

На правах рукописи

Ксендзов Александр Валентинович

**ОПТИМИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2010

Работа выполнена на кафедре радиотехнических устройств
ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Паршин Юрий Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
Заслуженный работник высшей школы РФ
Петров Евгений Петрович

Кандидат технических наук, доцент
Шумов Алексей Петрович

Ведущая организация: ФГУП «Государственный рязанский
приборный завод»

Защита состоится «24» июня 2010 г. в ____ ч. 00 мин. на заседании диссер-
тационного совета Д 212.211.04 в Рязанском государственном радиотехниче-
ском университете по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ

Автореферат разослан " ____ " мая 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Под пространственной структурой (ПС) радиотехнической системы передачи информации (РТСПИ) понимается взаимное расположение в пространстве разнесенных антенн, входящих в состав приемной или передающей многоантенной системы (МАС). В области применения МАС проводились широкие научные исследования, в частности, в нашей стране развитие данного направления связано с именами В.И. Сифорова, В.А.Котельникова, позднее Н.Д. Папалекси, Л.И. Мандельштама, Л.М. Финка, И.С. Андропова, Д.Д.Кловского. В связи с развитием в 80-х-90-х гг XX в. беспроводных РТСПИ с использованием МАС возник и устоялся термин «Multiple-Input, Multiple-Output (MIMO) Channel» – канал с множественным входом и множественным выходом. Использование MIMO канала для передачи данных дает потенциальный выигрыш в качестве связи за счет нескольких факторов: независимость собственных шумов каждого приемного канала, декорреляция замираний сигнала, применение пространственно-временного кодирования. Теоретическая и практическая эффективность MIMO систем подтвердила актуальность дальнейших исследований, направленных на улучшение качества связи путем более эффективного использования радиочастотного ресурса. В частности, проведенные исследования влияния корреляции замираний в антеннах МАС показали, что декорреляция замираний приводит к повышению пропускной способности MIMO канала и снижению вероятности ошибочной передачи без увеличения мощности передатчика. Таким образом, МАС обеспечивает *выигрыш разнесения*, обусловленный декорреляцией замираний в ее отдельных антеннах. В то же время корреляция замираний в паре антенн практически всегда существует и зависит от двух основных факторов: взаимного расположения пары антенн и среды рассеяния и переотражения электромагнитных волн на пути их распространения. Оба этих фактора учтены в математической модели пространственной корреляции, построенной на основе *углового спектра мощности (УСМ)* – нормированной функции распределения принимаемой МАС мощности по азимуту. Характер УСМ определяется расположением, размерами и формой *отражателей сигнала* – строений, холмов, деревьев и прочих предметов, расположенных в дальней зоне действия МАС и составляющих среду рассеяния и переотражения сигнала.

В большинстве исследовательских работ указывается на ослабевающую в среднем и многоэкстремальную в частных случаях УСМ корреляцию замираний при разнесении пары антенн. Таким образом, подчеркивается пространственный характер корреляции замираний. При этом не проводится анализ влияния ПС МАС на корреляцию замираний и связанные с ней качественные характеристики РТСПИ. В то же время, колебательный многоэкстремальный характер зависимости коэффициен-

та корреляции замираний от расстояния между парой антенн, а также его зависимость от УСМ указывают на возможность оптимизации взаимного расположения пары антенн в частности и ПС МАС в целом по критерию максимума качественной характеристики РТСПИ. Таким образом, оптимизация ПС РТСПИ с целью повышения пропускной способности и надежности передачи информации способствует более рациональному использованию пространственной составляющей радиочастотного ресурса и поэтому является актуальной задачей. Поскольку пространственная корреляция непосредственно связана с функцией УСМ, также актуальна задача оценивания функции УСМ с заданной точностью для последующего использования полученной оценки при решении задачи оптимизации ПС.

Цель диссертационной работы: повышение пропускной способности, а также снижение вероятности ошибки в ММО системах передачи информации путем декорреляции замираний в элементах используемых МАС методом оптимизации ПС МАС.

Задачи исследований.

1. Анализ потенциальных границ эффективности оптимизации ПС МАС при передаче данных через ММО канал с замираниями в элементах МАС.
2. Разработка математической модели пространственной корреляции замираний в элементах МАС в двумерной системе координат, а также задание целевой функции для оптимизации ПС МАС по критерию минимума вероятности ошибки на основе предложенной модели.
3. Разработка и анализ алгоритмов оптимизации ПС МАС, учитывающих многоэкстремальность заданной целевой функции, и получение с помощью разработанных алгоритмов оптимальных ПС МАС с учетом ограничений на линейный размер МАС для стандартных моделей УСМ.
4. Анализ эффективности оптимальных ПС МАС для стандартных моделей УСМ и сравнение вероятности ошибки, обеспечиваемой оптимальными ПС, с ее нижней границей.
5. Разработка метода оценивания функции УСМ на основе измерения пространственной корреляции в элементах МАС с фиксированной ПС без применения механических приводов и направленных антенн.

Методы исследований. При проведении исследований по диссертационной работе использованы методы статистической радиотехники, математической статистики, спектрального анализа и матричного исчисления. Анализ полученных решений проведен с использованием аналитических методов и численного имитационного моделирования.

Научная новизна. В рамках данной диссертационной работы получены следующие новые научные результаты.

1. Получены аналитические выражения верхней и нижней границ вероятности ошибки сигнала с двоичной фазовой манипуляцией в ММО канале с дружными и независимыми замираниями Накагами-Райса соответственно, обобщенные для МАС с произвольным числом элементов и канала с произвольной глубиной замираний через число эффективных степеней свободы.
2. Разработана математическая модель пространственной корреляции замираний на основе комплексной двумерной функции пространственной корреляции замираний сигнала в паре антенн в азимутальной плоскости, включающая представление функции пространственной корреляции через коэффициенты разложения УСМ в базисе Фурье, число которых ограничено оценкой Манаева для ширины спектра ЧМ сигнала.
3. Разработаны и исследованы алгоритмы формирования оптимальных и подоптимальных ПС, учитывающие нелинейность, многоэкстремальность и интерференционную природу целевой функции, а также ограничения на величину разнесения антенн в составе МАС.
4. Исследована эффективность полученных оптимальных и подоптимальных ПС для стандартных моделей ММО каналов и сигналов с двоичной фазовой манипуляцией, демодулируемых по линейному алгоритму МСКО и нелинейному алгоритму V-BLAST.
5. Исследована эргодическая шенноновская пропускная способность стандартных моделей ММО каналов с оптимальными ПС, а также вероятность простоя при заданной скорости передачи для каналов с оптимальными ПС в сравнении с линейной антенной решеткой, рекомендованной ИТУ в качестве ПС в ММО системах.
6. Разработан метод оценивания функций пространственной корреляции и УСМ с использованием фиксированной МАС с оптимизированной ПС, основанный на вычислении матрицы пространственной корреляции по представительной выборке принятых сигналов и оценивании на ее основе коэффициентов разложения УСМ в базисе Фурье путем решения обратной задачи.

Практическая значимость результатов. Полученные в работе подоптимальные и оптимальные ПС МАС, а также алгоритмы оптимизации ПС предназначены для применения в беспроводных системах передачи информации, использующих разнесенный прием и передачу с помощью МАС, в частности, в системах телеметрии, радиуправления и радиомониторинга. Предложенные оптимальные и подоптимальные ПС для стандартных моделей радиоканалов позволяют повысить их пропускную способность, снизить вероятность ошибки передачи данных или уменьшить передаваемую мощность при фиксированном уровне вероятности ошибки. Метод оценивания УСМ и алгоритмы оптимизации ПС

позволяют получить подоптимальные и оптимальные ПС для нестандартных радиоканалов и тем самым обеспечить для них выигрыш в пропускной способности и экономии мощности передачи.

Достоверность и обоснованность основных результатов диссертационной работы обеспечиваются применением при разработке и исследованиях апробированных методов статистической теории оценивания сигналов, согласованием результатов, полученных методами временного, спектрального и матричного анализа, сходимостью полученных результатов с известными в предельных случаях, согласованием полученных аналитических результатов с результатами численного имитационного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Аналитические выражения верхней и нижней границ вероятности ошибки в ММО канале, обобщенные для МАС с произвольным числом элементов и канала с произвольной глубиной замираний через число эффективных степеней свободы, показывающие потенциальный энергетический выигрыш от оптимизации ПС в среднем 2-3 дБ.

2. Двухэтапный алгоритм оптимизации ПС МАС, обеспечивающий уменьшение временных затрат на оптимизацию по сравнению с кластерным градиентным алгоритмом поиска условного глобального максимума в среднем на 20-30% благодаря рациональному выбору начальных условий и комбинации методов градиентного поиска, кластеризации и конечных приращений.

3. Оптимальные ПС МАС, обеспечивающие для каналов с рэлеевскими замираниями и направленным УСМ энергетический выигрыш по сравнению с линейными антенными решетками в среднем 2-3 дБ при энергетической разнице с аналитической нижней границей в среднем 0,2 дБ.

4. Метод оценивания функций пространственной корреляции и УСМ, позволяющий в 1,4-1,5 раз уменьшить количество антенн измерительной МАС и в 2-3 раза уменьшить ее линейный размер по сравнению с методом переопределения СЛАУ благодаря оптимизированной ПС измерительной МАС.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- Всероссийская НТК «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов», Пенза, 2003 г;
- Всероссийская НТДК «Информационно-телекоммуникационные технологии» - г. Москва, МАИ, 2003 г;
- 12-я Международная НТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» - г. Рязань, РГРТА, 2004 г;

- X международная НТК «Радионавигация, радиолокация, связь», 13-15 апреля 2004 г, г. Воронеж, ВГУ;
- Юбилейная LX научная сессия РНТОРЭС им. А.С.Попова, посвященная Дню радио, г. Москва, МТУСИ, 2005 г;
- 15-я Международная НТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» - г. Рязань, РГРТУ, 2008 г;
- 34-я Всероссийская НТК «Информационные и телекоммуникационные технологии. Подготовка специалистов для инфокоммуникационной среды» - г. Рязань, РВВКУС, 2009 г;
- 52-я НК МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» - г. Москва – Долгопрудный, 2009 г.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 работа, в том числе 4 статьи в межвузовских сборниках научных трудов, 3 статьи в журналах, включенных в перечень ВАК, 14 тезисов докладов на конференциях.

Внедрение результатов. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс Рязанского высшего военного командного училища связи, в учебный процесс Рязанского государственного радиотехнического университета, а также в ООО «Стэл Компьютерные системы», г. Москва.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 113 наименований, а также 7 приложений. Диссертация содержит 271 страницу, в том числе 148 страниц основного текста, 19 таблиц и 52 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены основные направления исследований в области ММО технологий, исходя из чего обоснована актуальность работы. Также дана краткая характеристика работы, поставлены цель и задачи диссертационного исследования, определены научная новизна и практическая ценность результатов исследования, обоснована структура диссертации.

В первой главе рассмотрен математический аппарат моделей беспроводных каналов передачи информации, проведен анализ стандартных моделей каналов передачи информации, оптимальных и квазиоптимальных методов обработки пространственно разнесенных сигналов. Сделан вывод о целесообразности использования при решении поставленных задач корреляционных стохастических моделей и аппарата комплексных чисел. В частности, для описания корреляции замираний сигналов в *не-направленных* антеннах приемной N -элементной МАС вводится нормированная $N \times N$ матрица пространственной корреляции Φ_R , составленная из комплексных коэффициентов корреляции замираний сигналов

в каждой из пар антенн приемной МАС: $\rho_{uv} = \int_0^{2\pi} p(\theta) e^{j2\pi D_{uv} \cos(\theta - \varphi_{uv})} d\theta$,

$u, v = 1 \dots N$,

где D_{uv} – нормированное к рабочей длине волны расстояние между парой приемных антенн u и v , φ_{uv} – азимут соединяющего антенны от-

резка, $p(\theta)$ – функция УСМ, нормированная так, что $\int_0^{2\pi} p(\theta) d\theta = 1$. Исхо-

дя из результатов экспериментальных исследований каналов, выполненных по заказу фирм-производителей оборудования для беспроводной передачи информации и опубликованных в виде научно-технических отчетов, приведена классификация стандартных форм УСМ и способов их аппроксимации. Отмечено, что, несмотря на указываемый в исследованиях отрицательный эффект корреляции на качественные характеристики РТСПИ, задача оптимизации ПС МАС по критерию минимума пространственной корреляции не ставится, критерий оптимизации не формализуется, анализ потенциального выигрыша оптимизации не производится. Исходя из вышесказанного, сформулированы задачи диссертационного исследования.

Во второй главе предложено решать поставленные задачи на примере ММО РТСПИ с каналом без межсимвольной интерференции, МАС из ненаправленных в плоскости азимута антенн, передачей узкополосного сигнала с двоичной фазовой манипуляцией (ДФМ) и обработкой его на приемной стороне по критерию минимума среднеквадратичной ошибки, а также возможностью пространственного кодирования по алгоритму V-BLAST. В качестве критерия оптимизации ПС МАС предложен критерий минимума вероятности битовой ошибки принятого сигнала. Для оценки энергетической эффективности оптимизации ПС МАС предложено рассматривать разность значений среднего последетекторного ОСШ \bar{q}_Σ до и после оптимизации при фиксированном уровне вероятности ошибки, что исключает влияние на результат естественного энергетического выигрыша от использования МАС. Указано, что для оценки эффективности оптимизации ПС также необходимо знать нижнее граничное значение ОСШ, к которому желательно приближение последетекторного ОСШ оптимизированной ПС. Для решения поставленной задачи проведен анализ зависимости вероятности ошибки приема с помощью МАС сигнала с двоичной фазовой манипуляцией от последетекторного ОСШ, глубины и корреляции замираний, наличия и веса луча прямой видимости. Установлено, что для фиксированного среднего последетекторного ОСШ \bar{q}_Σ *нижняя граница вероятности ошибки* достигается при отсутствии пространственной корреляции и независимых замираниях, то

есть, диагональной единичной матрице пространственной корреляции $\Phi_{R\ opt} = I_N$, $\rho_{uv} = 0$, $u, v = 1 \dots N$, $u \neq v$, а *верхняя граница вероятности ошибки* соответствует дружным замираниям, то есть, когда все элементы Φ_R по модулю равны единице, $|\rho_{uv}| = 1$, $u, v = 1 \dots N$.

По аналогии с известным в литературе понятием *числа эффективных степеней свободы* (ЭСС), которое показывает эквивалентное число каналов с независимыми замираниями, обеспечивающее ту же пропускную способность, что и заданное число каналов в условиях коррелированных замираний, введено понятие *числа эффективных степеней свободы* $\zeta(\Phi_R, \bar{q}_\Sigma)$ (*выигрыша разнесения*) как параметра распределения замираний Накагами в эквивалентном канале с одиночными антеннами, обеспечивающего ту же вероятность ошибки, что и рассматриваемый ММО канал с коррелированными замираниями при том же фиксированном среднем последетекторном ОСШ:

$$P(\bar{q}_\Sigma) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left(1 + \frac{\bar{q}_\Sigma}{\zeta(\Phi_R, \bar{q}_\Sigma) \sin^2 \vartheta} \right)^{-\zeta(\Phi_R, \bar{q}_\Sigma)} d\vartheta.$$

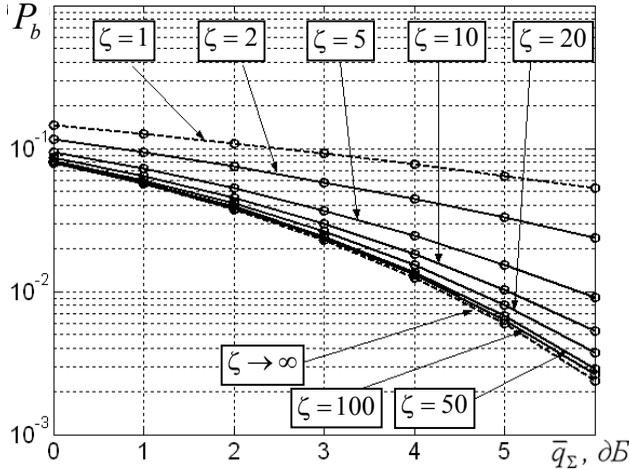
Показано, что для канала с приемной МАС и рэлеевскими замираниями число ЭСС в зависимости от пространственной корреляции изменяется в границах $1 \leq \zeta(\Phi_R, \bar{q}_\Sigma) \leq N$. Таким образом, полная декорреляция, соответствующая нижней границе вероятности ошибки, обеспечивает максимальное число ЭСС $\zeta(\Phi_R, \bar{q}_\Sigma) = N$ и, следовательно, максимальный выигрыш разнесения, а при полной корреляции, соответствующей верхней границе, число ЭСС минимально и равно единице, $\zeta(\Phi_R, \bar{q}_\Sigma) = 1$, то есть *выигрыш пространственного разнесения в данном случае отсутствует*.

Полученный результат обобщен на произвольную конфигурацию канала и глубину замираний. В частности, показано, что для канала с приемной МАС и замираниями Накагами число ЭСС в данном случае лежит в границах $m \leq \zeta(\Phi_R, \bar{q}_\Sigma) \leq mN$. При наличии луча прямой видимости замирания описываются законом распределения Рэлея-Райса с фактором Райса k . Показано, что число ЭСС в данном случае лежит в границах $k \leq \zeta(\Phi_R, \bar{q}_\Sigma) \leq Nk$, что подтверждается близостью распределений Рэлея-Райса и Накагами, а в обобщенном случае для замираний Накагами-Райса $mk \leq \zeta(\Phi_R, \bar{q}_\Sigma) \leq Nmk$.

В конце второй главы результат граничных значений числа ЭСС обобщен для случая ММО канала с применением пространственного кодирования в виде $mk \leq \zeta(\Phi_T, \Phi_R, \bar{q}_{s\Sigma}) \leq Nmk$, где Φ_T – $M \times M$ мат-

рица пространственной корреляции на передающей стороне, M – количество антенн передающей МАС.

Зависимости вероятности ошибки от последетекторного ОСШ при различных значениях числа ЭСС приведены на рис. 1.



Зависимость вероятности ошибки от ОСШ при коррелированных замираниях проходит между граничными кривыми, приближаясь к нижней границе при декорреляции. Потенциальную энергетическую эффективность оптимизации ПС предложено оценивать по разности значений ОСШ для граничного случая и неоптимизированной ПС на фиксированном уровне вероятности ошибки. Показано, что для стандартных моделей беспроводных каналов потенциальная энергетическая эффективность оптимизации ПС составляет в среднем 2-3 дБ.

В третьей главе разработана двумерная математическая модель пространственной корреляции и ПС, на основе ее и результатов главы 2 предложена целевая функция для оптимизации ПС и разработаны алгоритмы оптимизации, использующие методы градиентного обнаружения экстремумов и кластеризации целевой функции. Для разработки математической модели пространственной корреляции и ПС введена система координат, изображенная на рис. 2, а также понятие *комплексной двумерной функции пространственной корреляции* (ФПК), выражение для вычисления которой основано на приведенной в главе 1 формуле для вычисления коэффициента корреляции через УСМ:

$$\rho_{uv} = \rho(D_{uv}, \varphi_{uv}) = \rho(\Delta x_{uv}, \Delta y_{uv}) = \int_0^{2\pi} p(\theta) \cdot e^{j2\pi d_{uv}(\theta)} d\theta = \rho_{REuv} + j\rho_{IMuv},$$

$$\rho_{REuv} = \operatorname{Re}\{\rho_{Ruv}\} = \int_0^{2\pi} p(\theta) \cos(2\pi d_{uv}(\theta)) d\theta, \rho_{IMuv} = \operatorname{Im}\{\rho_{Ruv}\} = \int_0^{2\pi} p(\theta) \sin(2\pi d_{uv}(\theta)) d\theta,$$

где $d_{uv}(\theta)$ – проекция отрезка D_{uv} на прямую, образующую угол θ с осью x :

$$\begin{aligned} d_{uv}(\theta) &= (x_u - x_v) \cos \theta + (y_u - y_v) \sin \theta = \Delta x_{uv} \cos \theta + \Delta y_{uv} \sin \theta = \\ &= D_{uv} \cos(\theta - \varphi_{uv}) = D_{uv} \sin(\theta + \psi_{uv}). \end{aligned}$$

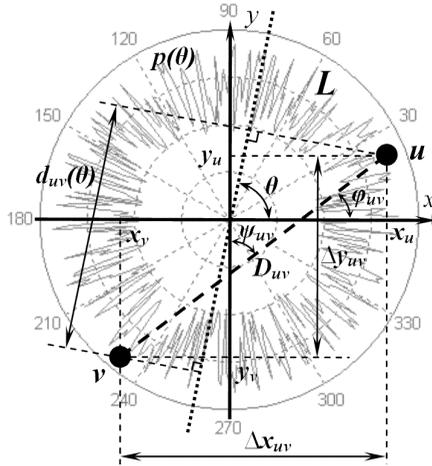


Рисунок 2

Принимая во внимание периодичность функции УСМ, предложен вариант задания УСМ и ФПК через коэффициенты разложения УСМ в ряд Фурье:

$$p(\theta) \approx \frac{1}{2\pi} + \sum_{m=1}^{2\eta} [a_m \cos(m\theta) + b_m \sin(m\theta)],$$

$$\rho_{RE}(D, \psi) \approx J_0(2\pi D) + 2\pi \sum_{n=1}^{\eta} J_{2n}(2\pi D) \cdot [a_{2n} \cos(2n\psi) - b_{2n} \sin(2n\psi)],$$

$$\rho_{IM}(D, \psi) \approx 2\pi \sum_{n=1}^{\eta} J_{2n-1}(2\pi D) \cdot [b_{2n-1} \cos((2n-1)\psi) + a_{2n-1} \sin((2n-1)\psi)],$$

где число пар коэффициентов разложения η предложено определять аналогично оценке Манаева для ширины спектра ЧМ сигнала:

$$\eta \cong \left\lceil \frac{1}{2} \left(1 + 2\pi D_L + \sqrt{2\pi D_L} \right) \right\rceil,$$

где $\lceil \cdot \rceil$ означает выделение целой части числа, D_L – максимальный размер области L , определяющий максимально возможное разнесение антенн МАС.

Как следует из результатов главы 2, оптимизация взаимного расположения пары антенн сводится к нахождению глобального минимума модуля ФПК или монотонной функции от него, например, *квадрата модуля ФПК* $\mu(\Delta x, \Delta y) = |\rho(\Delta x, \Delta y)|^2 = \rho_{RE}^2 + \rho_{IM}^2$. Исходя из этого, задача оптимизации взаимного расположения пары антенн сформулирована следующим образом: $\{\Delta x, \Delta y\}_{opt} = \arg \min_{\{\Delta x, \Delta y\} \in L} \mu(\Delta x, \Delta y)$. Для решения оп-

тимизационной задачи разработан ряд алгоритмов градиентного поиска локальных и глобального экстремумов целевой функции в пределах области L , использующих для преодоления многоэкстремальности кластеризацию целевой функции и порождение вокруг вновь найденного экстремума нескольких новых градиентных задач для поиска экстремумов противоположного типа. Предложенные алгоритмы различаются начальными размерами кластеров, количеством циклов разбиения кластеров на более мелкие и условиями порождения новых градиентных задач. Начальные значения шаговых коэффициентов составляют $0,05\lambda$ исходя из интерференционной природы ФПК. Остановка поиска экстремума происходит при принижении модулями шаговых коэффициентов пороговых значений, определяющих точность нахождения экстремума, при условии уменьшения шаговых коэффициентов в случае изменения направления градиента на противоположное. Имитационным моделированием работы алгоритмов на примере стандартных форм УСМ, классифицированных в первой главе, установлено, что наибольшую эффективность по времени работы и обнаружению локальных экстремумов показывают алгоритмы, основанные на порождении 3-5 градиентных задач на расстоянии $0,5\lambda$ от вновь найденного экстремума, что объясняется интерференционной природой ФПК.

Поскольку с ростом числа антенн оптимизационная задача $\{\Delta x_{uv}, \Delta y_{uv}\}_{opt} = \arg \min_{\{\Delta x_{uv}, \Delta y_{uv}\} \in L} P_b(\Delta x_{uv}, \Delta y_{uv})$ значительно усложняется для теоретического анализа и машинной обработки, для оптимизации ПС МАС предложена *двухэтапная процедура оптимизации*, основанная на построении подоптимальных ПС по локальным экстремумам целевой функции $\mu(\Delta x_{uv}, \Delta y_{uv})$, найденным предложенными выше градиентными методами, и последующей их коррекции методом конечных приращений путем поиска ближайшего *локального минимума*

$$\{\Delta x_{uv}, \Delta y_{uv}\}_{opt} = \arg \min_{\{\Delta x_{uv}, \Delta y_{uv}\} \in L} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \mu(\Delta x_{uv}, \Delta y_{uv}).$$

не гарантирует нахождение глобального экстремума целевой функции на области ее определения L , однако обеспечивает высокую степень приближения вероятности ошибки на бит к предельному значению, соответствующему независимым замираниям, что показано в следующей главе. При этом, временные затраты на работу описанного алгоритма меньше на 20-30% в среднем, на 100-250% в отдельных случаях, чем решение задачи поиска *глобального оптимума*

$$\{\Delta x_{uv}, \Delta y_{uv}\}_{opt} = \arg \min_{\{\Delta x_{uv}, \Delta y_{uv}\} \in L} \sum_{i=2}^N \sum_{j=1}^{i-1} \mu(\Delta x_{uv}, \Delta y_{uv})$$

В четвертой главе проведен анализ эффективности оптимизации ПС предложенным в главе 3 алгоритмом по критериям минимума вероятности ошибки и максимума эргодической шенноновской пропускной способности. Для сравнения рассчитаны кривые для рекомендованных ITU полуволновых линейных антенных решеток (ЛАР) с аналогичным количеством антенн.

Показано, что для моделей каналов с *узконаправленным* УСМ выигрыш от оптимизации составляет в среднем 2–3 дБ, для 5-элементной ЛАР, перпендикулярной основному направлению УСМ 3–5 дБ, для ЛАР, совпадающей с основным направлением – 0,2–0,6 дБ. При этом разница граничного ОСШ и ОСШ для оптимальной ПС в среднем составляет *сотые*, в отдельных случаях *десятые* доли дБ, что указывает на возможность в отдельных случаях эффективно оптимизировать ПС путем простой ориентации ЛАР перпендикулярно основному направлению УСМ. Показано, что для моделей каналов с *ненаправленным* УСМ эффективность оптимизации весьма мала и составляет доли дБ.

Методом имитационного моделирования исследованы вероятность ошибки, эргодическая шенноновская пропускная способность и пропускная способность, обеспечивающая 10% вероятность простоя, для ММО каналов с оптимальными ПС, пространственным кодированием и приемом по алгоритмам минимума среднеквадратичной ошибки (МСКО) и V-BLAST. Показано, что оптимизация как приемной, так и передающей МАС эффективна при направленном УСМ и дает в среднем по рассмотренным моделям каналов *одинаковый* энергетический выигрыш для МСКО и V-BLAST приемников по сравнению с ЛАР. В частности для 5-элементной ЛАР, перпендикулярной основному направлению УСМ, выигрыш составляет в среднем 1 – 3,5 дБ при рэлеевских замираниях. Для аналогичной ЛАР, совпадающей с основным направлением УСМ, энергетический выигрыш значителен и составляет *намного больше 6 дБ*, что объясняется большими значениями требуемого последетекторного ОСШ

для устойчивого приема пространственно кодированного сигнала такой ЛАР. Такие большие значения ОСШ указывают на фактический *срыв демодуляции* при попытке принять пространственно кодированный сигнал с помощью ЛАР, сонаправленной с УСМ, поскольку в алгоритмах пространственного декодирования присутствует операция решения обратной задачи, которая затруднена в случае плохо обусловленной канальной матрицы при сильно коррелированных замираниях. Таким образом, для ММО каналов пространственным кодированием оптимизация ПС обеспечивает декорреляцию замираний и, как следствие, *восстановление устойчивой демодуляции* и может явиться ключевым фактором обеспечения работоспособности ММО системы передачи информации.

В пятой главе предложен и рассмотрен метод оценивания УСМ и ФПК с помощью МАС из механически фиксированных ненаправленных антенн в плоскости азимута. Как было указано в третьей главе, *круговой профиль* ФПК $\rho(D_A, \varphi)$, то есть, ФПК с фиксированным расстоянием между парой антенн D_A , вычисляется через интеграл свертки по азимуту θ функции УСМ $p(\theta)$ и экспоненциальной фазовой функции $e^{j2\pi D_A \cos(\theta-\varphi)}$, из чего следует, что коэффициенты разложения кругового профиля в ряд Фурье вычисляются через произведение соответствующих коэффициентов разложения УСМ и фазовой функции в ряд Фурье. Оценка количества значащих пар η коэффициентов разложения фазовой функции в ряд Фурье по формуле Манаева исходя из ограничения на линейный размер МАС D_L приведена в главе 3. При таком ограничении появляется возможность дискретизировать непрерывные функции УСМ $p(\theta)$ и ФПК $\rho(D_A, \varphi)$, $D_A \leq D_L$ по теореме Котельникова с угловым дискретом $\Delta\theta = \Delta\psi = \frac{\pi}{2\eta}$ и решить систему линейных алгебраических

уравнений, связывающую коэффициенты разложения УСМ и отсчеты ФПК:

$$\mathbf{A} = \Phi_{RE} \mathbf{J}_{RE}^{-1}, \quad \mathbf{B} = \Phi_{IM} \mathbf{J}_{IM}^{-1}, \text{ где}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_2 & a_4 & \dots & a_{2\eta} & b_2 & b_4 & \dots & b_{2\eta} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 & b_3 & \dots & b_{2\eta-1} & a_1 & a_3 & \dots & a_{2\eta-1} \end{bmatrix},$$

$$\Phi_{RE} = \frac{1}{2\pi} \left[\rho_{RE}(D_1, \psi_1) - J_0(2\pi D_1) \quad \dots \quad \rho_{RE}(D_{2\eta}, \psi_{2\eta}) - J_0(2\pi D_{2\eta}) \right],$$

$$\Phi_{IM} = \frac{1}{2\pi} \left[\rho_{IM}(D_{2\eta+1}, \psi_{2\eta+1}) \quad \dots \quad \rho_{IM}(D_{4\eta}, \psi_{4\eta}) \right],$$

$2\eta \times 2\eta$ матрицы \mathbf{J}_{RE} и \mathbf{J}_{IM} составлены по следующему принципу:

$$j_{RE\ mn} = J_{2m}(2\pi D_A) \cos(2mn\Delta\psi), \quad j_{RE\ (m+2\eta)n} = -J_{2m}(2\pi D_A) \sin(2mn\Delta\psi),$$

$$j_{IM\ mn} = J_{2m-1}(2\pi D_A) \cos((2m-1)n\Delta\psi), \quad j_{IM\ (m+2\eta)n} = J_{2m-1}(2\pi D_A) \sin((2m-1)n\Delta\psi),$$

$$m = 1 \dots \eta, \quad n = 1 \dots 2\eta.$$

Приведенные выражения описывают *решения плохо обусловленной обратной задачи методом ортогонализации* и позволяют получить оценки коэффициентов a_m , b_m , $m = 1 \dots 2\eta$ по значениям ФПК $\rho\left(D_A, \frac{m\pi}{2\eta}\right)$, оцененным путем усреднения по представительной выборке тестовых сигналов $\hat{\Phi} = \frac{1}{E_S} \left(\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \mathbf{Y}_k \mathbf{Y}_k^H - 2\sigma^2 \mathbf{I}_N \right)$ с помощью 2η пар антенн, разнесенных на расстояние D_A и ориентированных по азимуту с угловым дискретом $\Delta\theta$. Примеры измерительных ПС МАС, обеспечивающих данное условие, приведены на рис. 3.

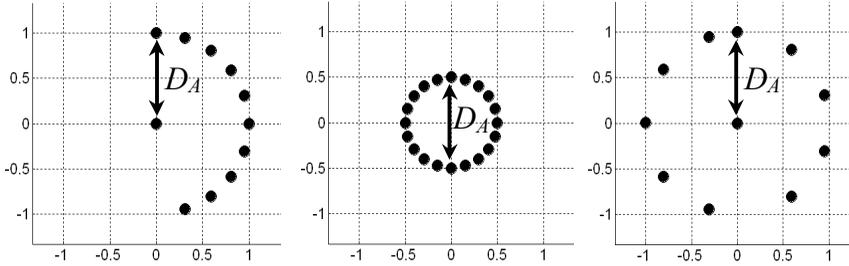


Рисунок 3

Линейный размер измерительной ПС МАС D_A следует выбирать по минимуму дисперсии ошибки измерения, верхний порог которой оценен соотношением

$$\mathfrak{v}(D_A) \leq \frac{1}{2\pi^2 \eta K} \sum_{m=1}^{2\eta} \frac{1}{[J_m(2\pi D_A)]^2}$$

и указывает в явном виде на точки неустойчивого решения обратной задачи, совпадающие с нулями функций Бесселя. Показано, что D_A , минимизирующее дисперсию ошибки, лежит в пределах $(1 \dots 2)D_L$, однако при этом нарушается условие теоремы Котельникова, что приводит к возрастанию ошибок измерения, особенно если УСМ имеет изрезанную форму. Выбор $D_A = D_L$ не является оптимальным с точки зрения минимума дисперсии ошибки, однако для приведенных в таблице конфигураций

измерительной ПС МАС рост дисперсии ошибки при таком выборе не является критическим, и его можно компенсировать увеличением объема выборки K .

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------|------------|----------|------------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| Число точек измер-я 2η | 4 | 6 | 10 | 14 | 18 | 26 | 32 | 40 | 52 | 72 |
| Угловое разрешение $\Delta\theta$ | 45° | 30° | 18° | 13° | 10° | 7° | 6° | 4,5° | 3,5° | 2,5° |
| Размер апертуры D_L | 0,25 | 0,5 | 1 | 1,5 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 10 |
| Норм. ошибка $K_1(D_L)$ | 135 | 87 | 125 | 212 | 424 | 2000 | 441 | 2480 | 349 | 581 |

Отмечено, что использование базиса Фурье, формулы Манаева и теоремы Котельникова в методе оценивания УСМ дает ответ на вопрос о ПС и количестве антенн измерительной МАС. Показано, что задача оценивания может быть устойчиво решена без применения базиса Фурье переопределением СЛАУ относительно отсчетов УСМ, однако при этом требуемое количество антенн измерительной МАС возрастает в 1,5-2 раза.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы, заключающиеся в следующем.

1. С использованием понятия эффективных степеней свободы получены обобщенные аналитические выражения верхней и нижней границ вероятности ошибки при передаче сигнала с двоичной фазовой манипуляцией через ММО канал с коррелированными замираниями, показывающие потенциальную эффективность оптимизации ПС.

2. Получены аналитические выражения, связывающие функцию пространственной корреляции и УСМ в базисе Фурье, значимое число коэффициентов разложения в ряд Фурье предложено оценивать по формуле Манаева для ширины спектра ЧМ сигнала. Сделан вывод о влиянии размеров одиночных и групповых отражателей сигналов на пространственную корреляцию замираний в паре антенн при ограничении на размер МАС.

3. Разработаны и исследованы градиентные алгоритмы формирования подоптимальных и оптимальных ПС МАС, учитывающие многоэкстремальность и интерференционную природу целевой функции.

4. По критерию минимума вероятности битовой ошибки принятого сигнала исследована эффективность полученных с помощью градиентных алгоритмов оптимальных и подоптимальных ПС для стандартных моделей ММО каналов с демодуляцией ДФМ сигналов по алгоритмам

МСКО и V-BLAST. Исследование найденных с помощью данных алгоритмов оптимальных ПС МАС показало существенное приближение кривых вероятности ошибки к аналитически определенным нижним границам и, следовательно, высокую эффективность предложенных алгоритмов.

5. Исследована зависимость эффективности оптимизации ПС МАС от степени направленности функции УСМ. Сделан вывод о целесообразности оптимизации при направленном УСМ с величиной углового расхождения $\sigma_{\phi} < 60^{\circ}$.

6. Исследована эргодическая шенноновская пропускная способность стандартных конфигураций моделей ММО каналов с оптимальными ПС, определенными с помощью предложенных алгоритмов, а также вероятность простоя при заданной скорости передачи для каналов с оптимальными ПС в сравнении со стандартной ПС, рекомендованной ITU.

7. Разработан метод оценивания функций пространственной корреляции и УСМ с использованием фиксированной МАС, основанный на оценивании функции пространственной корреляции в точках измерения, определенных исходя из заданного углового разрешения или ограничений на размер МАС, и дальнейшем пересчете найденных оценок в коэффициенты разложения УСМ в базисе Фурье путем решения плохо обусловленной обратной задачи. Определенные координаты точек измерения ФПК обеспечивают ортогональность столбцов обрабатываемой матрицы и, как следствие, устойчивое решение СЛАУ относительно коэффициентов разложения УСМ в базисе Фурье. На основе определенных координат точек измерения ФПК ПС МАС оптимизирована под задачу оценивания ФПК и УСМ.

Полученные в работе оптимальные и подоптимальные пространственные структуры, а также алгоритмы оптимизации пространственных структур могут найти применение в беспроводных системах передачи информации, использующих разнесенный прием и передачу с помощью МАС, в частности, в системах телеметрии, радиоуправления и радиомониторинга.

Основные положения диссертации опубликованы в работах

1. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Пропускная способность флюктуирующего канала связи с оптимизацией пространственной структуры // Системы и устройства передачи и обработки информации / Межвуз. сб. науч. трудов. Вып. 3. - С.Пб.: Гидрометеиздат, 2003. - С.94-98.
2. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Влияние пространственной корреляции многолучевого канала на оптимальную пространственную структуру антенной системы // Методы и устройства обработки сигналов в радиотех-

нических системах / Межвуз. сб. научн. трудов. Вып. 2. - Рязань.: РГРТА, 2003. - С.73-78.

3. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Градиентные алгоритмы оптимизации пространственной структуры антенной системы // Сб. статей всероссийской НТК «Современные методы и средства обработки пространственно-временных сигналов». – Пенза, 2003. - С.41-42.

4. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Двумерная пространственная структура антенной системы в многолучевом канале связи // Материалы 5-ой международной НТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации» - ПТСПИ'2003, 1-4 июля 2003, г. Владимир. – С. 200-202.

5. Паршин Ю.Н., Брагин А.В., Ксендзов А.В. Разработка пространственных структур радиолокационных и телекоммуникационных систем // Сб. тезисов докладов Всероссийской НТДК «Информационно-телекоммуникационные технологии» - М.: МАИ, 2003. – С. 74.

6. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Оптимизация пространственных структур многоантенных систем мобильной связи // Материалы 12-й международной НТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» - Рязань.: РГРТА, 2004. - С.40-42.

7. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Анализ пропускной способности SIMO канала связи с оптимальной пространственной структурой // X международная научно-техническая конференция «Радионавигация, радиолокация, связь». Том 2. 13-15 апреля 2004. – Воронеж, ВГУ, 2004. – С. 1140-1143.

8. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Оптимизация пространственной структуры и распределения мощности передачи MISO канала // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах/ Межвуз. сб. научн. трудов. - Рязань.: РГРТА, 2004. - С.110-118.

9. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В., Орлов В.В. Методы оптимизации пространственных структур радиосистем // Информационно-телекоммуникационные технологии. Тезисы докладов ВНТК. Сочи, 19-26 сентября, 2004 г. – Сочи: Изд. МЭИ(ТУ), 2004. – С. 80-82.

10. Ксендзов А.В. Влияние пространственной структуры на вероятность ошибки передачи кодированных данных через MIMO канал связи // Матер. междуна. научн. конф. «Информационный подход в естественных, гуманитарных и технических науках», ч. 4. - Таганрог: Изд-во "Антон", ТРТУ, 2004. - С. 39-42.

11. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Надежность передачи данных в MIMO канале с коррелированными замираниями и оптимизацией пространственной структуры // Труды LX науч. сессии, посвященной Дню радио – М., 2005. Вып. LX-2. С. 244-247.

12. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Влияние пространственной корреляции на эффективность оптимизации пространственной структуры многоантенной системы при разнесенном приеме // Вестник Рязанской государственной радиотехнической академии, вып. 19. – Рязань: Изд. РГРТУ, 2006. С. 54-62.
13. Ксендзов А.В. Измерение углового спектра с помощью приемной многоантенной системы // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций «РТ-2007»: Материалы 3-й междунар. молодежной НТК 16-21 апреля 2007 г. – Севастополь: Изд. СевНТУ, 2007. С. 73.
14. Ксендзов А.В., Шомов С.И. Оптимизация пространственной структуры базовой станции канала связи, описываемого моделью COST259 // Материалы 15-й международной НТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций» - Рязань.: РГРТУ, 2008. - С.62-64.
15. Ксендзов А.В. Взаимосвязь пространственной корреляции и углового спектра мощности // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: материалы XIII Всероссийской СНТК. Часть 1. - Рязань.: РГРТУ, 2008. - С.65-67.
16. Ксендзов А.В., Терехин Е.А. Оценивание углового спектра мощности на основе пространственной корреляции замираний в многоантенной системе. // Матер. междуна. научн. конф. "Информация, сигналы, системы: вопросы методологии, анализа и синтеза", ч. 3 - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. - С. 34 - 38.
17. Ксендзов А.В., Миклашевич А.Н. Декорреляция пространственных замираний путем оптимизации углового положения линейной антенной решетки // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах / Межвуз. сб. научн. трудов. - Рязань.: РГРТУ, 2008. - С.56-65.
18. Паршин Ю.Н., Ксендзов А.В. Оценивание функции пространственной корреляции и углового спектра с помощью многоантенной системы // Радиотехника. – 2009. – №3. – С. 16–28. (Изв. вузов).
19. Ксендзов А.В. Эффективные степени свободы многоантенной системы с коррелированными замираниями // Материалы докладов 34-й всероссийской НТК «Информационные и телекоммуникационные технологии. Подготовка специалистов для инфокоммуникационной среды». Часть I. – Рязань: изд-во РВВКУС, 2009. – С.314-316.
20. Ксендзов А.В. Влияние корреляции замираний сигналов в многоантенной системе на число эффективных степеней свободы // Труды 52-й науч. конф. МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук»: ч. I. Радиотехника и кибернетика. Том 1. – М.: МФТИ, 2009. – С. 113-116.
21. Ксендзов А.В. Границы вероятности ошибки приема сигнала с двоичной фазовой манипуляцией в ММО канале с коррелированными замираниями // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Вып. 31. – Рязань: РГРТУ, 2010. С. 20–28.

Ксендзов Александр Валентинович

**ОПТИМИЗАЦИЯ И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СТРУКТУР РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 17.05.2010 г.

Формат бумаги 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 002901.

ООО НПЦ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ».

390035, Рязань, ул. Островского, 21/1.