

На правах рукописи



Исса Махмуд

**МНОГОКАНАЛЬНАЯ РАДИОВОЛНОВАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ MIMO**

1.3.4. Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Суханов Дмитрий Яковлевич

Официальные оппоненты:

Фокин Григорий Алексеевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», кафедра радиосвязи и вещания, профессор

Степанов Максим Андреевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра радиоприемных и радиопередающих устройств, заведующий кафедрой

Покаместов Дмитрий Алексеевич, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники, доцент

Защита состоится 16 ноября 2023 г. в 17 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.1.3.02», созданного на базе радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 11 ТГУ, аудитория 401).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/d72714e0-83ac-435c-9cf6-165cefddb252>

Автореферат разослан « ____ » октября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Торгаев Станислав Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Спрос на надежную и высокоскоростную беспроводную передачу данных постоянно растёт. Это в первую очередь связано с использованием приложений, требующих высокой скорости передачи данных, таких как потоковое видео и высокоскоростной просмотр веб-страниц на мобильных терминалах. Системы с множеством излучателей и множеством приёмников (Multiple Input Multiple Output- MIMO) предоставляют возможность улучшить качество связи в беспроводных сетях. Методы MIMO уже внедрены в современных беспроводных сетях для повышения пропускной способности канала и надежной передачи с использованием нескольких антенн в передатчике и приемнике. В технологии MIMO многолучевое рассеяние в среде распространения используется для увеличения количества пространственных каналов, а значит и для увеличения пропускной способности системы. В результате эффективность технологии MIMO сильно зависит от среды распространения и модели канала. Для эффективной работы MIMO требуется достаточное рассеяние в среде распространения, а также оптимальная оценка матрицы канала для правильного восстановления передаваемых данных. Предлагается множество подходов для увеличения количества пространственных каналов и управления средами распространения, такими как увеличение размера апертуры антенной решетки, использование неоднородных материалов в среде распространения, таких как ретрансляторы и интеллектуальные отражающие поверхности. Оценке канала также уделяется все больше внимания, и для построения матрицы канала используется множество методов, таких как оценка канала максимального правдоподобия, оценка канала методом наименьших квадратов и линейная минимальная среднеквадратическая оценка канала.

В этой работе среды распространения модифицируются с помощью пассивных ретрансляторов, чтобы улучшить качество связи. Используемый пассивный ретранслятор состоит из двух частей, соединенных гибким кабелем. Каждая часть состоит из параболического рефлектора с антенной в фокусе. Распределяя предлагаемые пассивные ретрансляторы в средах распространения, можно создать многолучевое распространение, добиться формирования луча и расширить зону покрытия. Размещение пассивных ретрансляторов также используется для локализации абонентов – точечных источников в коммуникационной среде. Линейно частотная модуляция используется в качестве пилот-сигналов для оценки матрицы канала в ультразвуковой MIMO-связи.

Предлагаемые конфигурации ретрансляторов можно использовать для создания многолучевости и расширения зоны покрытия в средах с препятствиями, например в городах. Кроме того, предлагаемый ультразвуковой MIMO может использоваться для связи на короткие

расстояния, например, для связи с роботами и не создавать помехи в радиодиапазоне.

Степень разработанности темы исследования.

Проведенный обзор источников по теме исследований подтверждает актуальность темы исследования и необходимость методов модификации среды для создания многолучевого распространения волн и расширения зоны покрытия с целью увеличения пропускной способности канала в системе ММО. Наиболее распространенными способами увеличения количества пространственных каналов являются увеличение размера апертуры антенной решетки в передатчике и приемнике в дополнение к использованию искусственных неоднородных объектов в среде распространения, таких как интеллектуальные отражающие поверхности. Однако увеличение размера апертуры антенной решетки для соответствия всем расстояниям между передатчиком и приемником нецелесообразно, а технология интеллектуальных отражающих поверхностей требует информацию о местоположении абонента и может работать только с одним абонентом за раз.

Для определения местоположения абонентов в коммуникационной среде был предложен ряд методов. Многие из этих способов требуют наличия множества базовых станций в целевой области или использования уникального набора сигналов для определения местоположения абонентов. Однако несколько базовых станций могут быть недоступны, особенно в городских районах, кроме того, требуется синхронизация между базовой станцией и абонентами.

Исследования по использованию ультразвука ММО ограничены некоторыми приложениями, такими как медицинская диагностика и подводная связь. Однако можно воспользоваться ограниченным распространением ультразвуковых волн для обеспечения связи на короткие расстояния, например, для связи с роботом без создания помех в радиодиапазоне.

Целью диссертационной работы является разработка методов, позволяющих создавать многолучевое распространение, а также расширять покрытие в ММО-связи для улучшения качества связи и локализации абонентов.

Задачи диссертационной работы:

1. Разработка метода создания многолучевости в среде распространения в системе ММО с целью увеличения пропускной способности.
2. Разработка метода формирования луча с помощью ретрансляторов, а также расширения зоны покрытия в системе ММО для улучшения качества связи.
3. Разработка метода локализации абонентов в коммуникационной среде с использованием одной базовой станции без необходимости синхронизации между базовой станцией и абонентами.

4. Разработка метода оценки матрицы каналов в волновой системе ММО.

5. Разработка экспериментальной установки системы ММО на ультразвуковых частотах.

6. Экспериментальные исследования и проверка разработанных методов.

Методы исследования.

1. Решение уравнений Максвелла и уравнения Гельмгольца.

2. Методы численного моделирования распространения волновых полей на основе волнового уравнения во временной области.

3. Линейное приближение преобразования сигналов и полей.

4. Физические эксперименты с ультразвуковыми волнами в воздухе на частотах до 43 кГц.

Положения, выносимые на защиту:

1. В системе связи с множеством излучателей и множеством приемников (ММО), наличие в среде распространения ретрансляторов формирует дополнительные пространственные каналы связи, так как каждый ретранслятор представляет один пространственный канал, при условии, что обеспечивается пространственное разрешение ретрансляторов решетками и приемника и передатчика. Добавленные ретрансляторы обеспечивают многолучевое распространение, формирование луча и расширение зоны покрытия.

2. Локализация точечных источников волнового поля в системе из нескольких ретрансляторов осуществима путем обработки нормированных комплексных амплитуд сигналов, полученных в линейке приемников, методом согласованной фильтрации и последующего суммирования по интенсивности для разных частот при условии уникальности волнового поля от различных точечных источников рассматриваемой области, определяемой корректностью и единственностью максимума корреляции.

3. Расчет матрицы каналов в системе связи с множеством излучателей и множеством приемников (ММО) реализуется за счет применения сигналов с линейной частотной модуляцией в качестве ортогональных по времени пилот-сигналов, что обеспечивает передачу данных с амплитудно-фазовой модуляцией в полосе частот пилот-сигналов.

Достоверность защищаемых положений:

1. Достоверность первого положения подтверждается результатами численного моделирования и согласованием результатов с теоретическими оценками. Разработанная численная модель основана на решении волнового уравнения. Возможность расширения зоны покрытия подтверждена экспериментально на ультразвуковых волнах в воздухе.

2. Достоверность второго положения подтверждается результатами численного моделирования, согласованием результатов с теоретическими оценками и экспериментальными результатами на ультразвуковых волнах в воздухе.

3. Достоверность третьего положения подтверждается результатами экспериментальных исследований и численного моделирования. В результате численного моделирования показано, что использование линейно частотной модуляции в качестве пилот-сигналов позволяет оценить матрицу каналов, а экспериментальные результаты подтверждают результаты численного моделирования.

Новизна исследования

1. Использование массивов пассивных ретрансляторов на основе параболических отражателей в системах ММО для создания многолучевого распространения, формирования луча и расширения покрытия в среде распространения ММО. В прошлом этот ретранслятор использовался для расширения покрытия при двухточечной связи (массив ретрансляторов не использовался).

2. Впервые распределение пассивных ретрансляторов используется для локализации абонентов в коммуникационной среде, поскольку на базовой станции для различных абонентов регистрируются разные сигнатуры полей.

3. Сигналы линейной частотной модуляции с разделением по времени используются для построения пилот-сигналов для оценки канала в ультразвуковых системах ММО.

Теоретическая значимость работы.

По результатам численных и аналитических расчетов показана возможность использования пассивных ретрансляторов для модификации среды распространения в системе ММО с целью увеличения пропускной способности канала, улучшения качества связи и обеспечения локализации абонентов.

Практическая значимость работы.

Результаты исследования могут быть использованы для распределения пассивных ретрансляторов в городах, где высокие здания препятствуют распространению радиоволн, с целью расширения зоны покрытия и улучшения качества связи.

Разработка ультразвуковой системы ММО, которую можно использовать для связи на короткие расстояния без создания помех в радиодиапазоне.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 работ, в том числе 2 статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 1 статья в зарубежном научном журнале, входящем в Web of Science, 1 статья в зарубежном научном журнале, входящем в Scopus), 1 статья в сборнике материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus, 2 статьи в прочем научном журнале, 3 публикации в сборниках материалов международных и

всероссийской научно-технических и научно-практической конференций и форума.

Апробация работы. Полученные в работе результаты были представлены на следующих конференциях:

9-я Международная научно-практическая конференция Актуальные проблемы радиофизики АПР 2021 (Томск, 2021);

27-я Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов «Новые информационные технологии в научных исследованиях» (НИТ-2022). – 2022 (Москва, 2022);

Международный научно-технический форум «Телекоммуникационные и вычислительные системы» – 2022 (Москва, 2022);

Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» – 2023 (Санкт-Петербург, 2023);

20-я Всероссийская конференция студенческих научно-исследовательских инкубаторов СНИИ – 2023 (Томск, 2023).

Личный вклад автора. Научным руководителем определены направления исследований и пути решения поставленных в диссертации задач. Соискателем лично или при его непосредственном участии выполнены численное моделирование, экспериментальные исследования, разработка экспериментальных установок, разработаны и экспериментально опробованы предложенные в диссертации методы. Основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту и составляющие научную новизну работы, получены лично соискателем либо при его прямом участии.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 90 наименований. Общий объем диссертации составляет 124 страницы. В диссертации содержится 73 рисунка и 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **введении** рассматривается актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи работы; представлены научные положения, выносимые на защиту; сформулирована теоретическая и практическая значимость работы и представлена общая характеристика работы.

В **первой** главе представлено описание основных принципов системы ММО, обзор литературы по теме исследования и описание методов решений, которые применяются в данной работе.

Математическое описание связи между переданным и принятым сигналами рассматривалось с помощью линейной модели. Если N_s – количество передающих антенн, а N_r – количество приёмных антенн

(Рисунок 1), система может быть описана с использованием линейной модели в матричной форме, как показано в уравнении (1).

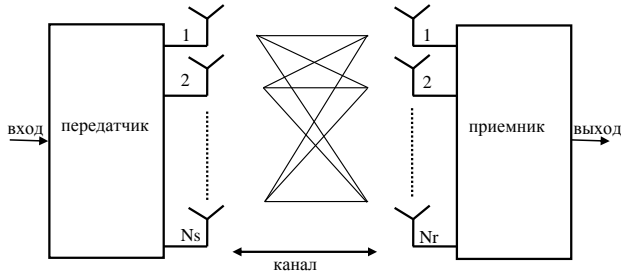


Рисунок 1 – Система MIMO с N_s передающими антеннами и N_r приемными антеннами

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{z}, \quad (1)$$

где: $\mathbf{s} = [s_1, \dots, s_{N_s}]^T$, $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_{N_r}]^T$, $\mathbf{r} = [r_1, \dots, r_{N_r}]^T$ и

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} h_{1,1} & \dots & h_{1,N_s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_r,1} & \dots & h_{N_r,N_s} \end{pmatrix} - \text{матрица каналов.}$$

В данной работе были определены следующие задачи исследования:

- Увеличение пропускной способности канала в условиях прямой видимости MIMO.
- Расширение зоны покрытия для доступа к слепым зонам в среде распространения MIMO вне прямой видимости.
- Оценка матрицы каналов для восстановления переданных сигналов.
- Локализация абонентов в беспроводных сетях.

Во **второй главе** предлагается использовать пассивные ретрансляторы для модификации сред связи MIMO, чтобы обеспечить увеличение пропускной способности канала и качества связи. Предлагаемый пассивный ретранслятор состоит из двух частей, как показано на рисунке 2. Оба представляют собой параболические отражатели с антеннами в фокусе. Первая часть направлена на базовую станцию в прямой видимости, а вторая часть направлена на абонентов. Первая часть антенны соединена со второй частью антенны гибким кабелем. Длина кабеля выбирается в соответствии с требованиями к размещению первой и второй частей.

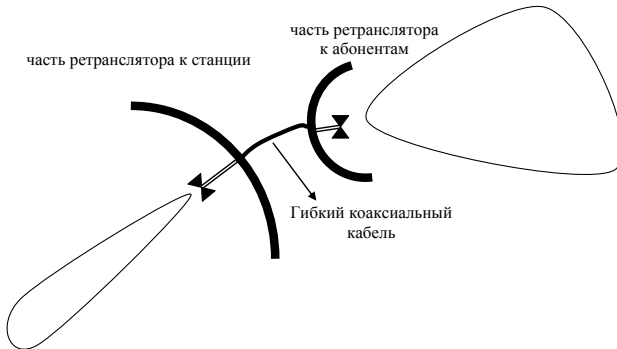


Рисунок 2 – Пассивный ретранслятор, состоящий из двух параболических антенн соединенных гибким кабелем

Предлагаемый пассивный ретранслятор имеет следующие преимущества:

- не применяются активные радиоэлектронные компоненты или фазовращатели, ретранслятор полностью пассивный. Части ретранслятора направляются вручную в требуемую область;
- выбор размера параболического рефлектора позволяет задавать ширину луча;
- возможность использования разных поляризаций для двух частей ретранслятора обеспечивает предотвращение интерференции между прямой волной и волной от пассивного ретранслятора. При одинаковых поляризациях, если две волны не совпадают по фазе, может уменьшиться амплитуда поля. Кроме того, размещение рядом двух ретрансляторов с ортогональной поляризацией позволяет удвоить количество независимых каналов связи ММО.

Диаграмма направленности параболического рефлектора определяется его размером и полем облучающей антенны, расположенной в фокусе параболы. Могут использоваться различные облучающие антенны, например: дипольный облучатель Герца, волноводный облучатель и рупорный облучатель. Поле дальней зоны параболического отражателя можно аппроксимировать полем излучения круглой апертуры:

$$E(\varphi) = G \frac{J_1(\pi D \sin \varphi / \lambda)}{\pi D \sin \varphi} \frac{2\lambda}{r} \exp(ikr) \quad (2)$$

где J_1 – функция Бесселя первого порядка; D – диаметр апертуры параболической антенны ретранслятора на стороне абонента; r – расстояние между ретранслятором и местоположением абонента; k – волновое число; λ

– длина волны; G – коэффициент усиления ретранслятора; φ – угол между направлением на абонента и основным лучом ретранслятора.

Поле системы ретрансляторов с учетом излучения базовой станции можно записать в виде:

$$U(\mathbf{r}) = \sum_m \sum_n S_m \frac{\exp(ik|\mathbf{R}_n - \mathbf{B}_m|)}{4\pi|\mathbf{R}_n - \mathbf{B}_m|} \frac{\exp(ik|\mathbf{R}_n - \mathbf{r}|)}{4\pi|\mathbf{R}_n - \mathbf{r}|} E(\varphi(\mathbf{R}_n - \mathbf{B}_m, \mathbf{g}_n)) E'(\varphi(\mathbf{r} - \mathbf{R}_n, \mathbf{g}'_n)), \quad (3)$$

где \mathbf{R}_n – координаты n -го ретранслятора; \mathbf{B}_m – координаты m -й антенне базовой станции; $\varphi(\mathbf{r}, \mathbf{a}) = \arccos\left(\frac{\mathbf{r}\mathbf{a}}{|\mathbf{r}||\mathbf{a}|}\right)$ – угол для учета диаграммы направленности ретранслятора; $E(\varphi)$ – диаграмма направленности части ретранслятора направленной на базовую станцию; $E'(\varphi)$ – диаграмма направленности части ретранслятора направленной на абонентов; \mathbf{g}_n – вектор направления части ретранслятора на базовую станцию. \mathbf{g}'_n – вектор направления части ретранслятора на абонентов; \mathbf{r} – координаты точки наблюдения в области размещения абонентов; S_m – комплексная амплитуда сигнала в m -й антенне базовой станции; k – волновое число.

Чтобы вычислить сигналы базовой станции, для облучения только одного конкретного абонента, находящегося в заданных координатах, применим метод обратного распространения волн. Будем считать, что в точке размещения абонента, в точке \mathbf{u} находится точечный источник, поле которого рассмотрим в обратном времени:

$$S'(\mathbf{B}_m) = \sum_n \frac{\exp(-ik|\mathbf{R}_n - \mathbf{B}_m|)}{4\pi|\mathbf{R}_n - \mathbf{B}_m|} \frac{\exp(-ik|\mathbf{R}_n - \mathbf{u}|)}{4\pi|\mathbf{R}_n - \mathbf{u}|} E(\varphi(\mathbf{R}_n - \mathbf{B}_m, \mathbf{g}_n)) E'(\varphi(\mathbf{u} - \mathbf{R}_n, \mathbf{g}'_n)), \quad (4)$$

где $S'(\mathbf{B}_m)$ – комплексная амплитуда поля в m -й антенне базовой станции.

В условиях прямой видимости с небольшим количеством рассеивателей базовая станция может установить только один канал связи с абонентами на большом расстоянии. Рассмотрим случай, в котором предложенный пассивный ретранслятор используется для создания многолучевого распространения, как показано на рисунке 3.

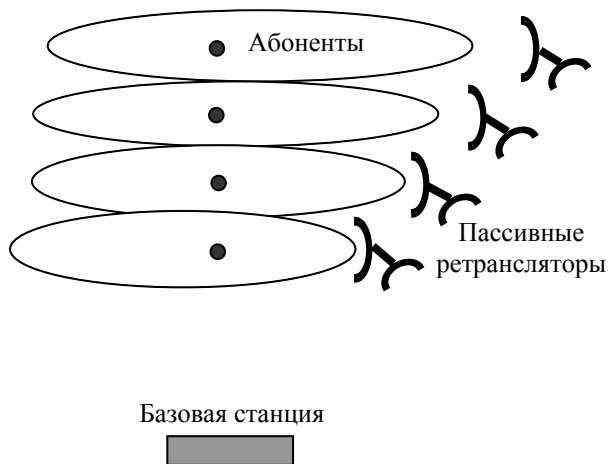


Рисунок 3 – Сценарий связи без препятствий с применением пассивных ретрансляторов

Было проведено численное моделирование для сценария, показанного на рисунке 3. Моделируемая область составляет 1200 м^2 , длина волны 3 м. Количество ретрансляторов $M = 4$. Количество антенн в базовой станции $N = 16$. Таблица 1 включает сравнение, основанное на метрике числа обусловленности $K(H)$ и метрике ранга матрицы, до и после добавления ретрансляторов.

Таблица 1 – Сравнение параметров матрицы каналов до и после добавления ретрансляторов в среду связи

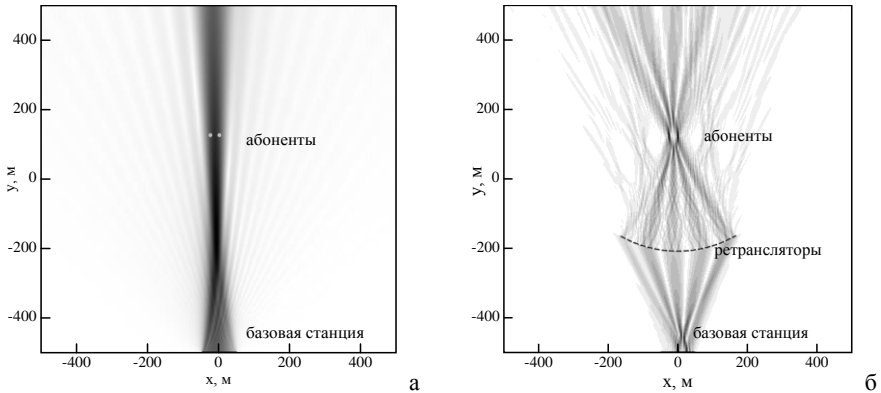
Сценарий	Ранг матрицы	Собственные значения				Число обусловленности $K(H)$
		λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	
Без ретрансляторов	не полный ранг	1	$2.6 \cdot 10^{-4}$	≈ 0	≈ 0	$\rightarrow \infty$
С ретрансляторами	полный ранг	1	0.242	0.017	0.037	7.6

Видно, что без пассивных ретрансляторов число обусловленности стремится к бесконечности, а матрица имеет не полный ранг. Матрица каналов (полученная в результате прямого пути и пути через ретрансляторы) стала более ортогональной с полным рангом и уменьшенным числом обусловленности после добавления ретрансляторов. Следовательно, система обеспечивает передачу по всем каналам MIMO.

Предлагается применить пассивные ретрансляторы для улучшения углового разрешения базовой станции, поскольку, по сути, они обеспечивают увеличение размера её апертуры. Увеличение размера апертуры позволяет базовой станции различать абонентов, находящихся пространственно близко друг к другу (или антенны в одной антенной решетке) по следующей формуле:

$$\Delta \approx \frac{d\lambda}{B}, \quad (5)$$

где, λ – длина волны; d – расстояние от базовой станции до абонентов, а B – размер апертуры базовой станции; Δ – минимальное расстояние между абонентами, на котором они различимы. Предлагаемый подход был продемонстрирован численным моделированием. Моделируемая область составляет 1 км^2 ; частота сигналов $f = 50 \text{ МГц}$; размер апертуры базовой станции равен 100 м , а количество антенн в базовой станции равно $N = 51$. Выражение (5) показывает, что при больших дальностях базовая станция не может достичь требуемого разрешения, и поддерживает только один канал связи, как показано на рисунке 4а. После добавления ретрансляторов размер апертуры базовой станции увеличивается. В результате, базовая станция может установить пространственный канал с каждым абонентом, как показано на рисунке 4б.

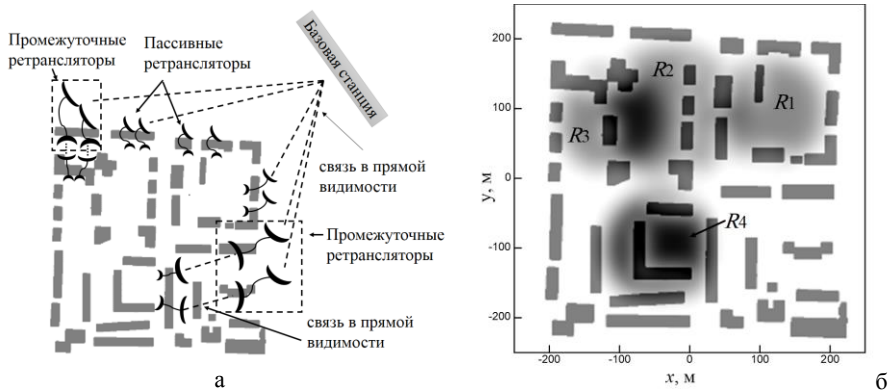


а - связь в пределах прямой видимости без ретрансляторов, б - увеличение углового разрешения с использованием пассивных ретрансляторов

Рисунок 4 – Моделирование поля и угловое разрешение

В городе из-за высокой и плотной застройки или естественных препятствий радиоволны от базовых станций могут блокироваться, что приводит к появлению слепых зон, в которых снижается качество связи. Предлагаются расширить зону покрытия путем размещения ретрансляторов в

местах, где они могут принимать сигналы от базовой станции и пересылать эти сигналы абонентам с учетом явлений отражения, преломления и дифракции. Ретрансляторы можно также использовать в качестве промежуточного звена между базовой станцией и другими ретрансляторами для максимального расширения зоны покрытия. Местоположения и направления ретрансляторов оптимизируются с использованием алгоритма, основанного на неотрицательном алгоритме наименьших квадратов (NNLS). В предложенном алгоритме на первом этапе рассматривались все возможные направления и координаты, в которых могут быть размещены ретрансляторы в пространстве. Далее избыточные ретрансляторы убирались с целью достижения заданного покрытия при наименьшем возможном количестве ретрансляторов. В качестве входных данных для предлагаемого алгоритма используются статистическое пространственное распределение абонентов и пространственное распределение интенсивности поля для каждого возможного ретранслятора в местах расположения абонентов. На выходе алгоритм дает весовой вклад каждого ретранслятора для покрытия зоны связи в соответствии со статистическим распределением абонентов. Используя определенный порог, можно удалить ретрансляторы, которые дают наименьший вклад. Рассмотрена часть города Томск (Россия) для анализа сценария связи вне прямой видимости, как показано на рисунке 5а. Статистическое пространственное распределение абонентов D показано на рисунке 5б. Количество возможных положений абонентов $M=36248$. Общее количество вариантов (местоположения и направления ретрансляторов) составляет $N=125$. Для каждого местоположения и направления вычисляется поле ретранслятора методом FDTD. В качестве сигнала рассматривался короткий биполярный импульс с полосой частот до 100 МГц.



а - Схема размещения ретрансляторов для связи вне прямой видимости,
 б - Пространственное распределение вероятности наличия абонентов
 Рисунок 5 – Сценарий связи вне прямой видимости

В данном примере вклад каждого варианта в охват абонентов считается приемлемым, если он составляет не менее 15% от максимального. После устранения ретрансляторов с малым весом из 125 вариантов осталось 15 вариантов. Зона покрытия, полученная от этих 15 ретрансляторов, показана на рисунке 6. Видно, что заданные области размещения абонентов охвачены.

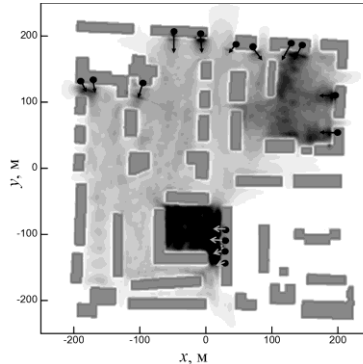


Рисунок 6 – Результат применения алгоритма NNLS: результирующая зона покрытия – суммарная интенсивность поля

Пассивные ретрансляторы могут помочь в локализации абонентов, используя преимущества их размещения в коммуникационной среде. В предлагаемом методе коммуникационная область разбивается на сетку (как показано на рисунке 7). Каждое место в этой сетке имеет уникальное поле интерференции, создаваемое ретрансляторами.

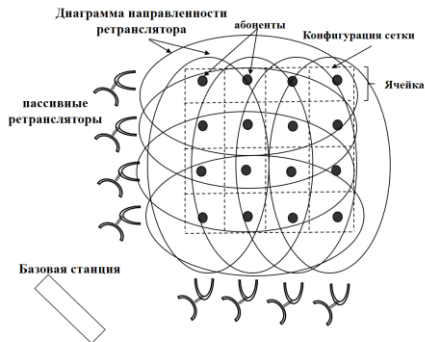


Рисунок 7 – Конфигурация сетки с использованием пассивных ретрансляторов для локализации абонентов

Из-за уникальной интерференции поля каждое местоположение создает уникальную сигнатуру поля на базовой станции, когда абонент в этом местоположении передает сигналы. Сигнатура поля, соответствующая

центру каждой ячейки сетки, используется как уникальный набор сигналов (УНС) для локализации абонентов в этой ячейке, и для всех ячеек строится банк согласованных фильтров, соответствующих всем УНС. Нормируя фазу сохраненных сигналов УНС на первую антенну в базовой станции, а амплитуду на антенну с максимальной амплитудой, для локализации абонентов используется только пространственная когерентность, и нет необходимости во временной синхронизации между базой станцией и абонентами. Для повышения точности и однозначности локализации предлагается увеличить количество различных частот.

Сигналы от абонента, находящегося в ячейке с координатой $\mathbf{u} = (x, y)$, распространяются через ретрансляторы, расположенные в $\mathbf{R}_m = (x_m, y_m), 1 \leq m \leq M$, и попадают на однородную приёмную линейную решетку с N антеннами, расположенными в точках $\mathbf{B}_n = (x_n, y_n), 1 \leq n \leq N$. Сигнатура поля, сгенерированная в n -й антенне базовой станции, может быть выражена как:

$$A_n(\mathbf{u}, f_i) = \sum_{m=1}^M \frac{\exp(ik_i(|\mathbf{u} - \mathbf{R}_m| + |\mathbf{R}_m - \mathbf{B}_n|))}{|\mathbf{u} - \mathbf{R}_m| \cdot |\mathbf{R}_m - \mathbf{B}_n|} \cdot D_m''(\mathbf{u}) \cdot D_m'(\mathbf{B}_n)$$

$$D_m''(\mathbf{u}) = E_m \left[\arccos \left(\frac{(\mathbf{u} - \mathbf{R}_m) \cdot \mathbf{v}_m}{|\mathbf{u} - \mathbf{R}_m|} \right) \right], \quad (6)$$

$$D_m'(\mathbf{B}_n) = E_m \left[\arccos \left(\frac{(\mathbf{B}_n - \mathbf{R}_m) \cdot \mathbf{V}_m}{|\mathbf{B}_n - \mathbf{R}_m|} \right) \right]$$

где $|\mathbf{E} - \mathbf{F}| = \sqrt{(x_E - x_F)^2 + (y_E - y_F)^2}$; $D_m''(\mathbf{u})$ – диаграмма направленности второй части ретранслятора, которая охватывает абонентов; $D_m'(\mathbf{u})$ – диаграмма направленности первой части, имеющей прямую связь с базовой станцией; \mathbf{v}_m – вектор направления части ретранслятора на абонентов; \mathbf{V}_m – вектор направления части ретранслятора на базовую станцию.

Поскольку центр каждой ячейки имеет разные координаты $u_l = (x_l, y_l), 1 \leq l \leq L$, с каждой ячейкой с помощью уравнения (6) связывается УНС – уникальный набор сигналов $\{A_n\}$ ($1 \leq n \leq N$), который хранится в базовой станции, для дальнейшего сравнения с сигналами абонентов.

Путём сравнения сигналов от абонента и всеми сигналами в УНС можно локализовать абонента, определив, в какой ячейке сетки находится абонент. При поступлении на базовую станцию сигнала от абонента с координатой $\mathbf{u}_0 = (x_0, y_0)$, сформированное поле сигнатуры нормируется по фазе на первую антенну, а по амплитуде на антенну с максимальной

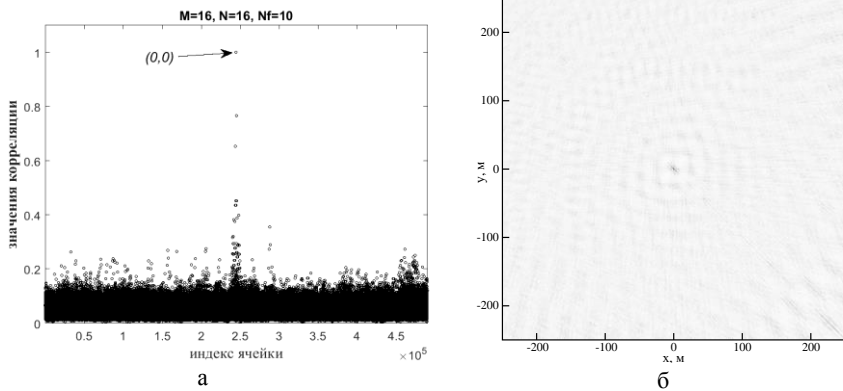
амплитудой и выполняется корреляционная обработка со всеми сохраненными УНС. Результат корреляционной обработки определяется как:

$$p(\mathbf{u}_l) = \sum_{i=1}^{Nf} \left| \sum_n A_n(\mathbf{u}_0, f_i) \cdot A_n^*(\mathbf{u}_l, f_i) \right|^2 \quad (7)$$

Максимальное значение корреляции дает ячейка, в которой находится абонент. При отсутствии синхронизации сигналы в (7) суммируются по интенсивности как некогерентные сигналы.

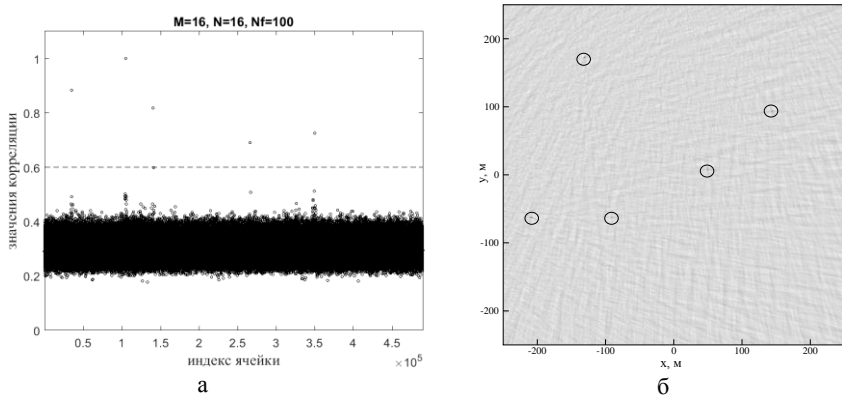
Для демонстрации концепции предлагаемого метода было проведено численное моделирование с учетом сценария, показанного на рисунке 7. Моделируемая область составляет $500\text{ м} \times 500\text{ м}$, частота радиоволн $f_0 = 100\text{ МГц}$. Базовая станция содержит $N = 16$ антенн с межэлементным расстоянием, равным λ . Количество ретрансляторов равно $M = 16$ (каждая сторона содержит $M/2$ равномерно распределенных ретрансляторов). Область разбита на $L = 700 \times 700$ ячеек (то есть ширина каждой ячейки и расстояние между центрами каждой двух соседних ячеек равно $Wc \approx \lambda/4$).

На первом этапе сигналы УНС, соответствующие ячейкам сетки, нормализовались и сохранялись. Для абонента находящегося в ячейке (0,0) была нормализована сигнатура сформированного поля и проведена корреляционная обработка со всеми сохраненными УНС. При использовании десяти частот ($f_i = i\Delta f + f_0$, $i = 0 \dots 9$, $\Delta f = 1\text{ МГц}$) результаты корреляции показаны на рисунке 8а, а распределение значений корреляции по сетке показано на рисунке 8б. Видно, что в соответствующей ячейке есть максимум, и локализация достигнута правильно.



а – результаты корреляции, б – распределение значений корреляции по сетке
Рисунок 8 – Результаты с использованием десяти частот и $M=16$ ретрансляторов

Предлагаемый метод также может локализовать несколько абонентов одновременно. Однако в случае нескольких абонентов для создания сигналов УНС требуется больше частот, чтобы повысить уникальность этих сигналов. Для системы, показанной на рисунке 7, и для $f_0 = 100$ МГц, $M = 16$, $N = 16$ и 700×700 ячеек был проведен полный перебор, и установлено, что для локализации пяти абонентов одновременно, используя пороговое значение $T = 0,6$ для нормализованных значений корреляции требуется 100 частот с шагом, равным 1 МГц. Результаты корреляции представлены на рисунке 9.



а – результаты корреляции, б – распределение значений корреляции по сетке

Рисунок 9 – Результаты корреляции для локализации пяти абонентов одновременно с $M = 16$ и $N_f = 100$

В **третьей главе** представлено практическое применение локализации источника на основе сигнатуры поля, в дополнение к оценке канала в ММО-связи и расширению покрытия на основе пассивных ретрансляторов.

Представлена общая методология проектирования аналоговой приемной части в системе ММО в соответствии с требованиями к производительности, указанными в стандарте LTE (Long Term Evaluation). На рисунке 10 показана общая конфигурация приемной аналоговой части на основе конфигурации Zero If. На рисунке 10 ВРФПФ обозначает входной радиочастотный полосовой фильтр; МШУ – маломощный усилитель; РФПФ – радиочастотный полосовой фильтр; РЧУ – радиочастотный усилитель; С – конденсатор; ОГ – опорный генератор; ФНЧ – фильтр нижних частот; УИС – усилители в полосе исходного информационного сигнала; АЦП – Аналого-цифровой преобразователь; РФ – радиочастота.

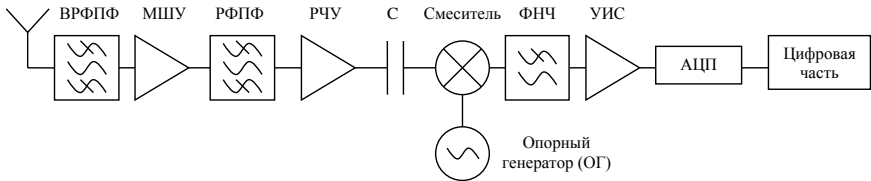


Рисунок 10 – Общая структура Zero-IF приёмника

Минимальные требования, указанные в стандарте LTE для приемной части приведены в таблице 2 с учетом полосы пропускания канала, равной 5 МГц.

Таблица 2 – Минимальные требования стандарта LTE

Стандарт LTE – [2110-2170] МГц, ширина полосы сигнала 5 МГц			
Чувствительность, дБм	-101,5	Динамический диапазон	>77
Уровень соседних каналов, дБм	-52	Подавление помех	-56 @+/-7,5 МГц
Паразитное излучение, дБм/1 МГц	-47	Требования к интермодуляции с двумя помехами (на входе-In).	-52 дБм @+/- 7,5 МГц -52 дБм @+/-17,5 МГц

С помощью аналитического анализа требования, указанные в таблице 2, были преобразованы в характеристики, описывающие приемные блоки, показанные на рисунке 10. В результате элементы приемника были выбраны по результатам аналитического анализа, как показано в таблице 3.

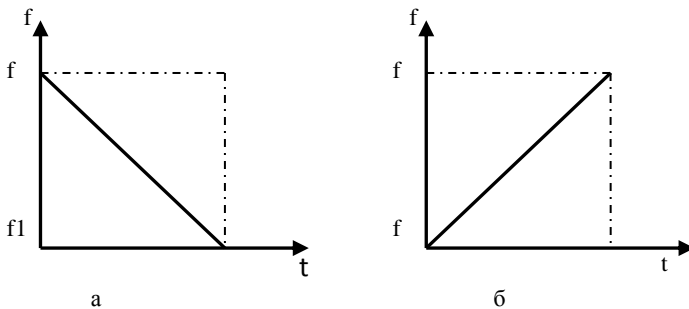
Таблица 3 – Характеристики блоков

	ВРФПФ	МШУ	РФПФ	РЧУ	Смеситель	ФНЧ	УИС
	ПАВ Фильтр	НМС374Е	CL	НМС639ST89	LTC5585	сосредоточенные элементы	операционный усилитель
Усиление, дБ	-2,5	17	-4,6	21,8	2,5	-0,5	36
ИПЗ, дБм	-	18,5	-	13,9	25,7	-	20
NF, дБ	2,5	0,85	4,6	3,5	12,7	0,5	28
ИП2 смеситель, дБм	-	-	-	-	60	-	-

В Таблице 3, NF – коэффициент шума приемника. $ИПЗ$ входная точка пересечения интермодуляции третьего порядка, $ИП2$ входная точка пересечения интермодуляции второго порядка.

Для оценки канала связи ММО использовались пилот-сигналы, известные для передатчика и приемника. Пилот-сигналы передавались ортогональным по времени методом, чтобы предотвратить их интерференцию в приемнике. Канал оценивался в частотной области, для этого с каждой передающей антенны передавался пилот-сигнал, содержащий

все частоты. Пилот-сигналы и сигналы данных передавались последовательно и многократно, поэтому приемнику необходимо определить временную позицию пилот-сигналов и сигналов данных. Кроме того, приемник должен иметь возможность связывать каждый полученный пилот-сигнал с антенной в передатчике, с которой был передан пилот-сигнал. Это необходимо для построения матрицы каналов. Чтобы решить эту проблему, пилот-сигналы строились с использованием сигналов линейной частотной модуляции (ЛЧМ) с определенной конфигурацией, как показано на рисунке 11. Пилот-сигнал, передаваемый с первой передающей антенны, формировался с использованием ЛЧМ с уменьшающейся во времени частотой (Рисунок 11а), в то время как другие пилот-сигналы имели форму ЛЧМ с возрастающей частотой (Рисунок 11б).



а – ЛЧМ с убывающей со временем частотой для построения пилот-сигнала от первой переданной антенны, б – ЛЧМ с нарастающей частотой для построения остальных пилот-сигналов

Рисунок 11 – Линейная частотная модуляция для построения пилот-сигналов

Пилотные сигналы были локализованы с помощью согласованной фильтрации между принятым сигналом и сигналами ЛЧМ (Рисунок 11). Поскольку пилот-сигналы были получены в том же порядке, в котором они были отправлены, а первый пилот-сигнал формировался с использованием уникальной конфигурации, приемник мог определить, какой пилот-сигнал был передан первым, а затем связать каждый пилот-сигнал с соответствующей передающей антенной по порядку их прихода. После определения задержек пилот-сигналов, они извлекаются по отдельности с помощью прямоугольных окон. Затем коэффициенты канала рассчитываются как:

$$\left(\tilde{h}_{m,n}\right)_f = \frac{\tilde{P}_{m,n}(f)}{\tilde{P}_n(f)}, \quad (8)$$

Где, $\tilde{p}'_n(f)$ – спектр переданного пилот-сигнала с n-й антенны, $\tilde{P}_{m,n}(f)$ – спектр пилот-сигнала, переданного с n-й передающей антенны и принятый m-я приемная антенна. После вычисления матрицы каналов, переданные данные могут быть восстановлены как:

$$\tilde{\mathbf{S}} = \mathbf{W} \cdot \tilde{\mathbf{R}}, \quad (9)$$

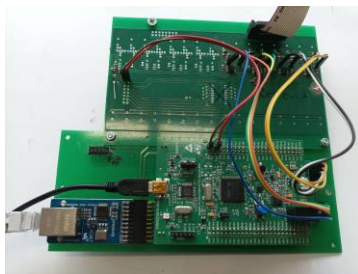
$$\text{где } \mathbf{W} \equiv (\tilde{\mathbf{H}}^H \cdot \tilde{\mathbf{H}} + \alpha \mathbf{I})^{-1} \cdot \tilde{\mathbf{H}}^H; \quad \alpha = \frac{\sum_n \sum_m |(\tilde{\mathbf{H}})_{m,n}|^2}{N \cdot M} \quad \text{и} \quad \tilde{\mathbf{H}}^H = \tilde{\mathbf{H}}^{T*} -$$

Эрмитово-сопряжённая к $\tilde{\mathbf{H}}$. Уравнение (9) представляет Эквалайзер с методом минимальной среднеквадратичной ошибки.

Предложенный способ был проверен экспериментально с использованием ультразвуковой ММО-системы. Передатчик и приемник экспериментальной установки были спроектированы с использованием микроконтроллера STM32F407. В передающей части сигнал с данными и пилот-сигналы формировались микроконтроллером с помощью двух цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) с частотой дискретизации 578 кГц. Генерируемые сигналы подавались на 8 передатчиков через два 16-канальных мультиплексора 74HC4067 и усилители LM837 (из 16 каналов каждого мультиплексора было использовано только 4). В приёмной части не использовались мультиплексоры, а 8 приёмных каналов оцифровывались с помощью многоканального аналого-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллера STM32F407. Частота оцифровки принимаемых сигналов составила 164 кГц. Синхронизация между сигналами излучателей в передатчике достигалась с помощью привязки срабатывания мультиплексоров и цифроаналоговых преобразователей к одному таймеру. Передатчик и приемник показаны на рисунке 12.



а



б

Рисунок 12 – а – Фотография передающего устройства, б – Фотография приемного устройства

Экспериментальная установка показана на рисунке 13а. В передающей и приемной антенных решетках по восемь антенн. Антенны в двух решетках размещены одинаково, как показано на рисунке 13б.



а

б

Рисунок 13 – а – Фотография экспериментальной установки, б – Размещение элементов в передающей и приемной решетках ($d = 80$ мм)

В ходе экспериментальных исследований передающая решетка размещалась на расстоянии 1,25 метра от приемной решетки. Излучающая система работала автономно и в непрерывном цикле передавала пакеты с пилотными сигналами и сигналами данных. Всего рассматривалось 4 различных кода КАМ модуляции. Из 8 передатчиков передатчики №1 и №2 передавали код с фазой 0° , передатчики №3 и №4 передавали код с фазой 90° , передатчики №5 и №6 передавали код с фазой 180° , передатчики №7 и №8 передавали код с фазой 270° . Оцифрованные данные из приемной решетки передавались из микроконтроллера в компьютер через интерфейс Ethernet по протоколу UDP для обработки. Система обеспечила частоту обновления 21 кадр в секунду. На рисунке 14 показан пример восстановленных данных передачи с использованием 50 измерений на расстоянии, равном 1,25 м, между передатчиком и приемником. Статистическое исследование показало, что вероятность ошибки (вероятность ошибочного приема бита или BER — bit error rate) составляет 8,25%. Было проведено 100 измерений.

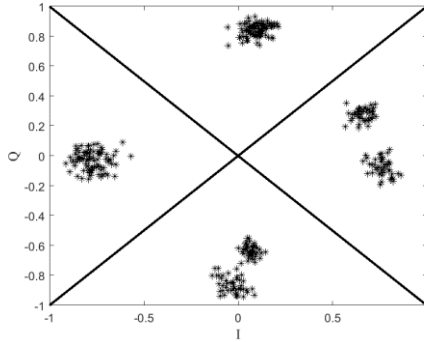


Рисунок 14 – Восстановленные данные в приемнике

Принцип использования сигнатур поля для локализации абонентов был проверен на ультразвуковых частотах (38–43 кГц) с использованием рассеивателей, как показано на рисунке 15.

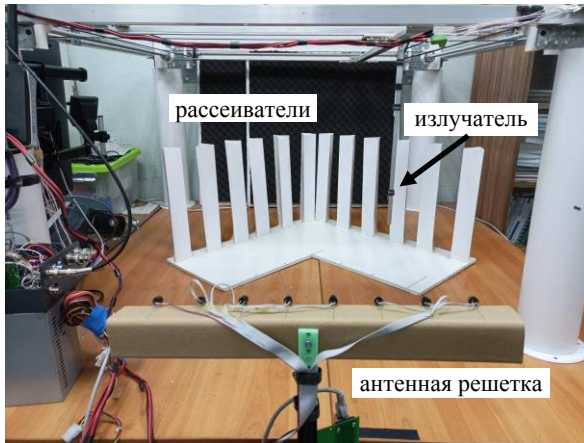
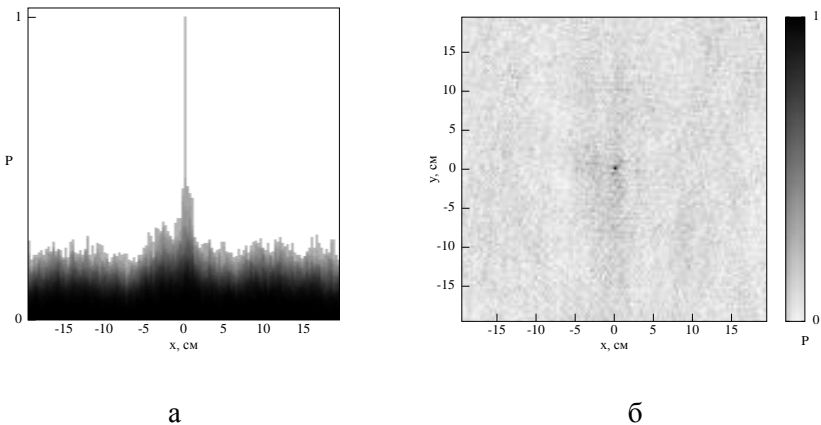


Рисунок 15 – Фотография экспериментальной установки

В ходе эксперимента применялось 12 рассеивателей (по 6 с каждой стороны, равномерно распределенных) и однородная антенная решетка с 8 антеннами и расстоянием между элементами 5 см. Позиционируемый излучатель перемещался двухкоординатным сканером на области размером 40x40 см с шагом 3,125 мм. Область измерений была разбита на 128x128 ячеек. Излучатель был направлен в сторону отражателей. В каждой ячейке излучатель посылал ультразвуковой импульс в сторону отражателей с полосой частот от 38 кГц до 43 кГц. Отраженные сигналы принимались

антенной решеткой. Использовались $N_f=30$ частот для построения уникального набора сигналов (УНС).

Для проверки возможности определения координат источника сигнала было проведено второе измерение сигналов в решетке при различных положениях излучателя. Сигнатуры поля из второго измерения использовались для локализации источника излучения с использованием сигналов УНС из первого измерения. На рисунке 16 показаны результаты корреляции между сигнатурой поля, генерируемой излучателем в ячейке сетки (0,0), и сохраненными сигналами УНС. Результаты показывают, что излучатель был локализован правильно.



а – результаты корреляции между сигналами УНС ячейки (0,0) из второго измерения и всеми сохраненными УНС из первого измерения,

б – распределение результатов корреляции по сетке

Рисунок 16 – Локализация источника сигналов по ранее сохраненным УНС связанных с ячейками

Использование пассивных ретрансляторов для расширения зоны покрытия было проверено экспериментально. Поскольку каждый ретранслятор добавляет только один пространственный канал, в эксперименте перед одной из антенн (5-я антенна) была установлена преграда, чтобы предотвратить прием сигналов, как показано на рисунке 17.

Для обеспечения передачи сигнала использовался ретранслятор, как показано на рисунке 18. Благодаря чему пятая антенна могла принимать сигналы. В результате, удалось оценить матрицу каналов и восстановить данные, как показано на рисунке 19.

Добавление ретрансляторов в среду распространения помогает обеспечить связь за преградами и создать пространственные каналы.

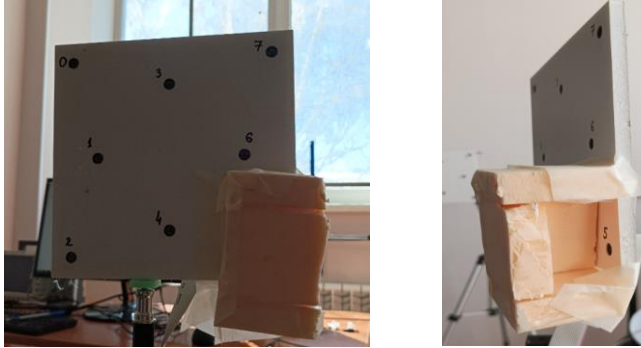


Рисунок 17 – Предотвращение приема сигналов одной антенной в приемнике (5-я антенна)



Рисунок 18 – Использование ретранслятора для обеспечения связи за преградами

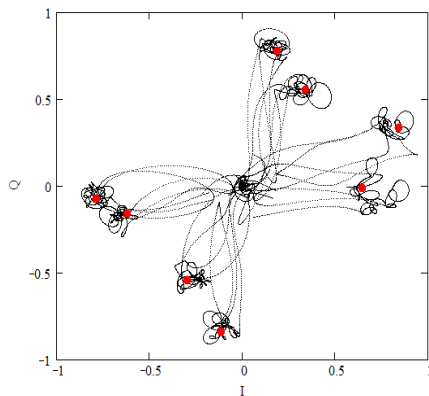


Рисунок 19 – Восстановленные данные после добавления ретранслятора

В **заключении** сформулированы основные научные результаты и выводы, полученные по результатам выполнения диссертационного исследования.

В процессе выполнения диссертационного исследования был проведен обзор литературы по теме исследований и предложены методы модификации сред распространения, оценки канала и локализации абонентов в системах ММО. На основе результатов экспериментов и численного моделирования продемонстрирована применимость предложенных подходов к изменению среды распространения с использованием пассивных ретрансляторов, оценке канала с использованием сигналов линейной частотной модуляции в качестве пилот-сигналов, а также локализации источника волн на основе сигнатур поля.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Sukhanov D. Y. Manipulating LOS and NLOS MIMO Propagation Environments Using Passive Repeaters / D. Y. Sukhanov, **M. Eissa** // Progress In Electromagnetics Research M. – 2021. – Vol. 105. – P. 195–204. – DOI: 10.2528/PIERM21061602. – 0.59 / 0.3 а.л. (*Web of Science*).

2. **Eissa M.** Localization in Multiple-Input Multiple Output Systems Based on Passive Repeaters / M. Eissa, D. Y. Sukhanov // Progress In Electromagnetics Research C. – 2023. – Vol. 128. – P. 49–60. – DOI: 10.2528/PIERC22103102. – 0.7 / 0.35 а.л. (*Scopus*).

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus:

3. **Eissa M.** Enhancing performance in a LOS MIMO communication using a passive repeater / M. Eissa, D. Sukhanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2140 : Actual Problems of Radiophysics International Conference 2021 (APR 2021). Tomsk, Russia, October 20–22, 2021. – Article number 012013. – 5 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2140/1/012013> (access date: 22.06.2023). – DOI: 10.1088/1742-6596/2140/1/012013. – 0.26 / 0.13 а.л.

Публикации в сборниках материалов конференций:

4. **Исса М.** Повышение производительности в системах ММО с помощью пассивных ретрансляторов / М. Исса, Д. Я. Суханов // Актуальные проблемы радиофизики АПР-2021 : сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. Томск, 20–22 октября 2021 г. – Томск, 2021. – С. 93. – 0.08 / 0.04 а.л.

5. **Исса М.** Разработка и анализ системы с множеством излучателей и множеством приёмников для исследовательских целей / М. Исса, Д. Я. Суханов // Доклады Томского государственного университета систем управления и

радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25, № 2. – С. 22–28. – DOI: 10.21293/1818-0442-2022-25-2-22-28. – 0.63 / 0.32 а.л.

6. **Исса М.** Расширение зоны покрытия при связи вне прямой видимости ММО с использованием пассивных ретрансляторов / М. Исса, Д. Я. Суханов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25, № 4. – С. 7–12. – 0.6 / 0.3 а.л.

7. **Исса М.** Формирование луча с помощью пассивных ретрансляторов / М. Исса // Новые информационные технологии в научных исследованиях НИТ-2022 : материалы XXVII Всероссийской научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов. Москва, 07–09 декабря 2022 г. – Рязань, 2022. – С. 143–145. – 0.12 а.л.

8. **Исса М.** Оценка канальной матрицы для ультразвукового ММО в частотной области / М. Исса, Д. Я. Суханов // Телекоммуникационные и вычислительные системы – 2022 : юбилейный сборник трудов Тридцатого Международного научно-технического форума. Москва, 12–15 декабря 2022 г. – Москва, 2022. – С. 218–223. – 0.28 / 0.14 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 7565 от «05» октября 2023 г. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр. 8, тел. 53-15-28, publish.tsu.ru