

На правах рукописи



Нгуен Винь Нгок Тхуан

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ММО СИСТЕМ
ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
В УСЛОВИЯХ ПРОСТРАНСТВЕННО
КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХ**

Специальность:

2.2.13. - «Радиотехника, в том числе
системы и устройства телевидения»
(технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2024

Работа выполнена на кафедре радиотехнических устройств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».

Научный руководитель: **Паршин Юрий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехнических устройств ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», г. Рязань

Официальные оппоненты: **Аверина Лариса Ивановна**, доктор физико-математических наук, доцент, заведующая базовой кафедрой системы телекоммуникаций и радиоэлектронной борьбы на базе АО «Концерн «Созвездие», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж

Федосов Валентин Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Таганрог

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики», г. Самара

Защита состоится 18 декабря 2024 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских диссертаций 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на сайте университета <https://rsreu.ru/post-graduate/dissertatsii>.

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Учёный секретарь диссертационного совета 24.2.375.03, д.т.н,



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Интеграция программного и аппаратного обеспечения в беспроводные системы является ведущей мировой тенденцией в развитии технологий, направленных на сбор, обработку и передачу данных в наш цифровой век. Системы беспроводной передачи данных соответствуют высоким стандартам с точки зрения надежности передачи данных, оптимизации энергопотребления и производительности при наличии как внешних, так и внутренних системных помех. Этим системам также необходимо учитывать сильные эффекты многолучевости при распространении радиоволн и значительное ослабление радиосигнала. Обеспечение высокой помехоустойчивости и надежности системы в условиях многолучевости имеет решающее значение для стабильной передачи данных.

В настоящее время основное внимание уделяется использованию пространственных ресурсов и применению алгоритмов предварительной обработки, пространственного кодирования и декодирования сигналов. Одно из решений предполагает использование методов разнесения, основанных на различных параметрах, включая пространственное разнесение на передающей и приемной сторонах. Технология ММО (Multiple Input Multiple Output) используется для эффективного пространственного мультиплексирования и многопользовательской функциональности. Одним из условий высокой эффективности ММО систем является снижение априорной неопределенности характеристик многолучевости путем тестирования канальной матрицы.

Чтобы соответствовать современным стандартам энергоэффективности систем передачи данных, выдвигается несколько новых научных задач. К ним относятся определение потенциальной эффективности системы радиоприема маломощного сигнала под воздействием сложных внешних и внутрисистемных помех, устранение статистической априорной неопределенности их параметров для реализации оптимальных алгоритмов обработки, оптимизация антенных систем для повышения помехоустойчивости при приеме сигнала малой мощности. Особое внимание уделяется повышению эффективности систем передачи данных ММО при неопределенности матрицы каналов, адаптации пространственной структуры системы ММО к условиям естественной многолучевости, что стимулирует разработку инновационных принципов создания энергоэффективных устройств для генерации, передачи и приема сигналов.

Степень разработанности темы. В области помехоустойчивой обработки сигналов и применения ММО технологии основополагающие результаты получены отечественными и зарубежными учеными, среди которых широко известны: М. В. Максимов, К. К. Венскаускас, М.

А. Быховский, А. С. Котоусов, С. В. Козлов, Ю.Г. Сосулин, Ю.Н. Паршин, Е. А. Маврычев, В. В. Костров, В. А Григорьев, В.Г. Карташевский, М. Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, А. П. Лукошкин, С.И. Вексин, А.Г. Флакман, В.П. Федосов, Л.И. Аверина, Р.А. Монзинго (R.A. Monzingo), С. М. Аламоути (Alamouti S. M.), Г. Й. Фочини (Foschini G. J.), И. Е. Телатар (I.E. Telatar), Кухн В. (V. Kuhn) и многие другие.

Несмотря на глубокую научную проработку вопросов помехоустойчивой обработки ММО сигналов, освещение этих вопросов недостаточно. Это объясняется в первую очередь бурным прогрессом в области теории помехоустойчивой обработки сигналов и применения ММО технологии, например в беспроводных системах передачи информации.

Во многих работах авторы при расчете характеристик ММО системы обработке сигналов пренебрегают статистической априорной неопределенностью параметров помех и канальных коэффициентов. Алгоритмы пространственно-временной обработки сигналов, полученные методами теории оптимальных статистических решений, позволяют достичь предельной эффективности при условии, что необходимые статистические характеристики сигналов и помехи известны абсолютно точно. На практике полное статистическое описание наблюдаемого процесса отсутствует, а на приемной стороне вероятностные характеристики известны лишь частично. Поэтому возникает задача преодоления статистической априорной неопределенности характеристик сигналов и помех. Способы решения этой задачи различные для сигнала и помех. Канальная матрица, характеризующая передачу сигнала, определяется методами тестирования канала. Характеристики помех, которые не зависят от характеристик сигнала, определяются различными методами адаптации.

Целью исследования является повышение помехоустойчивости и разработка и анализ алгоритмов помехоустойчивого приема сигналов в ММО системах передачи информации при действии пространственно коррелированных помех.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Анализ эффективности ММО систем передачи информации при действии пространственно коррелированных мешающих сигналов.
2. Разработка алгоритмов помехоустойчивого приема сигналов в ММО системах передачи информации при действии пространственно коррелированных помех.
3. Разработка алгоритмов помехоустойчивого приема сигналов в ММО системах передачи информации при действии пространственно

коррелированных помех в условиях априорной неопределенности параметров помех.

4. Техническая реализация алгоритмов помехоустойчивого приема в ММО системах передачи информации при действии пространственно коррелированных помех.

Методы исследования. В диссертационной работе при проведении исследования используются методы теории информации, теории статистических решений, теории оптимальной обработки сигналов, линейной и векторной алгебры, теории матриц. Анализ получаемых данных проводится с использованием численных методов многомерной оптимизации, методов статистического моделирования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Предложен метод помехоустойчивого приема сигналов в ММО системах при действии пространственно коррелированных помех, использующий пространственную декорреляцию помех и последующее пространственное декодирование ММО сигналов на основе измененной канальной матрицы.

2. Предложен алгоритм пространственной компенсации помехи по критерию минимума мощности помех в каждом пространственном канале, использующий помеховые сигналы в других пространственных каналах.

3. Проведен анализ и получены зависимости помехоустойчивости и пропускной способности ММО системы от числа приемных антенн при различных пространственных структурах.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Применение фильтра-декоррелятора пространственно коррелированных помех реализует оптимальную обработку сигналов ММО системы передачи информации и уменьшает вероятность ошибки в 50...100 раз.

2. Необходимое число приемных антенн ММО системы определяется числом пространственно коррелированных помех и числом передающих антенн ММО системы, что обеспечивает увеличение пропускной способности в 2,5 раза при увеличении числа приемных антенн с 6 до 8.

3. Декорреляторы помех на основе препроцессора Грама-Шмидта с адаптивным циклом Хауэллса-Эпплбаума реализуют асимптотически оптимальную компенсацию помех, а адаптивные МСКО компенсаторы с алгоритмом наискорейшего спуска реализуют квазиоптимальную пространственную компенсацию помех с коэффициентом подавления помех 15...25 дБ.

4. Экспериментальное исследование пропускной способности ММО беспроводной сети WiFi при различном числе антенн в условиях действия пространственно коррелированных помех показало, что с увеличением числа приемных антенн от 1 до 4 пропускная способность увеличивается в 1,6 раза.

Внедрение результатов работы. Результаты, полученные в работе, внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» на кафедре радиотехнических устройств.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. 126 Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании», г. Рязань, 2021 г.

2. 6, 8 Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства», г. Рязань, 2021, 2023 гг.

3. Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Современные технологии в науке и образовании» СТНО-2022, г. Рязань, 2022 г.

4. 28, 29, 30 Международные конференции «Радиолокация, навигация, связь», г. Воронеж, 2022, 2023, 2024 гг.

5. 25th, 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), г. Москва, 2023, 2024 гг.

6. 1 Научно-практическая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Инновационные технологии в науке и технике», г. Рязань, 2023 г.

Публикации по теме диссертации. Полученные основные теоретические и практические результаты диссертационного исследования опубликованы в 14 трудах, в том числе в 2 научных статьях в журналах, рекомендуемых ВАК к опубликованию основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, в 2 научных статьях, опубликованных в зарубежных изданиях, входящих в базы цитирования Scopus, в 4 других изданиях, индексируемых РИНЦ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав с выводами, заключения, списка литературных источников, состоящего из 90 наименований. Общий объем диссертации составляет 145 страниц машинописного текста, включая 52 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определена научная новизна, описана практическая значимость результатов, изложены основные положения, выносимые на защиту, приведены данные о внедрении результатов, апробации работы и публикациях, представлена структура и объем диссертации.

В первой главе диссертации рассмотрены методы и алгоритмы помехоустойчивого приёма в ММО системах передачи информации.

Поставлена задача исследования помехоустойчивости ММО системы, состоящей из последовательного выполнения декорреляции пространственно коррелированных помех и пространственного декодирования ММО сигналов. Предложена модель ММО коррелированных канальных коэффициентов, которая изображена на рис. 1. В рассматриваемой модели учитывались пространственная структура приемной и передающей антенных систем, а также расположение рассеивателей в окрестности антенных систем. Полагаем, что в окрестности приемной антенны располагаются рассеиватели, рассеянная мощность которых в зависимости от угловой координаты образует в точке приема угловой спектр $p_{TX}(\theta)$ и $p_{RX}(\theta)$. Отсюда получается диффузная матрица канальных коэффициентов $\underline{\mathbf{H}}^{\text{DIF}}$.

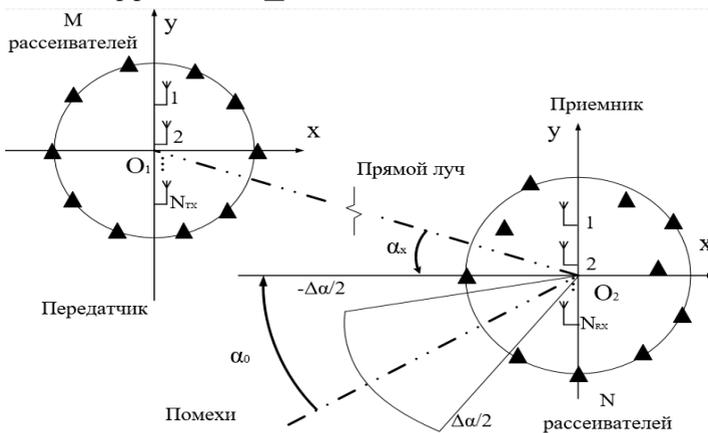


Рис.1. Модель коррелированных канальных коэффициентов

Распространение сигнала в ММО системе может происходить также по прямому лучу, представленному в виде нанальной матрицы прямого луча $\underline{\mathbf{H}}^{\text{LOS}}$. Общая канальная матрица с учетом прямого луча

и диффузного рассеивания при распространении радиоволн получается весовым сложением соответствующих матриц $\underline{\mathbf{H}}^{\text{LOS}}$ и $\underline{\mathbf{H}}^{\text{DIF}}$:

$$\underline{\mathbf{H}} = \sqrt{\frac{1}{K_R + 1}} \underline{\mathbf{H}}^{\text{DIF}} + \sqrt{\frac{K_R}{K_R + 1}} \underline{\mathbf{H}}^{\text{LOS}}, \quad (1)$$

где K_R – фактор Райса.

Сигнал в ММО системе, содержащей антенные системы (АС) из N_{TX} передающих антенн и АС из N_{RX} приемных антенн, расположенных на плоскости с координатами $x_m, y_m, m = 1, \dots, N_{\text{TX}}, x_n, y_n, n = 1, \dots, N_{\text{RX}}$, а также K источников помех, расположенных в той же плоскости (рис.3), образуется путем преобразования вектора переданных сигналов $\underline{\mathbf{X}}$ в среде распространения и сложении его с тепловым шумом и помехами: $\underline{\mathbf{Y}} = \underline{\mathbf{H}}\underline{\mathbf{X}} + \underline{\mathbf{V}}$, где $\underline{\mathbf{X}}$ – вектор-столбец передаваемых символов, $\underline{\mathbf{V}}$ – вектор-столбец шумов и помех, $\underline{\mathbf{H}}$ – матрица канальных коэффициентов среды распространения размерностью $N_{\text{RX}} \times N_{\text{TX}}$, все антенны ненаправленные и одинаковые на передающей и приемной сторонах.

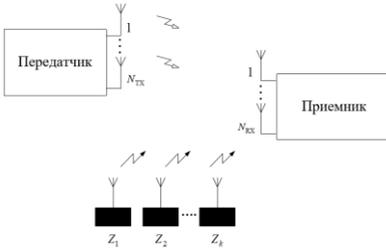


Рис.3. Пространственная структура ММО системы с помехами

Матрица комплексных коэффициентов усиления $\underline{\mathbf{H}}$ отражает преобразование амплитуды и фазы сигнала при прохождении в среде распространения с учетом пространственных структур передающих и приемных АС. Полагается, что в среде распространения происходит как прямое распространение радиоволн, так и их диффузное рассеяние.

Сформулированы задачи диссертационного исследования, направленные на повышение помехоустойчивости, а также технической реализации алгоритмов помехоустойчивого приема в ММО системах передачи информации.

Во второй главе проведен анализ влияния пространственно коррелированных помех на пропускную способность и вероятность простоя ММО системы передачи информации. Сначала рассматривается влияние пространственных структур АС на пропускную способность и вероятность

простая ММО системы передачи информации. Рассматриваются некоторые конфигурации АС: линейная, кольцевая, кольцевая с центром, «подсолнух» и «салфетка Серпинского» для $N_A = 9$. Также рассматриваются влияние количества антенн и расстояния между элементами АС на пропускную способность и вероятность простоя ММО системы передачи информации при действии пространственно коррелированных помех.

Помеховая ситуация $\underline{\mathbf{V}}$ представляет собой сумму двух составляющих: $\underline{\mathbf{V}} = \underline{\mathbf{Z}} + \underline{\mathbf{N}}$, где $\underline{\mathbf{Z}} = \{z_1, z_2, \dots, z_{N_{RX}}\}^T$ – пространственно-коррелированная помеха, $\underline{\mathbf{N}} = \{n_1, n_2, \dots, n_{N_{RX}}\}^T$ – некоррелированный шум с дисперсией P_N . Пространственно-коррелированная помеха задается K источниками некоррелированных во времени гауссовских процессов p_k с дисперсией P_k , приходящими с направлений, задаваемых азимутом α_k и углом места γ_k , $k = 1, \dots, K$. В пространстве все помехи суммируются в соответствии с пространственной структурой приемной АС и расположением помех: $\underline{\mathbf{Z}} = \sum_{k=1}^K p_k \underline{\mathbf{V}}_k$,

где $\underline{\mathbf{V}}_k = \left\{ v_{kn} = \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} \sin \gamma_k (x_n \cos \alpha_k + y_n \sin \alpha_k) \right] \right\}$, $n = 1, \dots, N_{RX}$ –

направляющий вектор k – й помехи, λ – длина волны. Так как помехи и шум статистически независимы, то корреляционная матрица помехи равна сумме корреляционных матриц коррелированной и некоррелированной составляющих: $\underline{\mathbf{R}}_V = \underline{\mathbf{R}}_Z + \underline{\mathbf{R}}_N$, где $\underline{\mathbf{R}}_Z = \sum_{k=1}^K P_k \underline{\mathbf{V}}_k \underline{\mathbf{V}}_k^H$ – корреляционная матрица активной составляющей помехи.

Известен метод подавления коррелированных помех, состоящий в предварительном преобразовании помехи в белый шум, то есть декорреляция помехи. В системах ММО также целесообразно декоррелировать пространственно коррелированные помехи с использованием линейного фильтра с матричным коэффициентом передачи: $\underline{\mathbf{W}}_{DK} = \sqrt{P_N} [\text{chol}(\underline{\mathbf{R}}_V)]^{-1}$, где $\text{chol}(\square)$ – преобразование Холецкого.

Учитывая преобразование сообщения $\underline{\mathbf{X}}$ при декорреляции помехи, введем новую канальную матрицу $\underline{\mathbf{H}}_1 = \underline{\mathbf{W}}_{DK} \underline{\mathbf{H}}$. После этого можно использовать выражение для пропускной способности ММО системы в

условиях действия пространственно-некоррелированных помех и шумов и заданной реализации канальной матрицы $\underline{\mathbf{H}}_i$:

$$C_H = \log_2 \det \left(\mathbf{I}_{N_{\text{RX}}} + \frac{q}{N_{\text{TX}}} \underline{\mathbf{H}}_i \underline{\mathbf{H}}_i^H \right), \quad (2)$$

где $q = \frac{P_X}{P_N}$ – отношение сигнал-шум, P_X – дисперсия суммы всех сигна-

лов, передаваемых всеми передатчиками, $\mathbf{I}_{N_{\text{RX}}}$ – единичная матрица размера $N_{\text{RX}} \times N_{\text{RX}}$. В дальнейшем для количественной оценки пропускной способности используем эргодическую пропускную способность, получаемую усреднением (2) по ансамблю реализаций канальных матриц

$$C_E = \overline{C_H} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_H(i), \text{ где } N - \text{ число реализаций канальной матрицы } \underline{\mathbf{H}}_i$$

и азимута помех $\alpha_k, k=1, \dots, K$, а угла места $\gamma_k = 90^\circ$. Для характеристики ММО системы в дальнейшем используется вероятность простоя, равная вероятности реализации пропускной способности $P_{\text{OUT}} = P(C_H \leq C_{\text{OUT}})$ ниже некоторого минимально допустимого значения C_{OUT} .

Анализ зависимости пропускной способности и вероятности простоя показал, что пространственные структуры имеют определяющее значение для пропускной способности ММО канала при действии пространственно коррелированных помех. При действии пространственно-коррелированных помех пропускная способность уменьшается в несколько раз при заданном числе передающих и приемных антенн. Способность подавления помех зависит от количества приемных антенн. При увеличении числа источников помех K пропускная способность стремится к нулю когда $K > N_{\text{RX}}$, а при достаточном количестве антенн $N_{\text{RX}} \geq K + N_{\text{TX}}$ пропускная способность увеличивается в 2,5 раза при увеличении числа приемных антенн с 6 до 8. Пропускная способность также зависит от расстояния между антенными элементами. Исследование рассматривает влияние различных конфигураций антенн на производительность ММО систем в условиях помех.

В третьей главе разработаны алгоритмы помехоустойчивого приема сигналов в ММО системах передачи информации при действии пространственно коррелированных помех с неизвестными параметрами. Предложен и исследован алгоритм пространственной обработки с отдельным подавлением помехи и пространственным декодированием

ММО сигнала, структурная схема которого показана на рис.4. В качестве критерия оптимальности алгоритмов рассматриваются критерия минимума среднего квадрата ошибки (МСКО) и критерия максимума правдоподобия (МП). Оценка сигнала на выходе АС получена в результате весового суммирования сигналов элементов АС: $\hat{\underline{S}} = \underline{W}\underline{Y}$. В результате формируется выходной сигнал ММО системы, который в дальнейшем используется как статистика для принятия решений.

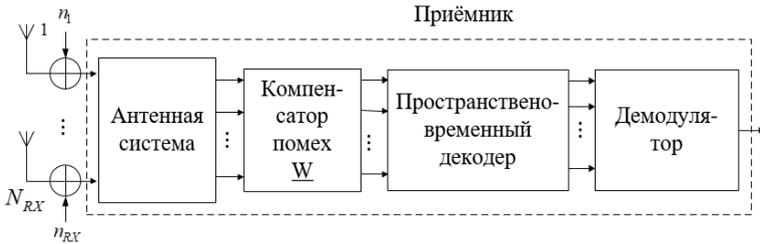


Рис.4. Структурная схема пространственной обработки с отдельным подавлением помехи и пространственным декодированием

Рассмотрены следующие алгоритмы: 1) оптимальный алгоритм обработки по критерию МСКО, 2) адаптивный алгоритм обработки по критерию МСКО, 3) оптимальный алгоритм обработки по критерию МП с пространственным кодированием Аламоути, 4) адаптивный алгоритм обработки по критерию МП с пространственным кодированием Аламоути. Получен алгоритм оценивания ММО сигнала по критерию минимума среднего квадрата ошибки, объединяющий компенсацию помехи и пространственное декодирование. Данный алгоритм включает обращение матрицы, что позволяет отнести его к классу «Zero Forcing».

При расчете вектора весовых коэффициентов использован критерий минимума среднего квадрата ошибки выделения полезного сигнала: $\underline{W}_{\text{МСКО}} = \arg \min_{\underline{W}} \|\underline{S}_{\text{ОП}} - \hat{\underline{S}}\|^2 = \arg \min_{\underline{W}} \|\underline{S}_{\text{ОП}} - \underline{W}\underline{Y}\|^2$, где $\underline{S}_{\text{ОП}}$ – тестовый сигнал с дисперсией $D_{\text{ОП}}$. При такой оптимизации весового вектора учитывается как корреляционная матрица помехи \underline{R}_V , так и канальная матрица \underline{H} . Отсюда оптимальный весовой вектор равен: $\underline{W}_{\text{МСКО}} = \underline{R}_S \underline{H}^H (\underline{H} \underline{R}_S \underline{H}^H + \underline{R}_V)^{-1}$.

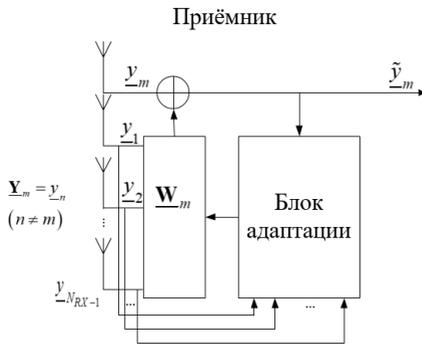


Рис. 5. Компенсатор помехи для m -го пространственного канала

состоящий из нескольких по числу приемных антенн компенсаторов помех в каждой приемной антенне. Для пространственной компенсации помех в каждом отдельном канале ММО систем N_{RX} антенн разбиты на две группы из 1 и $(N_{RX} - 1)$ элементов (рис.5). Группа из $(N_{RX} - 1)$ антенн предназначена для пространственной компенсации помех и содержит элементы, которые осуществляют регулировки амплитуды и фазы сигналов и помех. Таким образом, сигналы на выходах можно представить в виде: $\underline{\mathbf{Y}} = \begin{bmatrix} y_m \\ \underline{\mathbf{Y}}_m \end{bmatrix}, \underline{\mathbf{Y}}_m = \{y_n, n = 1, \dots, N_{RX}, n \neq m\}$.

Компенсация помехи в m -м пространственном канале осуществляется линейным компенсатором помехи $\tilde{y}_m = y_m - \underline{\mathbf{W}}_m \underline{\mathbf{Y}}_m, m = 1, \dots, N_{RX}$, где $\underline{\mathbf{Y}}_m$ – наблюдаемый процесс $(N_{RX} - 1)$ каналов кроме m -ого, $\underline{\mathbf{W}}_m$ – вектор-строка весовых коэффициентов m -ого компенсатора. Результатом обработка является компенсация помехи, оптимальная по критерию минимума дисперсии помехи на выходе каждого из пространственных каналов.

Алгоритм адаптации линейного алгоритма компенсации помех по критерию МСКО при априорной неопределенности параметров помех имеет вид:

$$\underline{\mathbf{W}}_m(k+1) = \underline{\mathbf{W}}_m(k) + 2\gamma_a u_m(k) \underline{\mathbf{Y}}_m^H(k), m=1, \dots, N_{RX}.$$

Использование фильтра декоррелятора помехи значительно уменьшает вероятность битовой ошибки. При увеличении числа приемных антенн N_{RX} до 10 эффективность декоррелятора повышается, что уменьшает вероятность битовой ошибки более, чем на порядок.

При априорной неопределенности параметров помех предлагается адаптивный компенсатор помех,

Проведенный анализ показал корреляционной матрицы помех в пространственных каналах, что компенсация помех на выходе многоканального компенсатора в значительной степени декоррелирует помеху и поэтому реализует обработку близкую к оптимальной.

Предложен алгоритм обработки ММО сигнала, содержащий оценку сигнала по критерию максимального правдоподобия в условиях пространственно коррелированных помех, пространственный декодер Аламоути и демодулятор.

Показано, что адаптивным вариантом фильтра декоррелятора является препроцессор Грама-Шмидта, использующий адаптивные циклы Хауэллса-Эпплабаума. Вследствие простоты циклом адаптации обеспечивается устойчивая сходимость адаптивной подстройки весовых коэффициентов.

В четвертой главе проведен расчет пропускной способности ММО системы в зависимости от пространственной структуры с учетом погрешностей канальной матрицы коэффициентов при наличии помех. Ошибки канальных коэффициентов вызывают помехи в собственных лучах, а по мере увеличения относительной погрешности канальных коэффициентов от 5% до 20% пропускная способность ММО системы уменьшается на 0,1...0,5 бит/с/Гц.

Разработан вариант технической реализации алгоритма приема ММО сигналов при действии мешающих сигналов на отладочной плате микросхемы Virtex-II Pro XC2VP30-4FF1152C, реализующий параллельную организацию процесса вычисления для уменьшения вычислительных затрат. Показано, что этот вариант обеспечивает реализацию разработанных в диссертации алгоритмов обработки сигналов WiFi IEEE 802.11n.

Проведен натурный эксперимент для определения пропускной способности канала связи и устройства WiFi в зависимости от числа антенн при действии пространственно коррелированных помех. Полученные результаты показывают что, при действии пространственно-коррелированных помех пропускная способность увеличивается в 1,6 раза с увеличением числа приемных антенн, а способность подавления помех зависит от количества приемных антенн.

В заключении описаны основные результаты диссертационного исследования:

1. Разработана модель ММО коррелированных канальных коэффициентов, которая учитывалась пространственная структура и угловой спектр приемной и передающей антенных систем. Предложен принцип построения ММО системы, состоящей из последовательного

выполнения декорреляции пространственно коррелированных помех и пространственного декодирования ММО сигналов.

2. Проведен анализ пропускной способности и вероятности простоя в зависимости от пространственной структуры ММО системы: конфигурации антенной системы, количество передающих антенн и приемных антенн, расстояния между элементами при действии пространственно коррелированных помех. Необходимое число приемных антенн ММО системы определяется числом пространственно коррелированных помех и числом передающих антенн ММО системы, что обеспечивает увеличение пропускной способности в 2,5 раза при увеличении числа приемных антенн с 6 до 8. Полученные результаты позволяют обосновать выбор типа конфигурации антенн для компенсации помех в беспроводных ММО системах, работающих в сложной помеховой обстановке.

3. Разработаны помехоустойчивые оптимальные и адаптивные алгоритмы обработки ММО сигналов, включая методы компенсации помех и пространственного декодирования. Предложены алгоритмы, основанные на критериях минимума среднего квадрата ошибки и максимального правдоподобия, а также методы с отдельным подавлением помех и декодированием. Исследования показали, что использование фильтра декоррелятора помехи уменьшает вероятность битовой ошибки в 50...100 раз. Декорреляторы помех на основе препроцессора Грам-Шмидта с адаптивным циклом Хауэллса-Эпплбаума реализуют асимптотически оптимальную компенсацию помех, а адаптивные МСКО компенсаторы с алгоритмом наискорейшего спуска дают квазиоптимальную пространственную декорреляцию помех с коэффициентом подавления помех 15...25 дБ. Предложенные адаптивные методы позволяют эффективно обрабатывать ММО сигналы в условиях априорной неопределенности параметров помех.

4. Рассмотрены вопросы технической реализации алгоритмов помехоустойчивого приёма в ММО системах при наличии пространственно коррелированных помех. Проведен расчет пропускной способности ММО системы с учетом погрешностей канальной матрицы, показавший снижение пропускной способности на 0,1...0,5 бит/с/Гц при увеличении коэффициента погрешности от 5% до 20%. Разработан вариант технической реализации алгоритма приема ММО сигналов на отладочной плате микросхемы Virtex-II Pro, обеспечивающий обработку сигналов WiFi IEEE 802.11n. Экспериментальные исследования подтвердили, что с увеличением числа приемных антенн от 1 до 4 пропускная способность ММО канала связи увеличивается в 1,6 раза.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Паршин, Ю.Н. Влияние количества элементов антенн на вероятность ошибки приема сигналов в беспроводных ММО системах при наличии помех / Паршин Ю.Н., Нгуен В.Н.Т. // Теория и техника радиосвязи, Воронеж: 2022, АО «Концерн «Созвездие», №1, с. 78- 84.
2. Паршин, Ю.Н. Влияние пространственной структуры на пропускную способность беспроводных систем ММО при наличии помех / Паршин Ю.Н., Нгуен В.Н.Т. // Цифровая обработка сигналов, № 2, стр. 9-14, 2023.

Публикации в изданиях, индексируемых SCOPUS

3. Parshin Y. and Nguyen T. Adaptive Interference Cancellation in MIMO Information Transmission Systems// 2023 25th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-4. DOI: 10.1109/DSPA57594.2023.10113413.
4. Y. Parshin and T. Nguyen, «Channel Capacity of MIMO Information Transmission Systems with Different Spatial Structures in the Presence of Interference,» 2024 26th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA), Moscow, Russian Federation, 2024, pp. 1-4, DOI: 10.1109/DSPA60853.2024.10510066.

Другие статьи и материалы конференций

5. Паршин, Ю. Н. Эффективность пространственного кодирования в пространстве собственных лучей при наличии помех / Ю. Н. Паршин, В. Н. Т. Нгуен, А. И. Успенский // Актуальные проблемы современной науки и производства : Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции. – Рязань: Индивидуальный предприниматель Коняхин Александр Викторович, 2021. – С. 129-135.
6. Паршин, Ю. Н. Влияние пространственной структуры ММО системы передачи информации на помехоустойчивость непрерывного гауссовского и дискретного двоичного каналов / Ю. Н. Паршин, В. Н. Т. Нгуен // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, посвященной памяти Б.Я. Осипова. В 6-ти томах, Воронеж, Том 5. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2022. – С. 54-62.
7. Паршин, Ю. Н. Вероятность битовой ошибки в ММО системе передачи информации с пространственной компенсацией помех / Ю. Н. Паршин, В. Н. Т. Нгуен // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции, посвященной 70-летию кафедры радиофизики ВГУ. В 5-ти томах, Воро-

неж, Том 4. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2023. – С. 15-20.

8. Паршин, Ю. Н. Вероятность простоя в ММО системах передачи информации с различными пространственными структурами при наличии помех / Ю. Н. Паршин, В. Н. Т. Нгуен // Радиолокация, навигация, связь : Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции: в 5-ти томах, Воронеж, Том 3. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2024. – С. 400-407.

9. Нгуен, В. Н. Т. Повышение эффективности схемы Аламоути в беспроводных ММО системах передачи информации при наличии помех / В. Н. Т. Нгуен // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2022 : Сборник трудов V Международного научно-технического форума. В 10-ти томах, Рязань / Под общей редакцией О.В. Миловзорова. Том 1. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2022. – С. 122-128.

10. Нгуен, В. Н. Т. Вероятность ошибки приема сигналов в беспроводных ММО системах при наличии помех. / Нгуен, В. Н. Т. // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXVI Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Рязанский государственный радиотехнический университет. – 2021. – С. 88–90.

11. Нгуен, В. Н. Т. Экспериментальное исследование пропускной способности ММО канала при наличии помех. / Нгуен, В. Н. Т. // Сборник материалов I Научно-практической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Инновационные технологии в науке и технике» –Рязань: ИП Коняхин А.В., 2023. – С.56–61.

12. Нгуен, В. Н. Т. Сравнение помехоустойчивости гауссовского и дискретного ММО каналов. / Нгуен, В. Н. Т. // VIII научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2021. – С. 46.

13. Нгуен, В. Н. Т. Технические средства реализации алгоритмов обработки сигналов ММО систем при действии помех. / Нгуен, В. Н. Т. // X научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического Университета имени В.Ф. Уткина. – 2024. – С. 51–52.

14. Паршин, Ю. Н. Влияние погрешностей канальной матрицы на пропускную способность ММО систем при наличии помех / Ю. Н. Паршин, В. Н. Т. Нгуен // Актуальные проблемы современной науки и производства : Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф.Уткина, 2023. – С. 112-119.

Нгуен Винь Нгок Тхуан

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МИМО СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ
В УСЛОВИЯХ ПРОСТРАНСТВЕННО КОРРЕЛИРОВАННЫХ ПОМЕХ

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __. __.24. Формат бумаги 60×84 1/16.

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

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет

им. В.Ф. Уткина. 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.