

На правах рукописи



**НГУЕН Ван Хань**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ  
СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТРЕХМЕРНОЙ  
МОДЕЛИ РАССЕИВАТЕЛЕЙ**

Специальность:

2.2.13. Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения

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

Рязань 2026

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

**Научный руководитель:**

**Паршин Александр Юрьевич,**

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиотехнических устройств ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», г. Рязань.

**Официальные оппоненты:**

**Парфенов Владимир Иванович,**

доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры радиопизики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж;

**Гаврилов Константин Юрьевич,**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), г. Москва.

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет», г. Ростов-на-Дону.

Защита состоится «18» сентября 2026 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» или на сайте <http://www.rsgeu.ru>.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



Г. В. Овечкин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время наблюдается стремительное развитие беспроводных радиосистем передачи информации, сопровождающееся ростом объемов передаваемых данных и повышением требований к пропускной способности и надежности передачи. Усложнение условий функционирования современных радиосистем требует обеспечения устойчивой передачи информации даже в сложных условиях распространения радиосигналов.

Одним из ключевых направлений повышения эффективности беспроводных систем является применение технологий с множественным входом и выходом (MIMO), которые позволяют использовать пространственные ресурсы канала для увеличения пропускной способности и повышения надежности передачи. Сочетание технологий MIMO с методами пространственно-временной обработки сигналов обеспечивает выигрыш за счет пространственного разнесения и позволяет эффективно компенсировать влияние замираний.

Большинство методов пространственно-временной обработки требуют знания информации о состоянии канала передачи, оценка которого выполняется с помощью пилотных сигналов. Однако пилотные сигналы занимают часть ресурсов системы, а результаты их обработки содержат ошибки оценки. Кроме того, в реальных условиях канал подвержен влиянию множества факторов, искажающих фазовые и амплитудные характеристики сигнала, что усложняет процесс оценки канала и может существенно снижать производительность системы.

Особую сложность представляют моделирование и анализ каналов в трехмерном пространстве, где необходимо учитывать не только азимутальные, но и угломестные компоненты распространения сигнала. Традиционные двумерные модели оказываются недостаточными для адекватного описания реальных сценариев, особенно при наличии множества эффективных рассеивателей, расположенных вблизи радиотехнических средств. В связи с этим возникает необходимость разработки и исследования трехмерных геометрических моделей расположения рассеивателей, а также оценки влияния их пространственного распределения на характеристики канальной матрицы и эффективность алгоритмов пространственно-временной обработки сигналов.

Для современных беспроводных систем характерно существенное разнообразие условий распространения радиосигналов: возможные режимы прямой видимости и многолучевого рассеяния, различная степень пространственной концентрации рассеивателей, а также наличие или отсутствие достоверной информации о состоянии канала. В этих условиях эффективность алгоритмов пространственно-временного кодирования и декодирования оказывается различной. Пространственно-временное блочное кодирование Аламоути целесообразно применять при наличии достаточно точной оценки канала, когда требуется обеспечить высокую помехоустойчивость и надежность передачи. Относительное пространственно-временное кодирование представляет особый

интерес для быстроизменяющихся каналов и сценариев, в которых оценка матрицы канала затруднена либо сопровождается значительными погрешностями. Следовательно, актуальной является не только задача разработки трехмерной модели расположения рассеивателей в ММО-канале, но и задача установления областей применимости алгоритмов кодирования Аламоути и относительного кодирования в зависимости от условий распространения радиосигнала и качества оценки канала.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросы анализа и разработки методов повышения эффективности радиосистем передачи информации активно исследовались в трудах русских и зарубежных ученых. В области многоантенных технологий, пространственного кодирования и декодирования внесли большой вклад такие ученые, как И. Я. Кремер, С. Е. Фалькович, А. Г. Флакман, Ю. Н. Паршин, В. В. Чапурский, Д. Д. Кловский, В. Г. Карташевский, В. Т. Ермолаев, М. Г. Бакулин, В. Б. Крейнделин, А. П. Шумов, В.И. Парфенов, А. А. Коростелев, М. А. Быховский, В. П. Федосов, И. В. Рябов, С. Б. Саломатин и другие. Из зарубежных ученых значительный вклад внесли S. Alamouti, A. V. Gershman, M. A. Pätzold, V. Kuhn, B. Vucetic, L. Hanzo, E. Larsson, B. M. Hochwald, V. Tarokh, T. X. Nam и другие.

**Целью исследования** являются разработка трехмерной геометрической модели расположения рассеивателей в ММО-канале передачи информации и оценка эффективности известных алгоритмов пространственно-временного кодирования и декодирования сигналов.

**Объектом исследования** являются многоканальные системы передачи информации, располагающиеся в области наличия рассеивателей, формирующих многолучевое распространение сигнала.

**Предметом исследования** являются модели расположения рассеивателей в канале передачи информации с многоканальными системами передачи, а также алгоритмы приема и обработки сигналов в системах ММО с пространственно-временным кодированием и декодированием.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Исследование существующих моделей ММО-канала передачи информации при наличии рассеивателей.
2. Разработка, обоснование и математическое описание трехмерной геометрической модели расположения рассеивателей при однократном и двукратном отражении сигнала.
3. Исследование эффективности алгоритмов пространственно-временного кодирования и декодирования при использовании трехмерной геометрической модели расположения рассеивателей.
4. Оценка энергоэффективности ММО-систем при использовании пространственно-временных алгоритмов кодирования и декодирования.

5. Экспериментальная оценка характеристик ММО-канала при использовании пространственно-временных алгоритмов кодирования и декодирования.

**Научная новизна** полученных в диссертации результатов заключается в следующем:

1. Разработано математическое описание трехмерной геометрической модели распределения рассеивателей в многолучевом канале передачи информации, учитывающей однократное и двукратное отражение сигналов, при размещении рассеивателей на поверхностях вложенных геометрических областей с возможностью изменения положения облака рассеивателей по азимуту и углу места. *(Соответствует пункту 15 паспорта специальности 2.2.13.)*

2. Сравнительный анализ влияния параметров модели расположения рассеивателей и степени многолучевости канала на эргодическую пропускную способность ММО-систем с пространственно-временным блочным кодированием и без него показал, что увеличение коэффициента Райса приводит к уменьшению пропускной способности мультиплексирующих ММО-систем и одновременно к ее росту в системах с пространственно-временным блочным кодированием. *(Соответствует пункту 2 паспорта специальности 2.2.13.)*

3. Установлена область эффективности пространственно-временного кодирования Аламоути и относительного кодирования с учетом погрешностей оценки матрицы канальных коэффициентов с использованием трехмерной модели расположения рассеивателей. *(Соответствует пункту 3 паспорта специальности 2.2.13.)*

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Пространственная модель расположения рассеивателей в ММО-канале передачи информации, учитывающая однократное и двукратное отражение сигналов, задание распределения рассеивателей на поверхностях множества вложенных геометрических областей, а также возможность изменения положения облака рассеивателей по азимуту и углу места. *(Соответствует пункту 15 паспорта специальности 2.2.13.)*

2. Использование разработанной трехмерной модели рассеивателей позволяет обеспечить энергетический выигрыш в отношении сигнал/шум на 5,7-8,7 дБ для различных антенных конфигураций относительно одноканальной системы, использующей пространственно-временное кодирование Аламоути. *(Соответствует пункту 2 паспорта специальности 2.2.13.)*

3. Алгоритм декодирования по методу максимального правдоподобия обеспечивает энергетический выигрыш в отношении сигнал/шум на 3,2-8,6 дБ по сравнению с методами минимума среднеквадратической ошибки и обнуления при вероятности битовой ошибки  $10^{-3}$  при использовании трехмерной модели рассеивателей. *(Соответствует пункту 3 паспорта специальности 2.2.13.)*

4. При уровне вероятности битовой ошибки  $10^{-3}$  и значении погрешности оценки канала  $\mu = 0,3$  относительное кодирование обеспечивает энергетический выигрыш до 3 дБ по сравнению с кодированием Аламоути. (Соответствует пункту 3 паспорта специальности 2.2.13.)

**Внедрение результатов диссертационного исследования.** Результаты, полученные в диссертационной работе, внедрены:

- 1) в НИР «Принципы построения и функционирования информационных систем в неоднородных сплошных средах», грант РФФ 24-29-00850;
- 2) в разработки компании «Акционерное общество торговли и развития электронных технологий – E-STARS»;
- 3) в разработки компании «Акционерное общество инвестиций и технологий – НВС».

Внедрения подтверждены соответствующими актами.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использованы методы математического и статистического моделирования, линейной и матричной алгебры, аналитической геометрии и теории цифровой обработки сигналов. Теоретические результаты подтверждены результатами компьютерного моделирования и экспериментальных исследований с использованием программно-аппаратных средств.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием адекватных математических моделей и корректным применением математического аппарата. Результаты исследований подтверждены компьютерным моделированием и согласуются с теоретическими зависимостями и экспериментальными данными, что свидетельствует о корректности и обоснованности проведенных исследований.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1. VI, VII, VIII, IX Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании – СТНО», г. Рязань, 2023, 2024, 2025, 2026 гг.
2. XXIX, XXX, XXXI Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь – RLNC», г. Воронеж, 2023, 2024, 2025 гг.
3. XXVIII, XXIX Всероссийская научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в научных исследованиях – НИТ», г. Рязань, 2023, 2024 гг.
4. VIII, IX, X Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы современной науки и производства», г. Рязань, 2023, 2024, 2025 гг.
5. XXVI, XXVII Международная научно-техническая конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA», г. Москва, 2024, 2025 гг.

6. IX Всероссийский молодежный научный форум «Наука будущего – наука молодых», г. Самара, 2024 г.

7. XXXV Международная научно-практическая конференция «Приоритетные направления развития науки и технологий», г. Тула, 2024 г.

8. Международная научно-практическая конференция «Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования», г. Казань, 2025 г.

**Публикации по теме диссертации.** По теме диссертационной работы опубликовано 25 научных работ, включая 4 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, 2 научных доклада, индексируемых в базе Scopus, 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ и 17 тезисов докладов на международных, всероссийских и внутривузовских научных конференциях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы составляет 170 страниц, 62 рисунка и 9 таблиц. Список литературы содержит 140 наименований.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены существующие двумерные и трехмерные геометрические модели радиоканалов ММО-систем. Разработана трехмерная геометрическая модель расположения рассеивателей для системы ММО в многолучевом канале, и выполнен анализ влияния пространственного распределения рассеивателей на фазовые и корреляционные свойства канальных коэффициентов. Сформулированы основные задачи исследования.

В многоантенных радиосистемах передачи информации распространение радиосигнала осуществляется в условиях многолучевости при наличии рассеивателей, расположенных в различных областях пространства между передающими и приемными устройствами. Наличие рассеивателей приводит к изменению амплитудных и фазовых характеристик принимаемого сигнала.

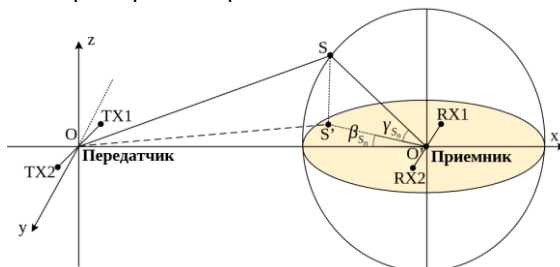


Рисунок 1 – Трехмерная модель распределения рассеивателей в канале ММО

Для учета этих изменений предложена пространственная модель расположения рассеивателей в ММО-канале, учитывающая как однократное, так и двукратное отражение сигналов. В данной модели расположение рассеивателей вокруг передатчика и приемника задается на поверхностях вложенных геометрических областей, формирующих рассматриваемую область. В трехмерной системе координат положение каждого рассеивателя определяется азимутом и углом места, а их распределение описывается различными законами, включая равномерное, гауссовское и фон Мизеса-Фишера распределения. Пространственное распределение рассеивателей моделируется различными сценариями в соответствии со стандартом COST-259, один из которых представлен на рисунке 1. Стандартом COST-259 предусмотрены следующие конфигурации расположения рассеивателей в пространстве распространения сигнала:

- сценарий А – рассеиватели вблизи приемного устройства, соответствует моделированию нисходящей линии передачи;
- сценарий В – рассеиватели у передатчика, моделирует восходящий канал;
- сценарий С – большой угловой разброс отражений, характерен для городских условий;
- сценарий D – малый разброс углов, типичен для сельской местности;
- сценарий Е – значительный разброс углов отражения, сигналы приходят со всех направлений.

Предложенная модель обладает высокой параметрической гибкостью. Она позволяет задавать размеры кластеров рассеивателей, их пространственное расположение, количество рассеивателей, расстояние между передающей и приемной антенными системами, а также степень концентрации рассеивателей. Это обеспечивает возможность адаптации модели к типовым сценариям функционирования радиосистем передачи информации, **что доказывает положение 1**. Для моделирования многолучевого распространения сигнала используется райсовский канал, который учитывает как рассеяние радиоволн, так и их распространение по прямому лучу. Канальная матрица, связанная с прямым лучом, учитывает затухание и время задержки сигнала и имеет вид:

$$\underline{\mathbf{H}}_{\text{LOS}} = \left\{ a_{\text{LOS}} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} D_{k,l}}, k = 1, \dots, N_{\text{TX}}, l = 1, \dots, N_{\text{RX}} \right\},$$

где  $D_{k,l}$  – расстояние между  $k$ -й передающей антенной и  $l$ -й приемной антенной;  $a_{\text{LOS}}$  – коэффициент затухания прямого пути. Канальная матрица, описывающая однократное отражение рассеянных радиоволн, определяется по следующему выражению:

$$\underline{\mathbf{H}}_{\text{SB}} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{N_s}} \sum_{n=1}^{N_s} \sqrt{L_{\text{TX},k,n}} \sqrt{L_{\text{RX},n,l}} e^{-\frac{j2\pi(D_{\text{TX},k,n} + D_{\text{RX},n,l})}{\lambda}} e^{j\theta_n}, k = 1, \dots, N_{\text{TX}}, l = 1, \dots, N_{\text{RX}} \right\},$$

где  $N_s$  – число рассеивателей;  $D_{TX_{k,n}}$  и  $D_{RX_{n,l}}$  – расстояния между  $k$ -й передающей антенной и  $n$ -м рассеивателем, а также между  $n$ -м рассеивателем и  $l$ -й приемной антенной;  $\varphi_n$  – смещение фазы при отражении от рассеивающего объекта;  $\lambda$  – длина волны;  $L_{TX_{k,n}}$  и  $L_{RX_{n,l}}$  – коэффициенты прохождения радиосигнала, рассчитываемые по модели затухания сигнала в свободном пространстве:  $L_{TX_{k,n}} = \left( \frac{\lambda}{4\pi D_{TX_{k,n}}} \right)^2$ ;  $L_{RX_{n,l}} = \left( \frac{\lambda}{4\pi D_{RX_{n,l}}} \right)^2$ . По результатам расчета матрицы канальных коэффициентов можно рассчитать их корреляционную матрицу:  $\mathbf{R} = \text{vec}(\mathbf{H})\text{vec}(\mathbf{H})^H$ , где  $\text{vec}(\mathbf{H})$  – векторизованная матрица канальных коэффициентов.

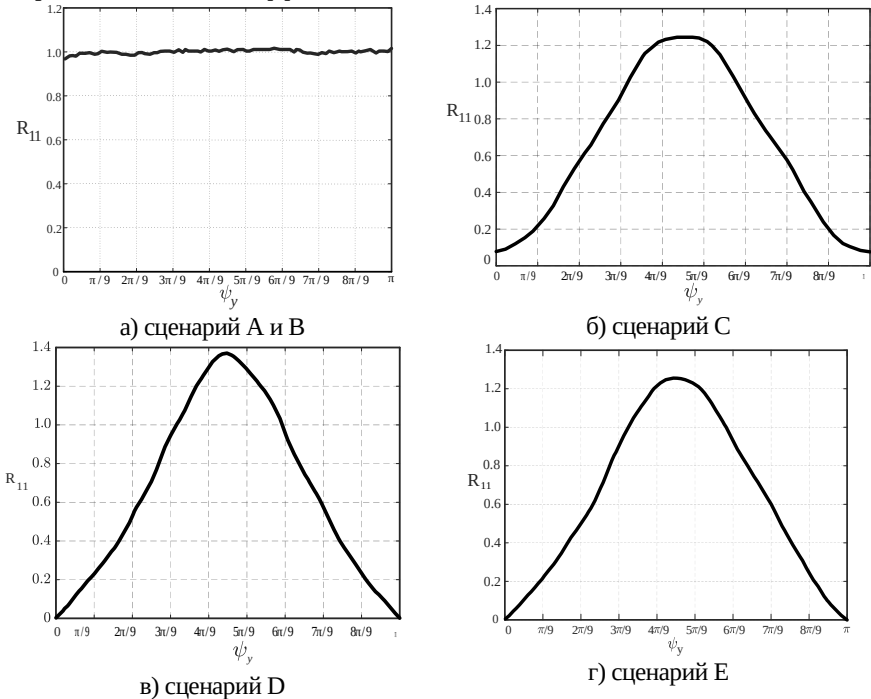


Рисунок 2 – Зависимость дисперсии первого элемента корреляционной матрицы от угла поворота в разных сценариях

Результаты моделирования зависимости дисперсии канального коэффициента для различных сценариев расположения рассеивателей, представленные на рисунке 2, показывают, что коэффициенты корреляционной матрицы мало

меняются при повороте сферы рассеивателей по сценарию А и В. Распределение рассеивателей по эллипсоиду между передающим и приемным устройствами в соответствии со сценариями С и D приводит к формированию максимума коэффициента корреляции в направлении на передающее устройство. Поворот координат рассеивателей по эллипсоиду вокруг оси  $Oy$  в соответствии со сценарием Е приводит к значительному изменению коэффициента корреляционной матрицы с максимумом при расположении рассеивателей на поверхности эллипсоида вблизи приемного или передающего устройств.

**Во второй главе** рассмотрены алгоритмы пространственно-временного кодирования и декодирования в многоантенных системах, включая пространственно-временное блочное кодирование Аламоути и пространственное кодирование методом BLAST. Проведен анализ эффективности кодирования Аламоути и алгоритмов декодирования сигналов в условиях наличия рассеивателей. Исследовано влияние трехмерного пространственного распределения рассеивателей на вероятность битовой ошибки и пропускную способность радиосистемы передачи информации при использовании пространственно-временного кодирования.

Рассмотрены схема кодирования Аламоути, обеспечивающая высокую надежность за счет ортогонального пространственно-временного блочного кодирования, а также метод пространственного кодирования BLAST, ориентированный на максимизацию спектральной эффективности.

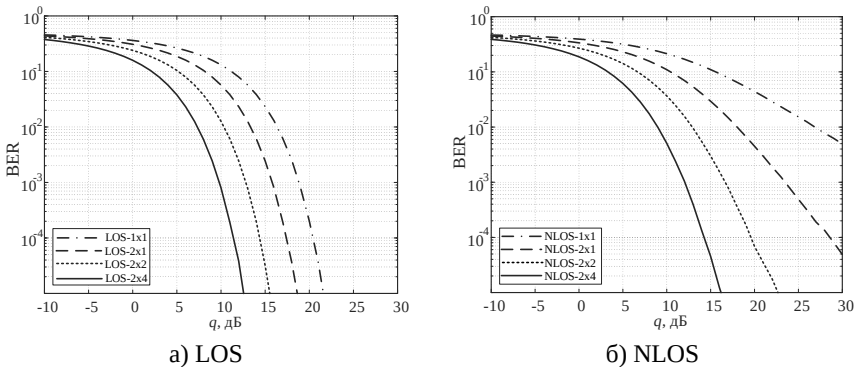


Рисунок 3 – Зависимость BER кодирования Аламоути от  $q$  для различных антенных конфигураций

Кодирование Аламоути представляет собой простую и высокоэффективную схему пространственно-временного кодирования для системы с двумя передающими антеннами. На рисунке 3 представлены зависимости вероятности битовой ошибки (BER) от отношения сигнал/шум  $q$  для различных конфигураций антенных решеток при использовании кодирования Аламоути в условиях прямой видимости (LOS) и при наличии рассеивателей (NLOS). Моделирование выполнено с применением трехмерной геометрической модели канала по сценарию Е

стандарта COST-259. Результаты показывают, что при уровне  $BER = 10^{-3}$  кодирование Аламути обеспечивает энергетический выигрыш в отношении сигнал/шум по сравнению с одноканальной системой: 8,8 дБ для конфигурации 2×1; 13,9 дБ – для 2×2 и 17,8 дБ – для 2×4 в условиях NLOS. В условиях LOS энергетический выигрыш составляет 3,1 дБ; 6,1 дБ и 9,1 дБ соответственно. Таким образом, применение пространственно-временного кодирования Аламути обеспечивает дополнительный энергетический выигрыш в отношении сигнал/шум на 5,7-8,7 дБ для различных антенных конфигураций относительно одноканальной системы при использовании трехмерной модели рассеивателей, **что доказывает положение 2.**

Проведено сравнение эффективности алгоритмов пространственно-временного декодирования с различными методами демодуляции в трехмерном многолучевом канале. Зависимость BER от отношения сигнал/шум для различных методов декодирования показана на рисунке 4. При наличии рассеивателей в трехмерной геометрической модели канала алгоритм декодирования с методом максимального правдоподобия (МП) обеспечивает значительное снижение вероятности битовой ошибки по сравнению с методами обнуления (ZF) и минимума среднеквадратической ошибки (МСКО). Результаты моделирования показывают, что в условиях наличия рассеивателей при вероятности битовой ошибки  $10^{-3}$  алгоритм декодирования по методу максимального правдоподобия обеспечивает энергетический выигрыш в отношении сигнал/шум на 3,2-8,6 дБ по сравнению с методами минимума среднеквадратической ошибки и обнуления, **что доказывает положение 3.**

Рассмотрено влияние пространственного распределения рассеивателей, описываемого распределением фон Мизеса-Фишера. Установлено, что увеличение параметра концентрации рассеивателей приводит к ухудшению характеристик системы: при фиксированном отношении сигнал/шум вероятность битовой ошибки возрастает. Также выполнена оценка эргодической пропускной способности ММО-канала с пространственно-временным кодированием. Показано, что использование кодирования Аламути снижает спектральную эффективность по сравнению с теоретическим пределом ММО-системы без кодирования. Наличие рассеивателей дополнительно уменьшает пропускную

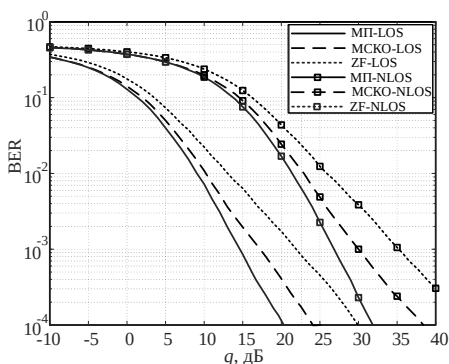


Рисунок 4 – Зависимость BER от ОСШ алгоритмов декодирования

способность, однако увеличение коэффициента Райса компенсирует данные потери.

**В третьей главе** исследованы алгоритмы относительного пространственно-временного кодирования и декодирования для систем ММО в условиях наличия рассеивателей и неопределенности канальной матрицы. Проведен сравнительный анализ эффективности относительного кодирования и пространственно-временного кодирования Аламути при наличии погрешностей оценки канала. Исследовано влияние пространственного распределения рассеивателей, коэффициента Райса и погрешности оценки канальной матрицы на вероятность битовой ошибки, энергоэффективность и эргодическую пропускную способность радиосистемы передачи информации.

Диффузионная составляющая канала передачи информации, обозначаемая как  $\underline{\mathbf{H}}_{\text{DIF}}$ , формируется за счет двух типов взаимодействий сигнала – однократного и двукратного отражения от рассеивателей. Зависимость между этими компонентами выражается соотношением:

$$\underline{\mathbf{H}}_{\text{DIF}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{SB}}}\underline{\mathbf{H}}_{\text{SB}} + \sqrt{\varepsilon_{\text{DB}}}\underline{\mathbf{H}}_{\text{DB}},$$

где  $\varepsilon_{\text{SB}}$  и  $\varepsilon_{\text{DB}}$  – коэффициенты, определяющие соотношение мощностей сигнала, приходящихся на однократное и двукратное отражения соответственно ( $\varepsilon_{\text{SB}} + \varepsilon_{\text{DB}} = 1$ ). Канальная матрица при двукратном отражении имеет вид:

$$\underline{\mathbf{H}}_{\text{DB}} = \left\{ \frac{1}{\sqrt{N_s(N_s - 1)}} \sum_{m=1}^{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} \sqrt{L_{\text{TX}_{k,m}}} \sqrt{L_{\text{S}_{m,n}}} \sqrt{L_{\text{RX}_{n,l}}} e^{\frac{j2\pi D_T}{\lambda}} e^{j\varphi_{k,m,l}} e^{j\varphi_{k,n,l}}, k=1, \dots, N_{\text{TX}}, l=1, \dots, N_{\text{RX}} \right\},$$

где  $D_T$  – полное расстояние пути сигнала от передатчика до приемника;  $L_{\text{TX}_{k,m}}$ ,  $L_{\text{S}_{m,n}}$ ,  $L_{\text{RX}_{n,l}}$  – коэффициенты прохождения радиосигнала на тракте от передатчика до приемника;  $e^{j\varphi_{k,n,l}}$  и  $e^{j\varphi_{k,m,l}}$  – случайные искажения фазы при рассеянии на рассеивающих объектах. Канальная матрица с учетом диффузионной составляющей и прямой видимости описывается выражением:

$$\underline{\mathbf{H}} = \sqrt{\frac{1}{K_R + 1}}\underline{\mathbf{H}}_{\text{DIF}} + \sqrt{\frac{K_R}{K_R + 1}}\underline{\mathbf{H}}_{\text{LOS}},$$

где  $K_R$  – коэффициент Райса, который определяет соотношение между мощностями прямого луча и рассеянных лучей.

При измерении канальной матрицы возникают погрешности, обусловленные влиянием фазовых шумов и быстроменяющихся условий распространения сигнала. В результате элементы канальной матрицы измеряются с некоторой ошибкой, величина которой  $\Delta \underline{\mathbf{H}}$  определяется следующим выражением:

$$\Delta \underline{\mathbf{H}} = \mu(I_H + jQ_H),$$

где  $\mu$  – параметр, определяющий уровень погрешности;  $I_H$  и  $Q_H$  – независимые случайные величины, представляющие квадратурные составляющие погрешности. Тогда канальную матрицу с учетом погрешности можно представить следующим образом:  $\hat{\mathbf{H}} = \mathbf{H} + \Delta\mathbf{H}$ . При наличии ошибок в оценке канальной матрицы пропускная способность рассчитывается следующим образом:

$$C_H = \sum_{m=1}^K \log_2(1 + q_m),$$

где  $q_m = \frac{q f_m^2 \left| \left( \hat{\mathbf{U}}^H \mathbf{H} \hat{\mathbf{Q}} \right)_{mm} \right|^2}{1 + q \sum_{k=1, k \neq m}^K f_k^2 \left| \left( \hat{\mathbf{U}}^H \mathbf{H} \hat{\mathbf{Q}} \right)_{mk} \right|^2}$ ;  $\hat{\mathbf{H}} = \hat{\mathbf{U}} \hat{\Sigma} \hat{\mathbf{Q}}^H$ ;  $q$  – отношение сигнал/шум. Для

характеристики системы ММО используется эргодическая пропускная способность, которая определяется как усреднение пропускной способности по ансамблю реализаций канальной матрицы  $\mathbf{H}$ :  $C_E = \overline{C_H}$ .

В работе проведен анализ эргодической пропускной способности ММО-системы с учетом различных параметров, включая уровень погрешности оценки канала, степень концентрации рассеивателей, количество приемных антенн и коэффициент Райса. Показано, что увеличение концентрации рассеивателей может приводить к росту пропускной способности за счет улучшения пространственной структуры канала, однако при доминировании LOS-компоненты этот эффект снижается.

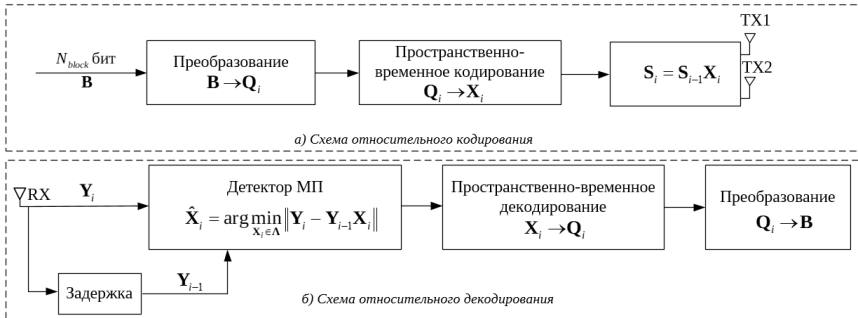


Рисунок 5 – Схемы относительного кодирования и декодирования

Относительное пространственно-временное кодирование обеспечивает передачу данных в ММО-системах без необходимости оценки состояния канала (рисунок 5). Информация представляется в виде разностей между последовательными пространственно-временными матрицами, что исключает использование пилот-сигналов и делает данный метод эффективным при быстроизменяющихся каналах передачи информации. При декодировании

информационных символов достаточно знать текущее и предыдущее значения вектора наблюдаемых сигналов. Приемный сигнал в системе с относительным кодированием описывается следующим выражением:

$$\underline{\mathbf{Y}}_i = \sqrt{\frac{q}{N_{\text{TX}}}} \underline{\mathbf{H}}_i \underline{\mathbf{S}}_i + \underline{\mathbf{V}}_i = \sqrt{\frac{q}{N_{\text{TX}}}} \underline{\mathbf{H}}_i \underline{\mathbf{S}}_{i-1} \underline{\mathbf{X}}_i + \underline{\mathbf{V}}_i = \underline{\mathbf{Y}}_{i-1} \underline{\mathbf{X}}_i + \tilde{\underline{\mathbf{V}}},$$

где  $\underline{\mathbf{S}}_i$  – пространственно-временная кодовая матрица, передаваемая на  $i$ -м интервале передачи;  $\underline{\mathbf{X}}_i$  – матрица информационных символов, закодированных по относительной схеме;  $\underline{\mathbf{V}}_i$  – матрица аддитивного шума приемного тракта.

В результате моделирования проведен сравнительный анализ эффективности пространственно-временного блочного кодирования Аламоути и относительного пространственно-временного кодирования (DSTBC) в условиях наличия погрешностей в оценке канальной матрицы (рисунок 6). Установлено, что при отсутствии погрешности оценки канала кодирование Аламоути обеспечивает наилучшие характеристики надежности. Однако с увеличением  $\mu$  наблюдается последовательное ухудшение характеристик кодирования Аламоути. В отличие от кодирования Аламоути, относительное кодирование демонстрирует устойчивость к погрешности оценки канала, поскольку его реализация не предполагает использования оцененной канальной матрицы на приемной стороне. При уровне вероятности битовой ошибки  $\text{BER} = 10^{-3}$  и значении погрешности оценки канала  $\mu = 0,3$  относительное кодирование обеспечивает энергетический выигрыш порядка 3 дБ для конфигурации 2x1 по сравнению с кодированием Аламоути, **что доказывает положение 4.**

Проведен анализ энергопотребления MIMO-системы при использовании пространственно-временного блочного кодирования Аламоути и относительного кодирования с учетом погрешности оценки канала. Показано, что при наличии значительной погрешности оценки канала относительное кодирование демонстрирует более устойчивые характеристики и может обеспечивать меньшие энергозатраты, особенно при больших расстояниях.

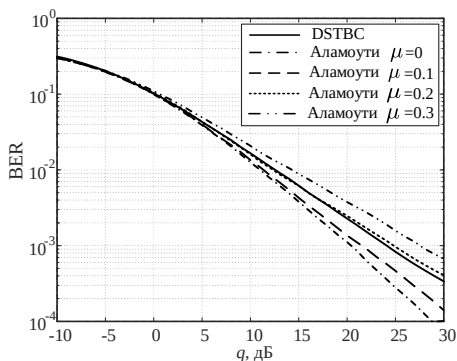


Рисунок 6 – Зависимость BER от  $q$  для кодирования Аламоути и DSTBC 2x1 с учетом погрешности оценки канала

Также установлено, что при высоких значениях коэффициента Райса и увеличении числа антенн влияние погрешности оценки канальной матрицы становится критичным, что требует применения методов компенсации ошибок и адаптивных алгоритмов оценки канала. Для повышения пропускной способности рекомендуется выбирать расстояние между приемными антеннами в диапазоне  $d = 3\lambda \dots 4\lambda$ .

**В четвертой главе** рассмотрены аспекты технической реализации предложенных алгоритмов пространственно-временного кодирования на платформе GNU Radio с использованием приемопередатчиков USRP X300. Проведен анализ эргодической пропускной способности кооперативных систем ММО в различных сценариях рассеивания в трехмерном пространстве, при этом показано влияние соотношения мощностей прямой и рассеянной компонент сигнала на эффективность передачи данных.

Предложено использование различных топологий беспроводных сенсорных сетей (БСС) в качестве антенных конфигураций кооперативной системы ММО. Проведен анализ эргодической пропускной способности в различных сценариях рассеивания в трехмерном пространстве, показывающий влияние соотношения между мощностями прямого луча и рассеянных лучей на эффективность радиосистемы. Оптимизация пространственной топологии БСС позволяет добиться значительного увеличения пропускной способности в условиях многолучевости.

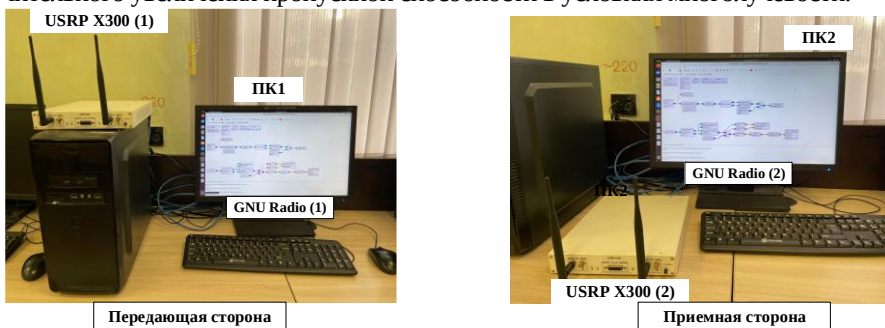


Рисунок 7 – Экспериментальный стенд

Проведена экспериментальная оценка матрицы канальных коэффициентов ММО-системы с использованием платформы GNU Radio и приемопередатчиков USRP X300 (рисунок 7). Платформа USRP X300 применяется как аппаратная основа для реальной передачи и приема радиосигналов в системе ММО. Среда GNU Radio используется для формирования, модуляции, кодирования и обработки сигналов в режиме реального времени. Для минимизации ошибки оценки канальной матрицы применена ортогональная тестовая последовательность на основе матрицы Адамара. На основе полученной канальной матрицы с учетом погрешности ее оценки реализована проверка эффективности пространственно-временных алгоритмов кодирования

ММО-системы на платформе GNU Radio с использованием различных методов модуляции. Экспериментальные результаты подтвердили корректность разработанных моделей и эффективность предложенных алгоритмов при многолучевом распространении радиосигнала.

**В заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты:

1. Разработаны и математически обоснованы трехмерные геометрические модели рассеяния для моделирования пространственных и угловых характеристик многолучевого распространения радиосигнала в системах ММО. Установлено влияние пространственного распределения рассеивателей на фазовые и корреляционные свойства канальной матрицы.

2. Исследована эффективность алгоритмов пространственно-временного кодирования и декодирования при различных параметрах канала и распределениях рассеивателей. Показано, что кодирование Аламути обеспечивает выигрыш до 8,7 дБ в отношении сигнал/шум для различных антенных конфигураций при наличии рассеивателей.

3. Установлено, что относительное кодирование обладает преимуществом по надежности и энергоэффективности в условиях отсутствия информации о состоянии канала. Показано, что при значительных погрешностях оценки канальной матрицы относительное кодирование обеспечивает энергетический выигрыш до 3 дБ по сравнению со схемой Аламути.

4. Выполнен анализ эргодической пропускной способности ММО-систем с учетом параметров канала, ошибок оценки и распределения рассеивателей. Установлено, что увеличение числа антенн повышает пропускную способность, однако при этом возрастает чувствительность к погрешностям оценки канальной матрицы, особенно при больших коэффициентах Райса. Для повышения пропускной способности рекомендуется выбирать расстояние между приемными антеннами в диапазоне  $d = 3\lambda \dots 4\lambda$ .

5. Предложенные алгоритмы пространственно-временного кодирования реализованы на среде GNU Radio с использованием приемопередатчиков USRP X300, что позволило экспериментально подтвердить эффективность предложенных методов и достоверность полученных теоретических результатов.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Публикации в журналах, рекомендованных ВАК**

1. Паршин, А. Ю. Разработка модели и классификация ММО каналов связи в трехмерной системе координат / А. Ю. Паршин, В. Х. Нгуен // Цифровая обработка сигналов. – 2023. – № 4. – С. 41-46.

2. Паршин, А. Ю. Анализ эффективности ММО системы связи с относительным кодированием при наличии рассеивателей / А. Ю. Паршин, В. Х. Нгуен // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2024. – № 89. – С. 3-11.

3. Паршин, А. Ю. Исследование эффективности относительного кодирования при использовании трехмерной модели рассеивателей в ММО системах связи / А. Ю. Паршин, В. Х. Нгуен // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2025. – Вып. 2(58). – С. 14-19.

4. Паршин, А. Ю. Оценка пропускной способности ММО системы связи при погрешности оценки канальной матрицы и наличии рассеивателей / А. Ю. Паршин, В. Х. Нгуен // Радиотехника. – 2026. – Т. 90. – № 1. – С. 84-93.

#### **Публикации в изданиях, индексируемых Scopus**

5. Parshin, A. Yu. Evaluation of the Demodulation Efficiency for MIMO Communication System Signals Under Three-Dimensional Modeling of Scatterer Locations / A. Yu. Parshin, V. K. Nguyen // 26th International conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). – IEEE. – 2024. – P. 1-4.

6. Parshin, A. Yu. Estimation of the Channel Matrix and Capacity of Cooperative MIMO Systems in A Multipath Communication Channel / A. Yu. Parshin, V. K. Nguyen // 27th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA). – IEEE. – 2025. – P. 1-5.

#### **Другие статьи и материалы конференций**

7. Нгуен, В. Х. Расчет канальной матрицы системы ММО при распределении рассеивателей на сфере / В. Х. Нгуен, А. Ю. Паршин // Сборник трудов VI Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании-СТНО-2023». – Т. 1. – Рязань. – 2023. – С. 103-107.

8. Паршин, А. Ю. Трехмерное моделирование канала связи с гауссовским распределением рассеивателей на сфере / А. Ю. Паршин, В. Х. Нгуен // Сборник трудов XXIX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж. – 2023. – Т.5. – С. 311-316.

9. Нгуен, В. Х. Кодирование Аламоути в многоканальных беспроводных сенсорных сетях IoT при наличии рассеивателей / В. Х. Нгуен, А. Ю. Паршин // Материалы VIII Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань. – 2023. – С. 16-23.

10. Нгуен, В. Х. Равномерное распределение рассеивателей для трехмерной модели / В. Х. Нгуен // Материалы IX научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина. – 2023. – С. 52-53.

11. Нгуен, В. Х. Кодирование Аламоути в беспроводных кооперативных сенсорных сетях / В. Х. Нгуен // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXVIII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: РГРТУ. – 2023. – С. 153-154.

12. Паршин, А. Ю. Эффективность относительного пространственно-временного кодирования при наличии рассеивателей / А. Ю. Паршин, В. Х. Нгуен // Сборник трудов XXX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж. – 2024. – Т.5. – С. 361-366.

13. Паршин, А. Ю. Эффективность относительного пространственно-временного кодирования при трехмерном моделировании рассеивателей в канале связи / А. Ю. Паршин, В. Х. Нгуен / Сборник трудов VII Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании-СТНО-2024». – Т. 1. – Рязань. – 2024. – С. 116-120.

14. Нгуен, В. Х. Анализ помехоустойчивости системы ММО в различных сценариях рассеивателей / В. Х. Нгуен, А. Ю. Паршин // Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции Актуальные проблемы современной науки и производства. – Рязань. – 2024. – С. 58-65.

15. Нгуен, В. Х. Пропускная способность канала ММО при различных конфигурациях антенных решеток / В. Х. Нгуен // Новые информационные технологии в научных исследованиях: материалы XXIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. – Рязань: РГРТУ. – 2024. – С. 151-152.

16. Нгуен, В. Х. Применение относительного пространственно-временного кодирования в системах связи при наличии рассеивателей / В. Х. Нгуен // Материалы X научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина. – 2024. – С. 50-51.

17. Паршин, А. Ю. Кооперативная система ММО в беспроводных сенсорных сетях / А. Ю. Паршин, В. Х. Нгуен // Приоритетные направления развития науки и технологий: сборник докладов XXXV Международной научно-практической конференции. – Тула. – 2024. – С. 231-234.

18. Нгуен, В. Х. Пространственное кодирование и декодирование в системе связи ММО с учетом наличия рассеивателей / В. Х. Нгуен // Сборник тезисов докладов участников IX Всероссийского молодежного научного форума «Наука будущего - наука молодых». – Самара. – 2024. – С. 131.

19. Паршин, А. Ю. Оценка пропускной способности ММО системы связи при моделировании рассеивателей по распределению фон Мизеса-Фишера / А. Ю. Паршин, В. Х. Нгуен / Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума «Современные технологии в науке и образовании-СТНО-2025». – Т. 1. – Рязань. – 2025. – С. 106-111.

20. Паршин, А. Ю. Эффективность ММО-системы при распространении радиоволн с двукратным отражением / А. Ю. Паршин, В. Х. Нгуен // Сборник трудов XXXI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж. – 2025. – Т.4. – С. 268-274.

21. Нгуен, В. Х. Трехмерная модель канала связи с рассеивателями при различных топологиях ММО антенных систем / В. Х. Нгуен // Материалы XI научно-технической конференции магистрантов Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина. – 2025. – С. 50-51.

22. Нгуен, В. Х. Применение ММО-технологий для повышения эффективности связи в системах Интернета вещей / В. Х. Нгуен, В. Т. Дам // Цифровые системы и модели: теория и практика проектирования, разработки и использования: материалы международной научно-практической конференции. – Казань. – 2025. – С. 468-471.

23. Паршин, А. Ю. Экспериментальное исследование эффективности пространственно-временного кодирования ММО-системы / А. Ю. Паршин, В. Х. Нгуен // Материалы X Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы современной науки и производства». – Рязань. – 2025. – С. 75-83.

#### **Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ**

24. Нгуен В. Х., Паршин А. Ю. Программа для расчета BER относительного пространственно-временного кодирования системы ММО при наличии рассеивателей: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2025664399. – Зарегистр. 27.05.2025; опубл. 04.06.2025. – 4 кБ. – Яз. программирования: MATLAB R2021b. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

25. Нгуен В. Х., Паршин А. Ю. Программа для моделирования распределения рассеивателей в трехмерном пространстве для многоантенной системы: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № RU 2025665641. – Зарегистр. 27.05.2025; опубл. 18.06.2025. – 4 кБ. – Яз. программирования: MATLAB R2021b. – Правообладатель: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина».

**НГУЕН Ван Хань**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКИ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ  
СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ТРЕХМЕРНОЙ  
МОДЕЛИ РАССЕЙВАТЕЛЕЙ**

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

Подписано в печать 28.04.2026. Формат бумаги 60 × 84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.  
Тираж 100 экз.  
Рязанский государственный радиотехнический университет.  
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.  
Редакционно-издательский центр РГРТУ.