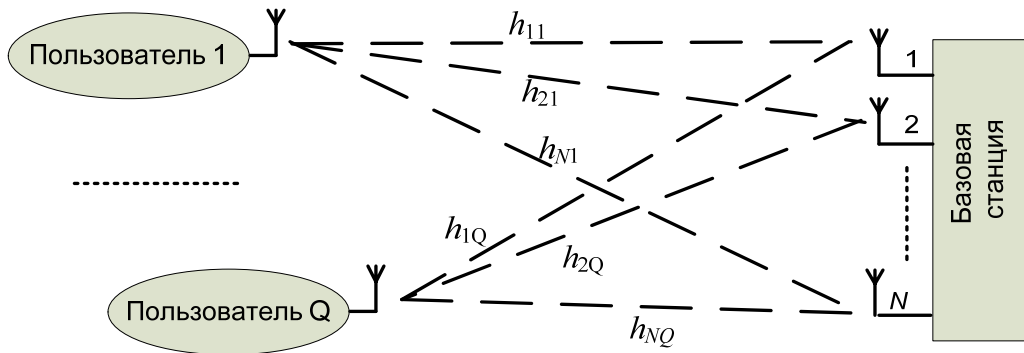


Рис. 3. Система связи с несколькими пользователями

Для данного случая получены аналитические выражения для отношения сигнал-шум-помеха (ОСШП) для произвольного числа базисных степенных векторов, а также произвольного вида пространственного спектра сигналов и помех и их углового местоположения. На Рис. 4 показано, что сокращение количества членов степенного базиса не приводит к значительным потерям эффективности по сравнению с оптимальным методом нахождения весового вектора:

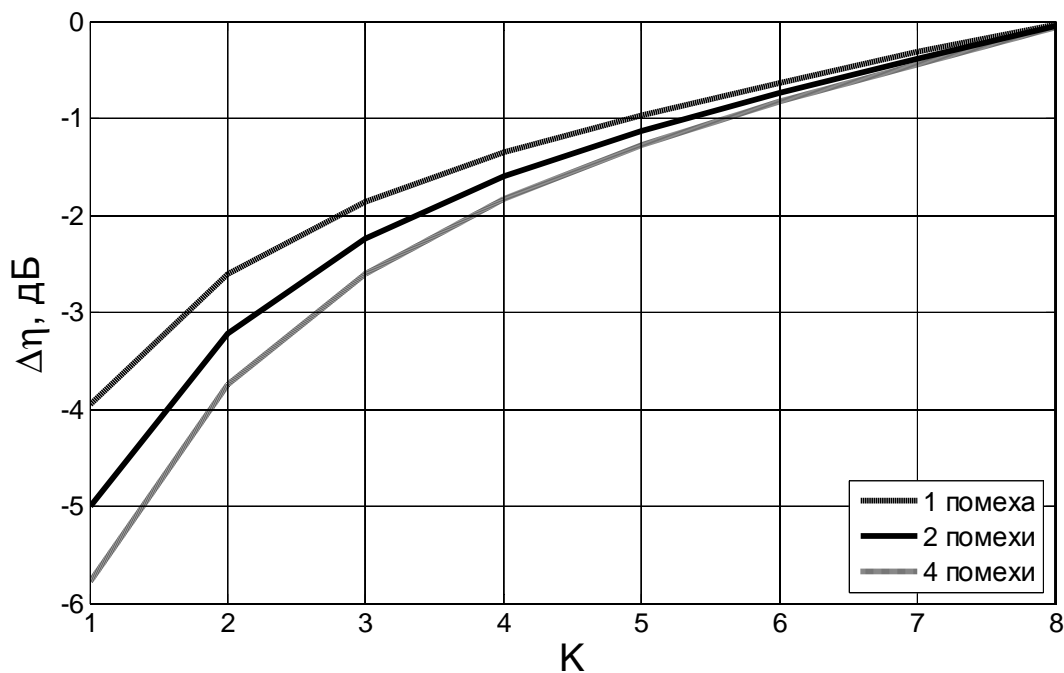


Рис. 4. Потери в эффективности при квазиоптимальной обработке сигналов для пространственного спектра мощности источника в виде распределения Лапласа

На практике представляют интерес не только средние потери в ОСШП при использовании метода степенных векторов, но и их разброс из-за различных реализаций источника сигнала и помех. На Рис. 5 приведена плотность вероятности  $w(\Delta h)$  для потерь в ОСШП при двух помеховых сигналах с распределением Лапласа:

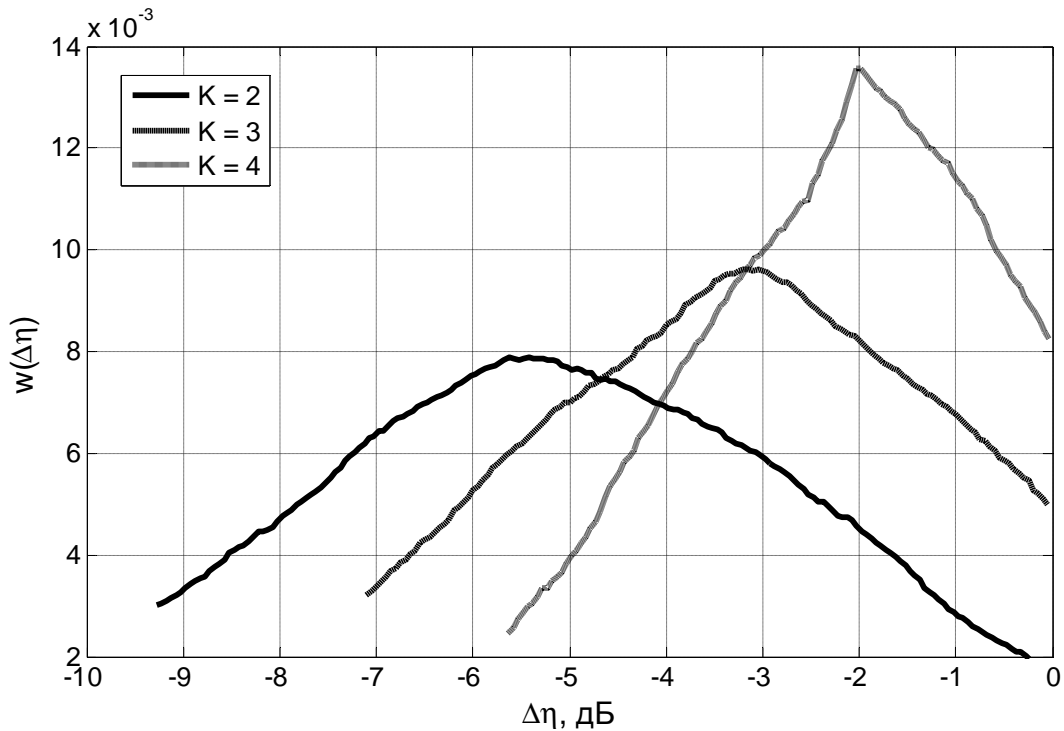


Рис. 5. Плотность распределения эффективности обработки для случая двух помеховых сигналов с распределением Лапласа

Из графиков видно, что при использовании даже небольшого числа вспомогательных каналов значительные ухудшения в ОСШП в результате квазиоптимальной обработки сигналов маловероятны.

**В третьей главе** исследуется эффективность метода степенных векторов в случае адаптивной обработки сигналов в АР. Приводится вывод теоретических выражений для ОСШ для случая приема полезного сигнала на фоне собственных шумов, которые позволяют оценить эффективность адаптации с использованием степенного базиса для произвольной длины оценочной выборки  $KM$  и произвольных реализаций углового спектра источника. Далее рассматривается эффективность данного метода при обработке сигналов от мобильных устройств с использованием 3GPP модели канала связи. В результате компьютерного моделирования было показано, что использование базиса степенных векторов для адаптивного формирования весового вектора АР приводит к незначительным потерям в эффективности по сравнению с оптимальными методами поиска весового вектора, особенно для наиболее значимого с практической точки зрения случая короткой оценочной выборки. Так, для системы связи, изображенной на Рис. 3 приведены потери в ОСШП при адаптивной обработке сигналов в зависимости от длины оценочной выборки  $L$ . Уровень 0 дБ на графиках соответствует приему сигнала с оптимальным весовым вектором, а цифрами обозначена размерность степенного базиса, т.е. количество членов в разложении (1):

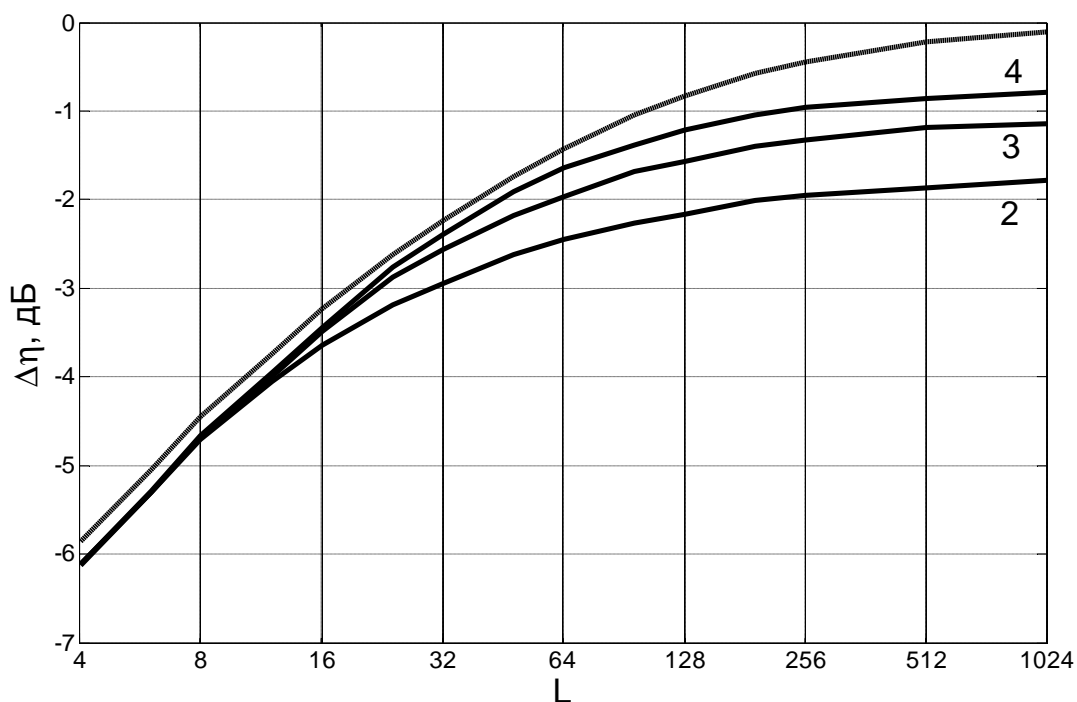


Рис. 6. Эффективность адаптивной обработки сигналов методом степенных векторов в зависимости от длины оценочной последовательности для четырех пользователей

Из рисунков видно, что обработка сигналов методом степенных векторов дает потери менее 1 дБ по отношению к адаптивному приему оптимальным методом поиска весового вектора, а при короткой выборке эффективность предложенного адаптивного метода и адаптивного метода с нахождением весового вектора оптимальным способом примерно одинакова.

Также приводится сравнение вычислительных затрат используемого алгоритма адаптации, основанного на использовании степенного базиса, с оптимальным методом обработки сигнала. Показывается, что предложенный метод требует существенно меньшего объема вычислений, при незначительных потерях в эффективности обработки.

Далее рассматривается использование степенного базиса для формирования весового вектора в случае движущихся источников. Результаты моделирования показывают, что использование степенного базиса не приводит к значительным потерям в ОСШ по сравнению с оптимальным методом формирования весового вектора, а также что существует оптимальный интервал длины оценочной последовательности, при увеличении которого эффективность приема начинает падать в связи с движением источника.

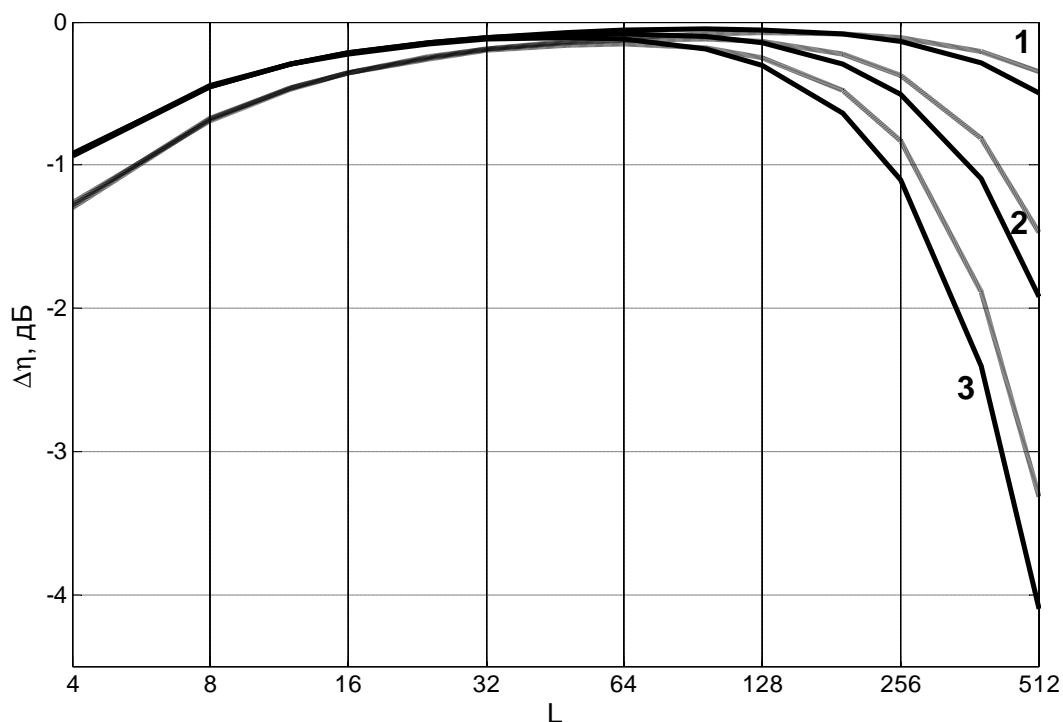


Рис. 7. Эффективность квазиоптимального приема сигнала от движущегося источника

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

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Основные результаты диссертационной работы и следующие из них теоретические и практические выводы могут быть сформулированы следующим образом:

1. Метод степенных векторов позволяет реализовать пространственную обработку сигналов от источников с угловой дисперсией в АР, значительно снижая объем вычислений по сравнению с оптимальными методами обработки сигналов. Сокращение числа членов базиса не приводит к уменьшению эффективности обработки в случае, когда число точечных источников помех меньше числа первичных каналов АР. В случае расширения углового спектра источника, которое наблюдается, например, в системах мобильной связи, увеличивается количество собственных чисел КМ сигнала, которые превышают уровень шумовых собственных чисел. Получены соотношения для количества собственных чисел, превышающих шумовой порог, в зависимости от отношения ширины источника сигнала к ширине диаграммы направленности АР для различных видов распределений углового спектра.

2. Предложенный итерационный метод поиска весового вектора адаптивной антенной решетки с использованием базиса степенных векторов для приема сигнала от источника с угловой дисперсией на фоне собственных

шумов приемных устройств и не требующий точного знания углового положения и распределения мощности излучения источника позволяет значительно снизить объем необходимых вычислений, обладая высокой эффективностью обработки. Также данный метод может быть использован для приема сигналов от подвижного источника.

3. Предложенный итерационный метод поиска весового вектора адаптивной антенной решетки с использованием базиса степенных векторов для приема сигналов с угловой дисперсией от нескольких источников с неизвестными параметрами может быть использован для пространственного разделения пользователей в системах беспроводной связи. Показано, что предложенные итерационные методы сохраняют высокую эффективность, когда базисные степенные векторы оцениваются по конечной выборке сигналов как корреляционные векторы. При этом потери в эффективности остаются приемлемыми даже при числе выборок, меньшем числа элементов антенной решетки, когда корреляционная матрица сигналов становится вырожденной.

### СПИСОК РАБОТ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Ермолаев В.Т., Соколов М.А., Флакман А.Г. Прием пространственно-распределенного сигнала в системе сотовой связи с антенной решеткой // Вестник ННГУ, 2009, Выпуск 3, с. 69-75

2. Ермолаев В.Т., Соколов М.А., Флакман А.Г. Адаптивный прием сигнала от движущихся источников с неизвестными координатами // Вестник ННГУ, 2011, Выпуск 4 (1), с. 57-60.

3. Ермолаев В.Т., Соколов М.А., Флакман А.Г. Пространственное разделение пользователей в системе мобильной связи с адаптивной антенной решеткой при использовании степенного базиса // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 3. с. 44-50.

4. Ермолаев В.Т., Флакман А.Г., Рубцов А.Е., Тираспольский С.А., Семенов В.Ю., Соколов М.А. Применение технологии ММО в широкополосных системах беспроводной связи миллиметрового диапазона волн // Радиоэлектроника. Известия вузов. — 2011. — Т. 54, № 4. — С. 55–64

5. Соколов М.А. Оптимальное накопление пространственно-распределенных сигналов в антенных решетках с использованием степенного базиса // Материалы международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (ИСТ-2008)». НГТУ, с. 33-34.

6. Ермолаев В.Т., Соколов М.А., Флакман А.Г. Квазиоптимальный прием сигналов с угловой дисперсией с помощью антенных решеток // Труды двенадцатой научной конференции по радиофизике, ННГУ, Нижний Новгород, 2008, с.164-165.

7. Ермолаев В.Т., Соколов М.А., Флакман А.Г. Квазиоптимальное пространственное разделение пользователей в системе связи с адаптивной антенной решеткой // Труды III-го Международного радиоэлектронного Форума (МРФ – 2008). Харьков, 2008, Том 2, с.163-165.

8. Ермолаев В.Т., Соколов М.А., Флакман А.Г. Эффективность адаптивного приема сигналов с угловой дисперсией в антенных решетках // Труды двенадцатой научной конференции по радиофизике, ННГУ, Нижний Новгород, 2008, с.166-167.

9. Соколов М.А. Адаптивный прием пространственно-распределенных сигналов с использованием степенного базиса в сотовых системах связи с антенными решетками // Труды конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение - DSPA'2009», Москва, 2009, с.306-309

10. Ермолаев В.Т., Соколов М.А., Флакман А.Г. Квазиоптимальное подавление пространственно-распределенных помех в АР с использованием степенного базиса // Труды тринадцатой научной конференции по радиофизике, ННГУ, Нижний Новгород, 2009

11. Соколов М.А. Квазиоптимальное подавление пространственно-распределенных помех в системах сотовой связи с антенными решетками // 14ая сессия молодых ученых, Нижний Новгород, 2009.

12. Ермолаев В.Т., Соколов М.А., Флакман А.Г. Адаптивный прием сигнала от движущегося источника с использованием степенного базиса в системах связи с антенными решетками // Труды четырнадцатой научной конференции по радиофизике, ННГУ, Нижний Новгород, 2010, с. 230-232

# ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

## Введение

### Глава 1. Исследование применимости базиса степенных векторов для обработки сигналов с угловой дисперсией

- 1.1 Обработка сигналов от точечных источников в АР
  - 1.2 Метод степенных векторов для точечных источников
  - 1.3 Источники сигналов с угловой дисперсией
  - 1.4 Исследование применимости метода степенных векторов для обработки сигналов с угловой дисперсией
- Выводы

### Глава 2. Эффективность обработки сигналов с угловой дисперсией в случае точно известных корреляционных матриц сигналов и помех

- 2.1 Прием сигналов с угловой дисперсией при точно известной корреляционной матрице
  - 2.2 Обработка сигналов от нескольких источников с угловой дисперсией с точно известными корреляционными матрицами
- Выводы

### Глава 3. Эффективность обработки сигналов с угловой дисперсией в случае использования оценки корреляционных матриц сигналов и помех

- 3.1 Адаптация при использовании степенного базиса
  - 3.2 Оценка размерности степенного базиса
  - 3.3 Оценка объема вычислений при использовании метода степенных векторов
  - 3.4 Эффективность адаптивной обработки при движении источника
  - 3.5 Эффективность адаптивной разнесенной обработки сигналов в ММО-системах
- Выводы

## Заключение

## Список сокращений

## Список литературы