

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Джамил Джалил Садун Джамил

АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПО БЕСПРОВОДНОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
МИМО-ПРИНЦИПА

Специальность 2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства
телевидения

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Таганрог – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет» на кафедре теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления.

Научный
руководитель:

Федосов Валентин Петрович
доктор технических наук, профессор

Официальные
оппоненты:

Лисничук Александр Александрович
доктор технических наук, профессор кафедры радиоправления и связи, ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина» (г. Рязань)

Окорочков Александр Иванович
кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Радиоэлектронные и электротехнические системы и комплексы», Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (г. Шахты)

Защита состоится «15» февраля 2024 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета ЮФУ801.02.07 Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет» по адресу: Ростовская обл., г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, корпус «Г», ауд. Г-117.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ЮФУ по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на сайте ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» по адресу: <https://hub.sfedu.ru/diss/show/1324622/>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ЮФУ801.02.07
кандидат технических наук, доцент



Пилипенко А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Системы беспроводной передачи данных уже стали неотъемлемой частью современного общества. За последние несколько десятилетий беспроводная связь стала одной из самых быстрорастущих и активно развивающихся отраслей. На это повлияло бурное развитие микроэлектроники и появление быстродействующих цифровых процессоров, которые позволяют выполнять сложные алгоритмы обработки сигналов в реальном времени. Основными критериями эффективности беспроводных систем является скорость передаваемой информации. Однако недостаточно только обеспечить высокую пропускную способность необходимо также позаботиться о качестве передаваемой информации. Например, искажение сигнала при передаче аудио/видео, а также изображений может существенно сказаться на восприятии информации.

В настоящее время существует множество технологий беспроводной связи, которые нашли массовое применение. Например, мобильная связь, беспроводные технологии для локальных сетей на основе стандарта 802.11, среди которых одним из перспективных, с точки зрения пропускной способности является стандарт на основе технологии MIMO 802.11n. В то время как технология Wi-Fi используется для построения сетей с небольшой дальностью действия, существует технология WiMax, которая используется для построения беспроводных сетей на больших расстояниях.

Основной проблемой для беспроводных сетей, в отличие от проводных, является сложный характер распространения сигналов в среде, которых сильно зависит от конкретной местности. Различные промышленные помехи в совокупности с многопутным распространением сигнала, движением мобильной станции относительно базовой усложняют функционирование беспроводной аппаратуры и сильно влияют на пропускную способность канала. Рассмотрим для примера беспроводную технологию WiMax, которая рассчитана на передачу информации на большие расстояния и обеспечивает большую площадь покрытия. В качестве примера будем рассматривать передачу изображений по каналу связи. В системах WiMax для модуляции сигналов используется технология OFDM, которая показала свою эффективность передачи информации в условиях среды с замираниями сигналов, за счет разбиения полосы частот сигнала, на множество поднесущих с медленно меняющимися параметрами. Также WiMax использует технологию пространственного кодирования MIMO для повышения помехоустойчивости и пропускной способности канала.

В исследование проблем систем беспроводной связи WiMAX внесли свой вклад следующие ученые: В. С. Сюваткин, В. И. Есипенко, В. В. Крылов, В. В. Вишнеvский, Л. Нуайми, К. Фазель, С. Кайзер.

По всему миру существует множество компаний, которые занимаются разработкой телекоммуникационного оборудования. Например, на территории России к таким компаниям можно отнести: АО «Научно-производственное предприятие «Радиосвязь», Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева (ФГБУ НИИ Радио), АО «Росэлектроника» и

другие. Среди зарубежных компаний можно выделить крупнейших поставщиков телекоммуникационного оборудования, таких как: Nokia, Ericsson и Huawei.

Передача изображений по беспроводному каналу связи является актуальным вопросом, что отражено в ряде публикаций. Например, в многочисленных статьях авторы рассматривают передачу изображений в беспроводном канале SISO с применением технологии OFDM. В других статьях рассматривается передача изображений в системах MIMO-OFDM, включая системы связи 5G. Основным недостатком представленных работ является то, что авторы, в основном, используют в качестве среды передачи канал с аддитивным гауссовским шумом, который сильно отличается от реального канала связи особенно в условиях плотной городской застройки. Кроме того, авторы не применяют алгоритмы пространственной фильтрации сигналов для борьбы с переотражениями, которые попадают в приемную антенную систему с различной задержкой, амплитудными и фазовыми искажениями, а также угловыми координатами в условиях априорной неопределенности. Адаптивный подход пространственной фильтрации существенно может снизить искажения сигналов при многопутном распространении путем формирования характеристики направленности антенн согласно разработанному алгоритму. Такой подход позволяет выделить только один путь, по которому приходит полезный сигнал, тем самым существенно снижает интерференцию и искажение сигналов в приемнике.

Цель работы. Повышение пропускной способности, снижение вероятности битовой ошибки, а также среднеквадратического значения ошибки яркости и цветности при передаче изображений в канале радиосвязи с многочисленными переотражениями путем разработки адаптивного алгоритма с пространственной обработкой сигналов.

Для достижения этой цели в диссертации были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Разработка адаптивного алгоритма формирования характеристики направленности приемной антенны, для пространственной фильтрации сигналов в воздушной среде с переотражениями.

2. Разработка модели системы связи на основе MIMO-OFDM с применением адаптивного алгоритма.

3. Модернизация многопутной 3D-модели воздушной среды распространения сигналов системы WiMAX для исследования адаптивного алгоритма обработки изображений.

4. Моделирование предложенной модели и разработанных адаптивных алгоритмов в составе системы.

5. Оценка эффективности предложенного адаптивного алгоритма путем моделирования передачи различных сигналов и изображений.

Методы исследования: теория матричного анализа и линейной алгебры, теория пространственно-временной обработки сигналов на выходах антенной решетки и компьютерное моделирование.

Научная новизна работы.

1. Для систем связи на основе антенной решетки модернизирован адаптивный алгоритм формирования пространственных характеристик направленности на основе взвешенной обработки сигнала изображений с выхода антенной решетки. Данный алгоритм позволяет снизить вероятность битовой ошибки и как следствие повышает спектральную эффективность использования выделенной полосы сигнала.

2. Модифицирована трехмерная модель канала WiMAX для воздушной среды распространения сигналов, которая позволяет учитывать геометрическую конфигурацию антенной системы, возможность перемещения приемника, а также различные объекты, от которых может отражаться сигналы изображений.

3. Предложено использовать пространственные методы обработки сигналов на основе антенных решеток и мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов, что в совокупности с предложенным алгоритмом адаптации позволяет беспроводным системам связи повысить устойчивость к среде с множественными переотражениями сигналов.

Практическая значимость. Практическая значимость адаптивного алгоритма в канале WiMAX для системы SISO заключается в снижении вероятности битовой ошибки на 2 порядка при $\text{SNR} = 0$ дБ и на 3 порядка при $\text{SNR} = 2$ дБ. Для системы 2×2 MIMO вероятность ошибки снижается в 40 раз при $\text{SNR} = 5$ дБ. При отсутствии прямого пути при том же отношении сигнал/шум вероятность ошибки снижается в 16,6 раза при $\text{SNR} = 5$ дБ. В работе также продемонстрирована передача различных типов изображений по каналу связи. Передача чёрно-белого изображения с применением алгоритма адаптации позволила добиться интегрального снижения нормированного значения среднеквадратичной ошибки передачи изображения до значения, близкого к 0, при $\text{SNR} = 10$ дБ для SISO системы и до $3,5 \cdot 10^{-3}$ при $\text{SNR} = 10$ дБ для системы MIMO. При передаче цветных изображений по беспроводному каналу с использованием адаптивного алгоритма были достигнуты результаты среднеквадратичной ошибки, близкого к 0, при $\text{SNR} = 10$ дБ для системы SISO и до 10^{-5} при $\text{SNR} = 10$ дБ в системах MIMO.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Снижение вероятности битовых ошибок и увеличение пропускной способности за счет алгоритма адаптивной обработки сигналов, разработанного для систем беспроводной связи на основе использования антенных решеток.

2. Модифицированный беспроводной канал для систем WiMax, который позволяет учитывать распространение сигналов в трехмерном пространстве, отражения от множества различных объектов, а также параметры приемной и передающей антенны.

3. Результаты эффективности разработанного адаптивного алгоритма, который позволил повысить помехоустойчивость систем SISO-OFDM и MIMO-OFDM.

4. Высокая эффективность разработанного адаптивного алгоритма подтверждена результатами исследования помехоустойчивости беспроводного канала связи при передаче изображения.

5. Результаты моделирования передачи различных типов цветных изображений по беспроводному каналу с использованием разработанного адаптивного алгоритма, которые подтвердили его эффективность.

Внедрение результатов. Результаты диссертационного исследования использованы в научных работах кафедры теоретических основ радиотехники Института радиотехнических систем и управления ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет» при выполнении гранта Российского научного фонда № 22-29-01389 от 21 декабря 2021 года, а также в учебном процессе при обучении магистрантов по направлению 11.04.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи в дисциплинах «Современные алгоритмы обработки пространственно-временных сигналов в сетях связи», «Модуль проектной деятельности».

Апробация результатов. Результаты, представленные в диссертации, обсуждались и получили одобрение на следующих конференциях:

1. Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: сборник докладов I Международной научно-практической конференции. В 2 томах. Том 1 (Томск, 27–29 апреля 2021 г.) / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2021. – 423 с.

2. Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: сборник докладов II Международной научно-практической конференции (Томск, 26–28 апреля 2022 г.) / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2022. – 880 с.

3. International scientific conference "Radiation and scattering of electromagnetic waves" RSEMW-2021, June 28 - July 2, 2021, Divnomorskoe, Russia.

4. 3rd International Scientific Conference of Engineering Sciences and Advances Technologies (IICESAT), College of Material Engineering, University of Babylon, Iraq, Journal of Physics: Conference Series, Volume 1973, 4-5 June 2021.

5. «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении», КомТех-2022, Научно-технический и прикладной журнал «Известия ЮФУ. Технические науки», "Izvestiya Sfedu. Engineering sciences", г. Таганрог, 2022 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 статей, из них 2 статьи в журналах из списка ВАК, 5 индексированы в SCOPUS и/или Web of Science, 3 индексированы в РИНЦ и 1 – прочие публикации.

Личный вклад. Все основные результаты диссертационной работы были получены автором лично. Совместно с научным руководителем Федосовым В. П., обсуждались и корректировались подходы к разработке, методы решения и результаты работы.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа имеет следующую структуру: введение, четыре раздела, заключения, списка литературы и приложений. Объем диссертации составляет 143 страницы, диссертация содержит 47 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, обозначены цели исследования и задачи, которые необходимо решить для достижения цели. Представлена практическая значимость полученных результатов, положения, выносимые на защиту и внедрение полученных результатов.

В первом разделе подробно рассмотрена система беспроводной связи WiMAX, описаны ее преимущества, назначение и характеристики, а также представлены направления исследований и развития систем беспроводной связи. Рассматриваются условия распространения сигналов, описано преимущество использования многочастотных видов модуляции, как один из способов борьбы с замираниями в многопутном канале, за счет разделения частотно-избирательного канала на множество параллельных подканалов с неглубокими замираниями. В качестве многочастотного вида модуляции рассмотрена технология ортогонального частотного мультиплексирования (OFDM). Описана структура OFDM-сигнала в частотной и во временной области. Для целей повышения спектральной эффективности представлена структура системы связи с пространственным кодированием, которая позволяет использовать несколько пространственных потоков для параллельной передачи данных. Описаны методы демодуляции пространственных сигналов и расчет пропускной способности систем использующих такие сигналы. Также представлены основные принципы адаптивной обработки сигналов для повышений помехоустойчивости и оценки характеристики канала для демодуляции сигналов. В результате анализа известных работ по теме диссертации сформированы цель диссертации и задачи для её достижения.

Во втором разделе описаны модели канала, структура сигналов и помех, которые используются в работе. Представлены наиболее значимые характеристики беспроводного канала, такие как потери при распространении сигналов, затенение передатчика и приемника, отражение, дифракция и рассеяние сигналов, замирания сигналов и т.д. На основе этого была составлена трехмерная модель беспроводной воздушной среды, в которой распространяются сигналы от приемника к передатчику. В рассматриваемой модели учитывалось отражение от различных объектов в пространстве. На рисунках 1 и 2 показана геометрическая модель канала в двух плоскостях. Кроме того, рассматриваемая модель учитывает эффект Доплера при движении мобильной станции с постоянной скоростью.

Для рассматриваемого 3D канала WiMAX импульсная характеристика будет иметь вид

$$h(t, \tau) = h^{LOS}(t, \tau) + h^{RB}(t, \tau) + h^{RG}(t, \tau) \quad (1)$$

где $h^{LOS}(t, \tau)$ – компонент, описывающий прямой путь; $h^{RB}(t, \tau)$ – компонент, описывающий отражение от здания; $h^{RG}(t, \tau)$ – компонент, описывающий отражение от поверхности земли с учётом переотражений, τ – задержка распространения сигнала для n -го пути.

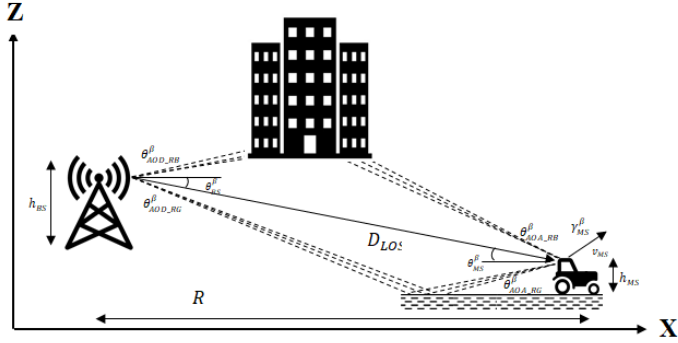


Рисунок 1 – Модель канала в плоскости x-z

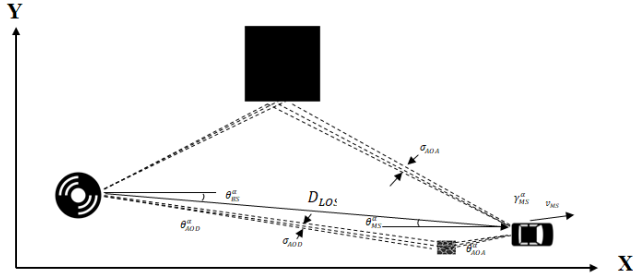


Рисунок 2 – Модель канала в плоскости x-y

Прямой путь

$$\begin{aligned}
 h_{su}^{LOS}(t, \tau) &= \\
 &= \sqrt{\frac{K}{K+1}} \sqrt{G_{BS}(\theta_{BS}^{\alpha}, \theta_{BS}^{\beta})} \sqrt{G_{MS}(\theta_{MS}^{\alpha}, \theta_{MS}^{\beta})} L_S(D_{LOS}) L_A(D_{LOS}) \cdot \\
 &\quad \delta(\tau - \tau_{LOS}) \exp(jkd_{BS}^1 \sin(\theta_{BS}^{\alpha})) \exp(jkd_{BS}^2 \sin(\theta_{BS}^{\beta})) \times \\
 &\quad \exp(jkd_{MS}^1 \sin(\theta_{MS}^{\alpha})) \exp(jkd_{MS}^2 \sin(\theta_{MS}^{\beta})) \times \\
 &\quad \exp(jK[v_{BS} \cos(\theta_{BS}^{\alpha} - \gamma_{BS}^{\alpha}) \cos(\theta_{BS}^{\beta} - \gamma_{BS}^{\beta}) + \\
 &\quad v_{MS} \cos(\theta_{MS}^{\alpha} - \gamma_{MS}^{\alpha}) \cos(\theta_{MS}^{\beta} - \gamma_{MS}^{\beta})]t),
 \end{aligned} \tag{2}$$

Отражения от зданий

$$\begin{aligned}
 h_{sun}^{RB}(t, \tau) &= \sqrt{\frac{1}{K+1}} L_S(D_n) \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \sqrt{\frac{G_{BS}(\theta_{AODRB\ n\ m}^{\alpha}, \theta_{AODRB\ n\ m}^{\beta})}{G_{MS}(\theta_{AOARB\ n\ m}^{\alpha}, \theta_{AOARB\ n\ m}^{\beta})}} \times \\
 &\quad \xi_{nm} \varphi_{nm} \exp(jkd_{BS}^1 \sin(\theta_{AODRB\ n\ m}^{\alpha})) \exp(jkd_{BS}^2 \sin(\theta_{AODRB\ n\ m}^{\beta})) \times \\
 &\quad \exp(jkd_{MS}^1 \sin(\theta_{AOARB\ n\ m}^{\alpha})) \exp(jkd_{MS}^2 \sin(\theta_{AOARB\ n\ m}^{\beta})) \times \\
 &\quad \exp(jK[v_{BS} \cos(\theta_{AODRB\ n\ m}^{\alpha} - \gamma_{BS}^{\alpha}) \cos(\theta_{AODRB\ n\ m}^{\beta} - \gamma_{BS}^{\beta}) + \\
 &\quad v_{MS} \cos(\theta_{AOARB\ n\ m}^{\alpha} - \gamma_{MS}^{\alpha}) \cos(\theta_{AOARB\ n\ m}^{\beta} - \gamma_{MS}^{\beta})]t).
 \end{aligned} \tag{3}$$

Отражения от поверхности земли

$$h_{su n}^{RG}(t, \tau) = \sqrt{\frac{1}{K+1}}, L_s(D_n), \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \sqrt{\frac{G_{BS}(\theta_{AOD_{RG} n m}^{\alpha} \theta_{AOD_{RG} n m}^{\beta})}{G_{MS}(\theta_{AOA_{RG} n m}^{\alpha} \theta_{AOA_{RG} n m}^{\beta})}} \times \\ \xi_{n m} \varnothing_{n m} \exp(jkd_{BS}^1 \sin(\theta_{AOD_{RG} n m}^{\alpha})) \exp(jkd_{BS}^2 \sin(\theta_{AOD_{RG} n m}^{\beta})) \times \\ \exp(jkd_{MS}^1 \sin(\theta_{AOA_{RG} n m}^{\alpha})) \exp(jkd_{MS}^2 \sin(\theta_{AOA_{RG} n m}^{\beta})) \times \\ \exp(jK[v_{BS} \cos(\theta_{AOD_{RG} n m}^{\alpha} - \gamma_{BS}^{\alpha}) \cos(\theta_{AOD_{RG} n m}^{\beta} - \gamma_{BS}^{\beta}) + \\ v_{MS} \cos(\theta_{AOA_{RG} n m}^{\alpha} - \gamma_{MS}^{\alpha}) \cos(\theta_{AOA_{RG} n m}^{\beta} - \gamma_{MS}^{\beta})]t). \quad (4)$$

В работе применяется технология многочастотной манипуляции сигналов OFDM совместно с пространственно-временной обработкой сигналов. Такой подход позволяет не только повысить пропускную способность системы связи, но и эффективно бороться с замираниями в беспроводном канале с переотражениями, а наличие сигналов в пилот-поднесущих OFDM-сигнала позволяет осуществлять оценку канала, необходимую для демодуляции пространственных сигналов. В данном разделе также описаны особенности демодуляции OFDM-сигналов в системах MIMO.

В третьем разделе представлена структурная схема беспроводной системы связи, рисунок 3, на котором представлены основные узлы, такие как – блок преобразования и кодирования исходной битовой информации, блок модуляции и распределения информации по количеству пространственных потоков, модулятор OFDM, квадратурный преобразователь сигналов в аналоговую форму, математический блок беспроводной среды, аналого-цифровой преобразователь с квадратурным демодулятором и блоком адаптации, демодулятор OFDM, блок преобразования пространственных параллельных битовых потоков в один по критерию минимума среднеквадратической ошибки воспроизведения изображений, блока демодуляции и декодирования принятого битового потока. На основе данной структурной схемы разработана общая программа моделирования системы связи с применением адаптивного алгоритма.

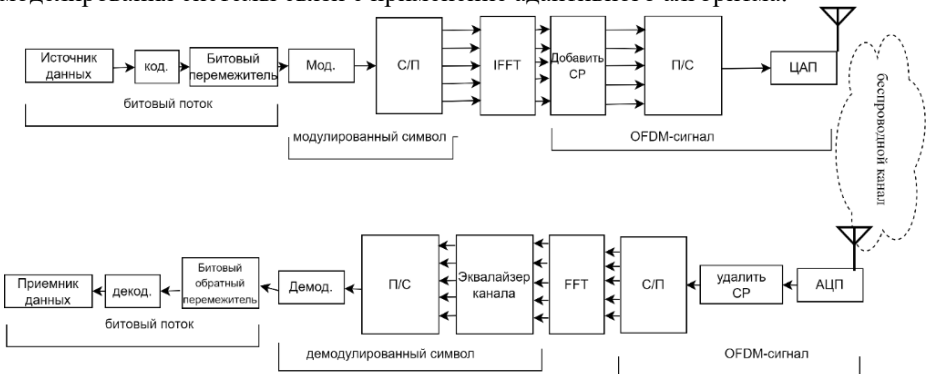


Рисунок 3 – Обобщенная структурная схема системы беспроводной связи

Основной проблемой в беспроводной среде при плотной застройке местности является борьба с множеством отраженных сигналов, которые приводят к искажениям сигнала в приемнике. Задачей адаптивного алгоритма является формирование пространственной характеристики направленности антенны путем весовой обработки сигналов с выходов антенны. В качестве критерия адаптации выбран критерий максимизации средней мощности на выходе приемника. Такой подход позволяет из всех отраженных сигналов и прямого пути (при его наличии) выделить путь прихода сигнала, который имеет максимальную мощность, и отфильтровать сигналы остальных путей. Сигнал на выходе адаптивного блока имеет вид

$$\mathbf{Y}(t) = \sum_{i=1}^N w_i x_i(t) = \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t) \quad (5)$$

где x_i – входной сигнал; N – количество элементов АР в блоке адаптации; w_i – весовой вектор.

Входной сигнал представлен в виде суммы полезного сигнала и шума

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{S}(t) + \mathbf{N}(t) \quad (6)$$

Поскольку задержка распространения сигнала в отдельных путях больше, чем интервал корреляции, то сигналы от различных источников не коррелированы. В результате задача заключается в определении весового вектора, который максимизирует отношение сигнал/(помеха+шум)

$$q = \frac{P_s}{P_{in}} = 0,5 \frac{|\mathbf{W}^H \mathbf{S}|^2}{\mathbf{W}^H \mathbf{R} \mathbf{W}} = 0,5 \frac{\mathbf{W}^H \mathbf{S} \mathbf{S}^H \mathbf{W}}{\mathbf{W}^H \mathbf{R}^{1/2} \mathbf{R}^{1/2} \mathbf{W}} \quad (7)$$

Максимум отношения сигнал/шум (6) дает собственный вектор матрицы, который соответствует ее максимальному собственному числу. Корреляционную матрицу можно найти следующим образом

$$\mathbf{R}_{xx}(i, j) = E\{\mathbf{X}(i) \cdot \mathbf{X}^H(j)\} = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{L-1} \mathbf{X}(i) \cdot \mathbf{X}^H(j) \quad (8)$$

где L – количество отсчетов входного сигнала; $(\)^H$ – операция транспонирования; $\mathbf{X}$ – входной сигнал;

Эрмитова матрица обеспечивает разложение на собственные числа и собственные вектора $\mathbf{R}_{xx} = \mathbf{V} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^H$. Диагональные элементы матрицы собственных значений соответствуют мощности сигналов путей, а собственные вектора данной матрицы являются весовыми коэффициентами для адаптации в приемной антенной решетке. На основе приведенного сигнала после адаптивной обработки можно представить как $\mathbf{Y}_w = \mathbf{H}_w \mathbf{X} + \mathbf{N}$, где $\mathbf{H}_w$ – матрица канала после применения весового вектора.

Блок адаптивной обработки сигналов показан на рисунке 4.

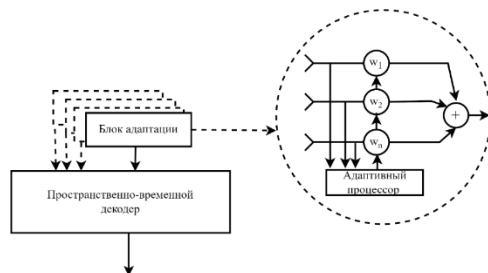


Рисунок 4 – Структурная схема блока адаптивной обработки

В четвертом разделе выполнено моделирование беспроводной системы связи WiMAX в среде с переотражениями. Выбраны и обоснованы параметры модулируемой среды, а также параметры сигналов и характеристики направленности антенн. Для сравнительного анализа эффективности алгоритма представлены графики вероятности битовой ошибки при различных конфигурациях беспроводной системы. Построены графики эффективности системы с применением различных видов модуляции, канального кодирования и алгоритма адаптивной обработки сигналов. На рисунках 5 и 6 показано, как зависит вероятность ошибки для систем связи при различных видах цифровой манипуляции поднесущих OFDM-сигнала для систем SISO и MIMO.

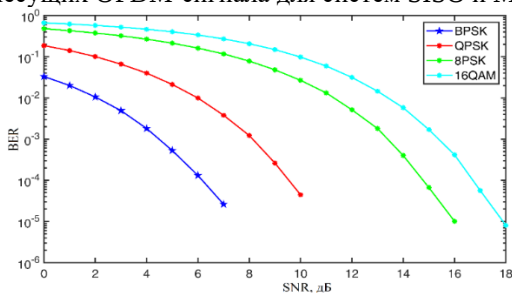


Рисунок 5. Зависимость вероятности битовой ошибки при различных видах цифровой манипуляции для системы SISO

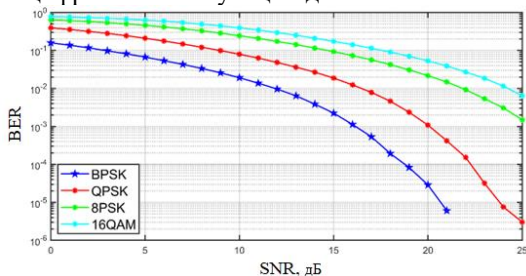


Рисунок 6 – Зависимость вероятности битовой ошибки при различных видах цифровой манипуляции для системы 2×2 MIMO

Так как пропускная способность увеличивается с ростом количества пространственных потоков, то рассмотрено, как изменяется эта способность при

различном количестве приемных и передающих антенн для системы MIMO на рисунке 7. Адаптивная обработка сигналов показала существенное снижение вероятности битовой ошибки и в системе SISO-OFDM (рисунок 8). В процессе адаптации в качестве оптимального пути был выбран прямой путь, который имеет наибольшую мощность. Это наглядно демонстрирует диаграмма направленности (ДН) приемной антенны с учетом весовой обработки (рисунок 9).

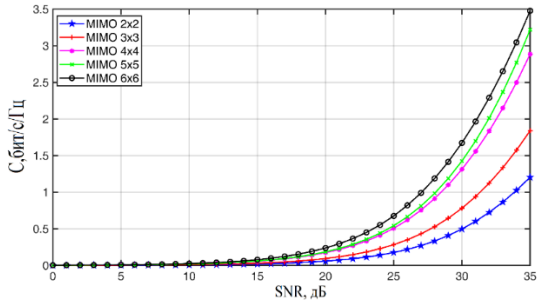


Рисунок 7 – Зависимость пропускной способности канала от количества MIMO-антенн без адаптации

В системах MIMO блок адаптации работает аналогично для каждой приёмной антенной решётки. Как и для систем SISO-OFDM пространственная фильтрация снижает вероятность битовой ошибки в системе MIMO-OFDM, что отражено на рисунке 10. Повышение помехоустойчивости позволяет использовать многопозиционные виды манипуляции на поднесущих OFDM-сигнала, что увеличивают скорость передачи данных по каналу связи при неизменной полосе частот. Если прямой путь отсутствует в результате затенения базовой станции, тогда многопутное распространение играет важную роль, т. к. позволяет обеспечить передачу данных между передатчиком и приемником в условиях отсутствия прямой видимости, при этом вероятность ошибки будет изменяться, как показано на рисунке 11.

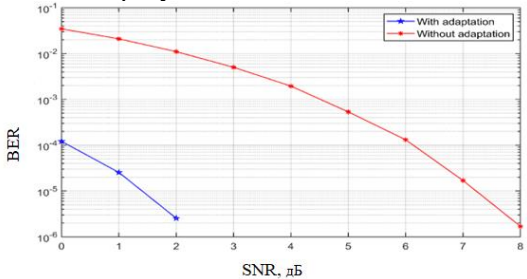


Рисунок 8 – Зависимость вероятности битовой ошибки для системы SISO с применением адаптивного алгоритма и без него

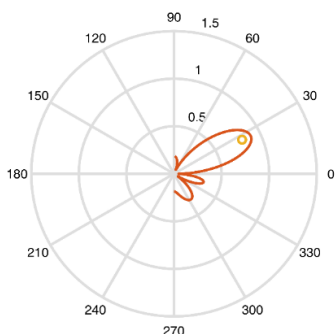


Рисунок 9 – Эквивалентная диаграмма направленности приемной антенны на выходе блока адаптации.

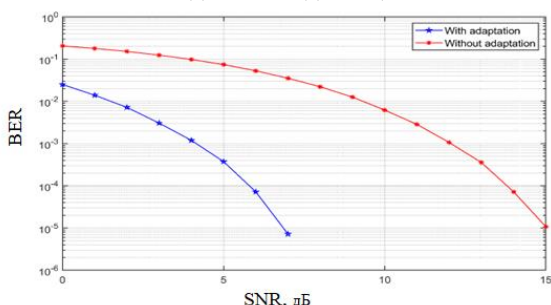


Рисунок 10 – Зависимость вероятность битовой ошибки для системы ММО с применением адаптивного алгоритма и без него

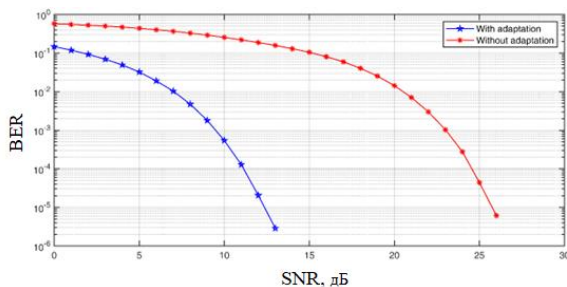


Рисунок 11 – Зависимость вероятность битовой ошибки для системы ММО с применением адаптивного алгоритма и без него в отсутствии прямого пути

Применение адаптивного алгоритма положительно сказывается на пропускной способности канала связи, что можно увидеть если сравнить пропускную способность без адаптации рисунок 7 и пропускную способность с алгоритмом адаптации рисунок 12.

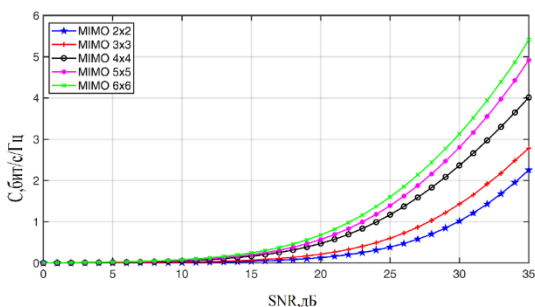


Рисунок 12 – Зависимость пропускной способности канала с применением алгоритма адаптации

Примером передаваемой информации могут служить изображения. Рассмотрена передача черно-белого изображения с применением алгоритма адаптации для систем SISO-OFDM и MIMO-OFDM. Изображение на выходе приемника для системы SISO-OFDM показано на рисунке 13.



Рисунок 13 – Изображение на выходе приемника в системе SISO-OFDM без адаптации (слева), с адаптацией (справа)

Из анализа рисунка 13 следует, что для приемника с адаптацией приём изображения выполняется практически без ошибки. Проведен аналогичный эксперимент для системы MIMO-OFDM 2×2 (рисунок 14). В результате можно с уверенностью утверждать, что адаптивная пространственная обработка позволяет повысить качество передаваемой информации.



Рисунок 14 – Изображение на выходе приемника в системе MIMO-OFDM без адаптации (слева), с адаптацией (справа)

Рассмотрены также примеры передачи цветных МРТ-изображений с применением алгоритма адаптации для систем SISO-OFDM и MIMO-OFDM рисунок 15 и 16.

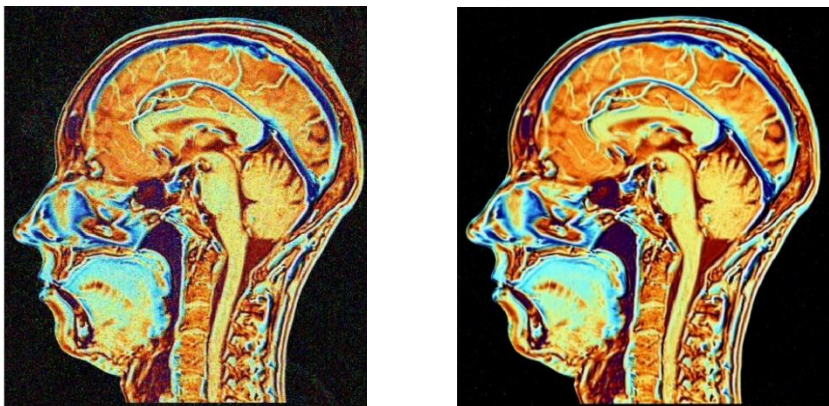


Рисунок 15 – Изображение на выходе приемника в системе SISO-OFDM без адаптации (слева), с адаптацией (справа)

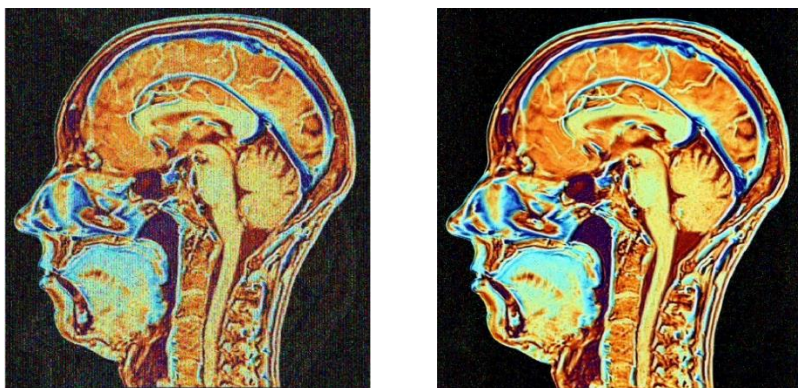


Рисунок 16 – Изображение на выходе приемника в системе MIMO-OFDM без адаптации (слева), с адаптацией (справа)

Для количественной оценки искажений изображений в системе связи построены графики зависимости среднеквадратической ошибки (MSE) от отношения сигнал/шум согласно формуле

$$MSE = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^N (x_{j k} - \hat{x}_{j k})^2 \quad (9)$$

где M и N – размеры в пикселях; x – исходное изображение; $\hat{x}$ – полученное изображение.

Для принятого черного-белого изображения в системах SISO и MIMO зависимости MSE от отношения сигнал/шум (SNR) представлены на рисунках 17 и 18.

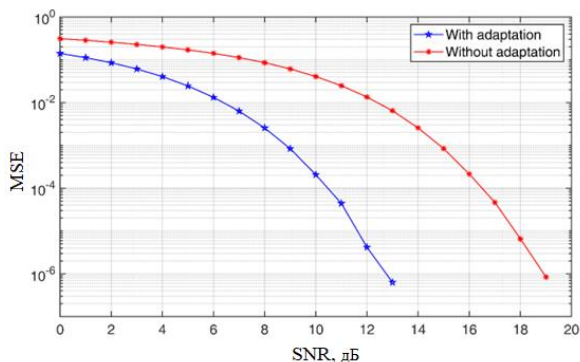


Рисунок 17 – MSE принятого изображения в системе SISO с применением адаптивного алгоритма и модуляцией 16-QAM

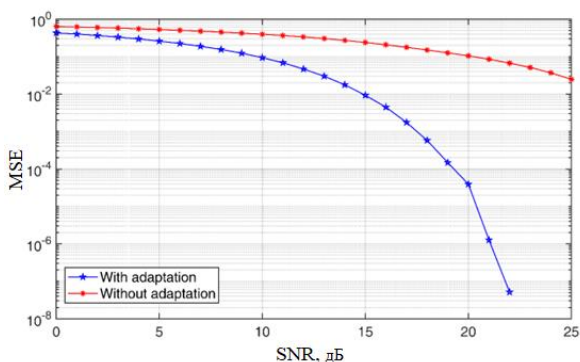


Рисунок 18 – MSE принятого изображения в системе MIMO с применением адаптивного алгоритма и модуляцией 16-QAM

В заключении представлены полученные в диссертационной работе результаты. 1. Представлена модель трехмерного канала WiMAX для моделирования систем беспроводной связи. 2. Показана структура сигналов OFDM, используемых в работе. 3. Описаны способы повышения пропускной способности системы связи и снижения MSE изображений на основе использования пространственно-временной обработки сигналов. 4. Разработан адаптивный алгоритм пространственной обработки сигналов. 5. Приведены результаты моделирования с применением адаптивного алгоритма пространственно-временной обработки сигналов. 6. Представлены численные значения основных результатов, полученных в диссертационной работе. 7. Приведены результаты моделирования передачи черно-белых и цветных изображений по беспроводному каналу связи.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ:

1. *Федосов В.П.* Сравнение производительностей адаптивного алгоритма и метода минимума среднеквадратического отклонения для передачи изображений на основе систем связи с использованием антенных решеток [Текст] / В.П. Федосов, Д.С.Д. Джамил, С.В. Кучерявенко // Радиотехника. – 2023. – №2. – С. 123–135.
2. *Федосов В.П.* Передача данных в канале 3D WIMAX на основе SISO-OFDM и MIMO-OFDM [Текст] / В.П. Федосов, Д.С.Д. Джамил, С.В. Кучерявенко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2020. – №6. – С. 6–18.

В международных научных изданиях, индексируемых в Scopus:

3. *Jameel J.S.* Lossy Compression of Medical Images Using Multiwavelet Transforms [Текст] / J.S. Jameel, M.H. Ali, M. Abomaaly, H.K. Shamkhi, N. Yahya // Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC). – 2017. – № 9. – P. 7–11.
4. *Fedosov V.P.* Analysis of an Adaptive Algorithm for Processing Space-Time Signals for Image Transmission Based on 3D Wireless Channel Model [Текст] / V.P. Fedosov, J.S. Jameel, S.V. Kucheryavenko // 2021 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), IEEE. – 2021. – P. 443–446.
5. *Fedosov V.P.* Transmitting Image in 3D Wireless Channel using Adaptive Algorithm Processing with MMSE based on MIMO principles [Текст] / V.P. Fedosov, J.S. Jameel, S.V. Kucheryavenko // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. – 2021. – Vol. 1973, № 1. – P. 012131.
6. *Fedosov V.P.* Theoretical Analysis of Adaptive Algorithm Modulation Scheme in 3D OFDM WiMAX System [Текст] / V.P. Fedosov, J.S. Jameel, S.V. Kucheryavenko // Trends in Sciences. – 2022. – Vol. 19, № 12. – P. 4605–4605.
7. *Fedosov V.P.* Medical image transmission in 3D WiMAX channel using adaptive algorithm based on MIMO-OFDM principles [Текст] / V.P. Fedosov, J.S. Jameel, S.V. Kucheryavenko // Conference Proceedings. 2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves, RSEMW. – 2023. – P. 236–239.

В научных изданиях, индексируемых в РИНЦ:

8. *Федосов В.П.* Адаптивный алгоритм передачи изображений и данных в системе беспроводной связи с использованием кода Хэмминга на основе принципов MIMO [Текст] / В.П. Федосов, Д.С.Д. Джамил, С.В. Кучерявенко // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении. – Таганрог: КомТех, 2022. – С. 271–287.
9. *Джамил Д.С.* Передача информации на основе канала MIMO-OFDM 3D WIMAX с использованием адаптивного алгоритма [Текст] / Д.С.Д. Джамил // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: сборник научных трудов конференции. – Томск: Национальный исследовательский томский политехнический университет, 2021. – Т. 1 – С. 107–112.
10. *Джамил Д.С.* Анализ и сравнение адаптивных алгоритмов передачи изображений по каналу 3D WIMAX MIMO на основе MMSE [Текст] / Д.С.Д. Джамил // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: сборник научных трудов конференции. – Томск: Национальный

исследовательский томский политехнический университет, 2022. – Т. 1 – С. 439-444.

Прочие публикации:

11. *Jameel J.S.* Medical Image Denoising Using Mixed Transforms [Текст] / J.S. Jameel // Journal of University of Babylon for Engineering Sciences. – 2018. – Vol. 26, № 4. – P. 272-281.

Джамил Джалил Садун Джамил
АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ПЕРЕДАЧИ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПО БЕСПРОВОДНОЙ ЛИНИИ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ
МІМО-ПРИНЦИПА
Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук

Подписано в печать 27.11.2023 г.
Бумага офсетная. Формат 60х84 1/16. Тираж 100 экз.
Усл. печ. лист. 1,0. Уч. изд. л. 1,0. Заказ № 9254

Отпечатано в отделе полиграфической, корпоративной и сувенирной продукции
Издательско-полиграфического комплекса КИБИ МЕДИА ЦЕНТРА ЮФУ.
344090, г. Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 200/1, тел (863) 243-41-66.