



www.volsu.ru

# ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В БЕЗОПАСНОСТИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЯХ



DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2024.4.1>

УДК 621.391

ББК 32.811.2

## ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛА СВЯЗИ OFDM-MIMO МАТРИЧНЫМ МЕТОДОМ

**Надежда Николаевна Ермакова**

Старший преподаватель, кафедра телекоммуникационных систем,  
Волгоградский государственный университет  
ermakova.nadezhda@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Иван Федорович Гладков**

Студент, кафедра телекоммуникационных систем,  
Волгоградский государственный университет  
itsm-231\_227876@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Иван Дмитриевич Серёженко**

Студент, кафедра телекоммуникационных систем,  
Волгоградский государственный университет  
seryozhenkoid@volsu.ru  
просп. Университетский, 100, 400062 г. Волгоград, Российская Федерация

**Аннотация.** В процессе развития сетей передачи данных постоянно увеличиваются требования к скорости передачи информации и качеству предоставляемых сервисов. Данный механизм можно наблюдать и для сетей передачи данных, где средой передачи является радиоканал. Из-за этого в значительной степени усложняются сигналы, которые используют для передачи информации. Одним из перспективных видов является ортогональное частотное мультиплексирование OFDM. В современных системах связи, например в сотовых системах связи, высокоскоростных локальных вычислительных сетях и др., существует необходимость повышения пропускной способности. Пропускная способность

может быть увеличена путем расширения полосы частот или повышения излучаемой мощности. Пропускная способность может быть увеличена путем расширения полосы частот или повышения излучаемой мощности. Тем не менее применимость этих методов ограничена из-за требований биологической защиты, ограниченной мощности источника питания (в мобильных устройствах) и электромагнитной совместимости. Поэтому если в системах связи эти подходы не обеспечивают необходимую скорость передачи данных, то эффективным может оказаться применение адаптивных антенных решеток со слабо коррелированными антенными элементами. Системы связи с такими антеннами получили название систем MIMO. Проведен обзор теоретических основ матричных методов обработки сигналов, включая сингулярное разложение (SVD) и автокорреляционный анализ. Разработана имитационная модель в MATLAB, которая позволяет оценивать влияние параметров канала на точность передачи данных. Анализ произведен с использованием нормализованной среднеквадратичной ошибки (NMSE) и вероятности битовой ошибки (BER). Выявлена зависимость помехоустойчивости от уровня шума и других характеристик канала, что подтверждает эффективность применения технологий OFDM-MIMO для высокоскоростной передачи данных.

**Ключевые слова:** канал связи, OFDM, MIMO, Simulink, модуляция, сигнал, шум, BER, SNR, зависимость вероятности.

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, или ортогональное частотное разделение каналов) представляет собой метод модуляции, широко используемый в современных системах беспроводной связи и передачи данных, включая Wi-Fi, LTE и 5G. Основная идея OFDM заключается в разделении потока данных на несколько подканалов, каждый из которых использует узкополосную несущую частоту, что позволяет значительно повысить устойчивость системы к межсимвольным помехам и искажениям при передаче через многолучевой канал [5].

Основной целью анализа является оценка устойчивости OFDM-системы к изменениям параметров канала, таких как отношение сигнал / шум (SNR), коэффициент затухания и число рассеивателей, задержки сигнала и многолучевые эффекты. Исследование работоспособности OFDM позволяет ответить на следующие вопросы:

- как изменятся показатели системы (например, BER и SNR) при изменении уровня шума?
- как многолучевое распространение и затухание сигнала влияет на качество связи?
- какие параметры системы можно адаптировать для повышения ее производительности?

Для оценивания влияния параметров канала на точность передачи данных создается имитационная модель канала OFDM-MIMO изображенная на рисунке 1, позволяющая управлять параметрами канала и фиксировать изменения в показателях качества связи в программной среде Matlab Simulink. Система MIMO-OFDM использует комбинацию технологий MIMO и OFDM для повышения пропускной способности и устойчивости к помехам в беспроводных системах [1–2].

На рисунке система MIMO-OFDM представлена как серия блоков, связанных линиями передачи данных.

Измерение параметров канала OFDM матричным методом осуществляется следующим образом: в процессе передачи данных в системе OFDM-MIMO осуществляется формирование матрицы, которая представляет собой комбинацию сигналов от различных антенн. Эта матрица содержит информацию о состоянии канала, включая его неоднородности и возможные ошибки. Для построения матрицы в прекодер используются параметры, такие как количество поднесущих и антенн. В системе используется 64 поднесущих и 4 антенны, размер матрицы будет  $64 \times 4$ .

Код MATLAB для построения такой матрицы выглядит следующим образом:

$N = 64$ , % количество поднесущих;

$M = 4$ , % количество антенн;

$H = \text{randn}(N, M)$ , % случайная матрица канала.

В данном коде создается случайная матрица  $H$ , которая будет использоваться для моделирования канала. Каждая строка матрицы соответствует поднесущей, а каждый столбец – антенне. Такой подход позволяет учитывать влияние каждой антенны на каждую поднесущую.

Сингулярное разложение позволяет выделить основные компоненты канала, что упрощает анализ и обработку сигналов [4]. При применении SVD к матрице канала  $H$  мы получаем три матрицы:  $U$ ,  $\Sigma$  и  $V$ , где  $U$  и  $V$  содержат ортогональные векторы, а  $\Sigma$  – диагональную матрицу с сингулярными числами.

После выполнения этого кода можно получить сингулярные числа, которые представляют собой величины, отражающие вклад каждой антенны в общую передачу данных. Эти значения важны для оценки качества канала и последующей обработки сигналов.

Передача данных через OFDM-канал включает несколько этапов, таких как модуляция, добавление шума и передача сигнала. На этапе модуляции данные преобразуются в формат, пригодный для передачи, например, с использованием QPSK или 16-QAM. После модуляции сигнал проходит через канал, где на него могут влиять различные искажения, такие как шум и интерференция.

Использование сингулярного разложения (SVD) на стороне приемника в системе связи может помочь корректировать искажения, вызванные каналом. SVD позволяет декомпозировать матрицу канала и преобразовать сигнал таким образом, чтобы минимизировать влияние шума и искажений, что в итоге улучшает качество восстановленного сигнала [3]. Этот метод применяется особенно в системах с множеством антенн, таких как MIMO, где нужно разделять потоки данных, проходящие через разные пути.

Создадим случайную матрицу канала, выполним SVD разложение и применим его для компенсации искажений. После этого возможно произвести оценку эффективности восстановления с помощью NMSE.

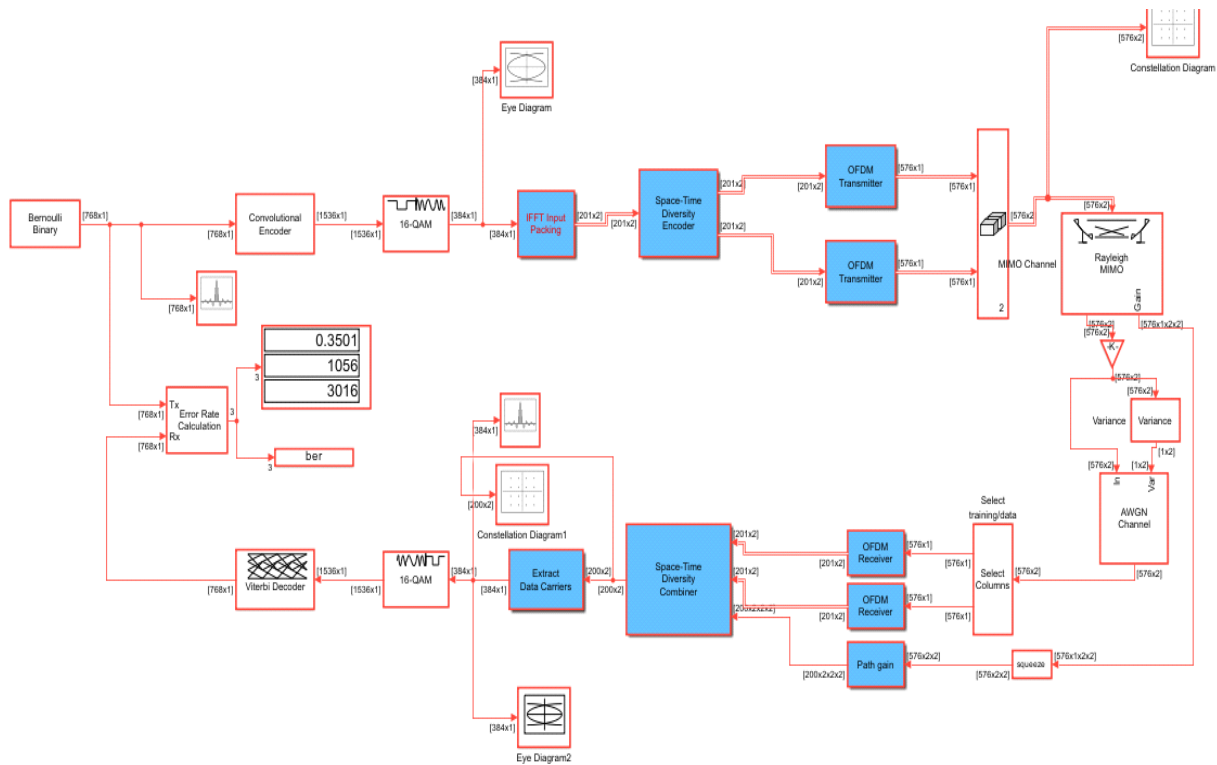


Рис. 1. Имитационная модель канала связи OFDM-MIMO

Вычисляется NMSE между оригинальным и восстановленным сигналами, чтобы оценить эффективность SVD-коррекции.

После демодуляции получаем данные, которые необходимо сравнить с исходными для определения уровня ошибок. Для визуализации результатов можно использовать глазковые диаграммы, которые показывают, как сигнал изменяется во времени и какова его форма на выходе приемника.

На рисунке 2 отражен полученный график зависимости. Значение NMSE между оригинальными и восстановленными OFDM-

символами: 0.0282. Значение 0.0282 говорит о том, что метод, использованный для компенсации искажений канала (в данном случае SVD), эффективно справился с задачей восстановления сигнала, и восстановленный сигнал с большой точностью соответствует исходному.

Для проведения исследования влияния шума на точность восстановления сигнала будут использованы различные значения уровня шума. Шумовые уровни будут варьироваться в диапазоне от 0.1 до 1.0 в шаге 0.1 дБ. Полученные результаты изображены на рисунках 3 и 4.

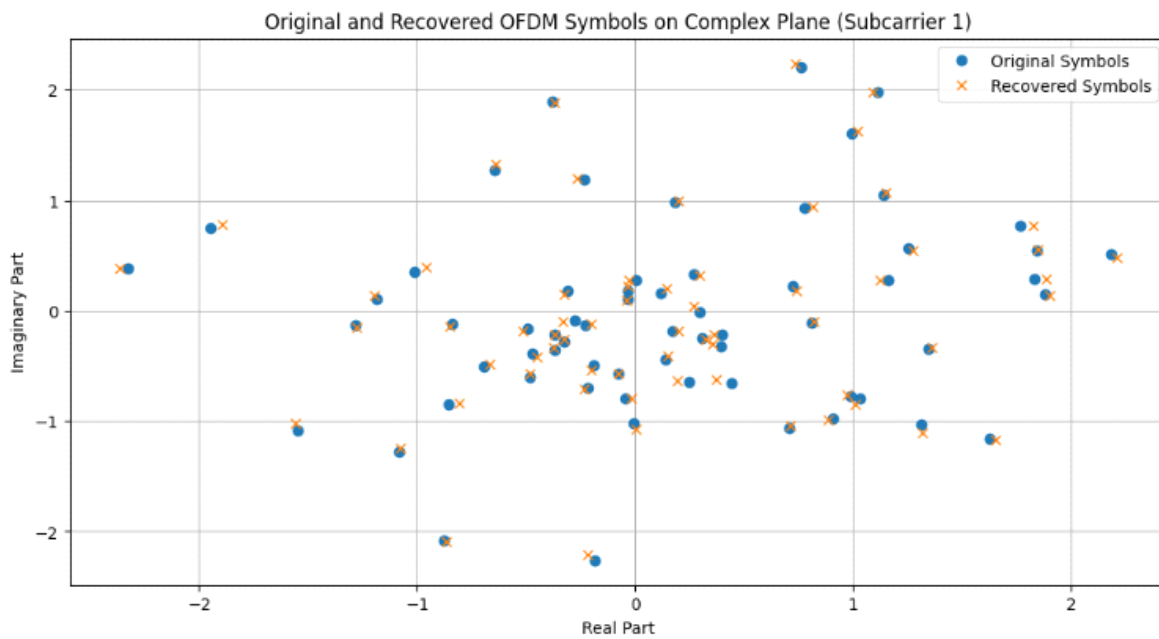


Рис. 2. NMSE между оригинальными и восстановленными OFDM-символами

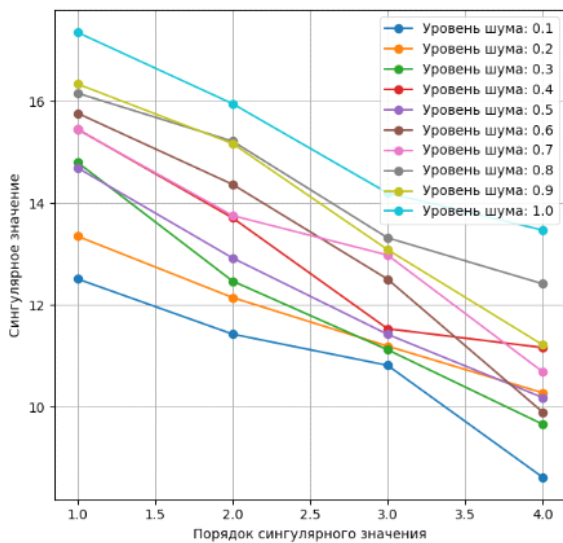


Рис. 3. Сингулярные значения при разных уровнях шума

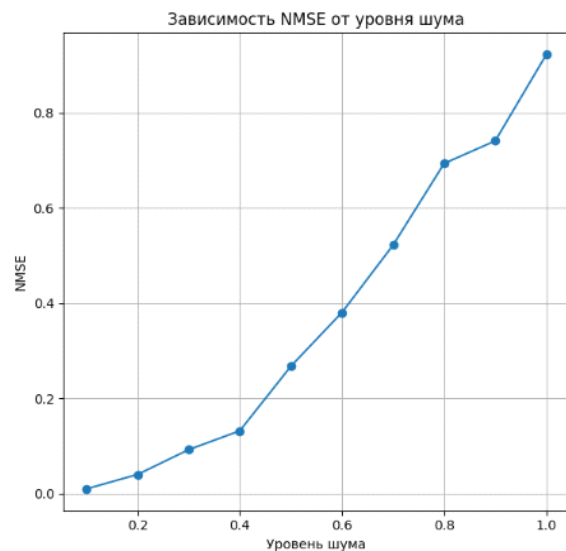


Рис. 4. Зависимость NMSE от уровня шума

На графике сингулярных значений видно, что при низких уровнях шума основные сингулярные значения остаются стабильными и высокими, что свидетельствует о том, что большая часть сигнала сохраняется. При увеличении уровня шума значения резко снижаются, указывая на потерю значимых компонент в переданном сигнале.

На графике NMSE видно, что с увеличением уровня шума NMSE также возрастает. Шум увеличивает отклонение восстановленного сигнала от оригинального.

При низких уровнях шума (например, 0.1) NMSE также низкий – 0.0103. Это означает, что восстановленный сигнал почти совпадает с исходным. При уровне шума 0.6, NMSE составляет 0.3809, а при шуме 1.0 – уже 0.9228. Это свидетельствует о том, что при высоких уровнях шума система теряет значимую информацию, и восстановление сигнала становится менее точным.

Результаты показывают, что для поддержания высокой точности передачи сигнала уровень шума должен оставаться ниже 0.5. При уровне шума выше 0.6–0.7 качество передачи заметно падает, что может быть критично для систем с высокими требованиями к надежности.

График зависимости BER от SNR изображенный на рисунке 5 показывает, что с увеличением SNR значение BER уменьшается. При низких значениях SNR (например, 0 дБ) BER достаточно высок, что указывает на то, что много ошибок в передаче. Однако с рос-

том SNR (например, до 30 дБ и выше) BER снижается до очень низких значений, что говорит о высокой надежности передачи при хорошем уровне сигнала.

Зависимость BER от SNR показывает, что увеличение SNR значительно улучшает качество передачи данных, снижая вероятность ошибок. Это имеет важное значение при проектировании систем связи, где необходимо оптимизировать уровень сигнала для достижения приемлемого уровня BER.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голиков, А. М. Исследование систем мобильной связи с технологией OFDM-MIMO : учебно-метод. пособие / А. М. Голиков. – Томск : ТУСУР, 2019. – 27 с.
2. Исследование модели канала связи MIMO на основе открытого пакета моделирования / А. А. Калачиков [и др.] // Вестник СибГУТИ. – 2021. – № 4 (56). – С. 43–55.
3. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – М. : Вильямс, 2003. – 1104 с.
4. Шахнович, И. В. Современные технологии беспроводной связи / И. В. Шахнович. – М. : Техносфера, 2006. – 288 с.
5. OFDM-модуляция // Nag.ru : офиц. сайт. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: <https://nag.ru/material/30600>. – Загл. с экрана.

### REFERENCES

1. Golikov A.M. *Issledovanie sistem mobil'noj svyazi c tehnologiej OFDM-MIMO: uchebno-metod.*

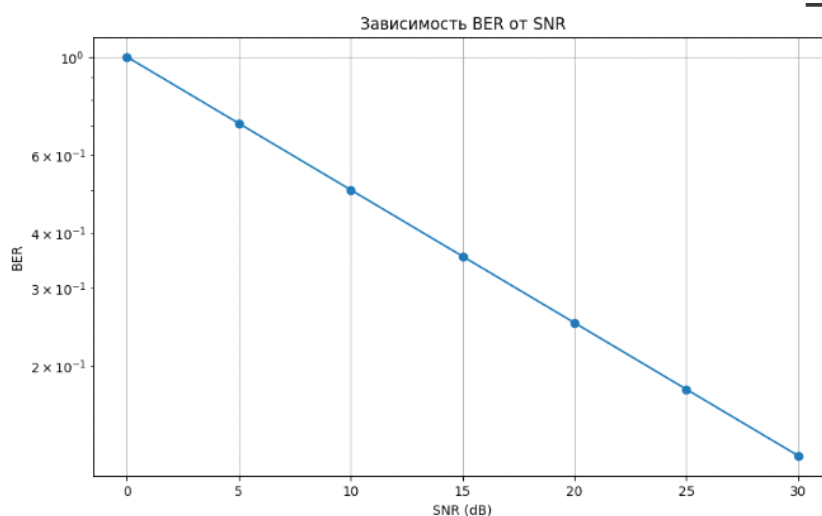


Рис. 5. Зависимость BER от SNR

*posobie po laboratornoj rabote* [Research of Mobile Communication Systems with OFDM-MIMO Technology: Manual for Laboratory Work]. Tomsk, TUSUR Publ., 2019. 27 p.

2. Kalachikov A.A., Bezgodkin R.O., Petrov I.A., Vinnikov A.A. *Issledovanie modeli kanala svjazi MIMO na osnove otkrytogo paketa modelirovaniya* [Investigation of the MIMO Communication Channel Model Based on the Open Modelling Package]. *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibGUTI], 2021, vol. 4 (56), pp. 43-55.

3. Sklyar B. *Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* [Digital Communication. Theoretical Foundations and Practical Application]. Moscow, Vil'jams Publ., 2003. 1104 p.

4. Shakhnovich I.V. *Sovremennye tehnologii besprovodnoj svjazi* [Modern Wireless Communication Technologies]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2006. 288 p.

5. OFDM-moduljacija [OFDM-Modulation]. *Nag.ru: ofitc. sait* [Nag.ru. Official Site]. URL: <https://nag.ru/material/30600>

## ESTIMATION OF PARAMETERS OF THE OFDM-MIMO COMMUNICATION CHANNEL USING THE MATRIX METHOD

**Nadezhda N. Ermakova**

Senior Lecturer, Department of Telecommunications Systems,  
Volgograd State University  
[ermakova.nadezhda@volsu.ru](mailto:ermakova.nadezhda@volsu.ru)  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Ivan F. Gladkov**

Student, Department of Telecommunications Systems,  
Volgograd State University  
[itsm-231\\_227876@volsu.ru](mailto:itsm-231_227876@volsu.ru)  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Ivan D. Serezhenko**

Student, Department of Telecommunications Systems,  
Volgograd State University  
[seryozhenkoid@volsu.ru](mailto:seryozhenkoid@volsu.ru)  
Prosp. Universitetsky, 100, 400062 Volgograd, Russian Federation

**Abstract.** In the process of developing data transmission networks, the requirements for the speed of information transmission and the quality of services provided are constantly increasing. This mechanism can also be observed for data transmission networks, where the transmission medium is a radio channel. Because of this, the signals that are used to transmit information are greatly complicated. One of the promising types is orthogonal frequency multiplexing OFDM. In modern communication systems, for example, in cellular communication systems, high-speed local area networks, etc., there is a need to increase bandwidth. The bandwidth can be increased by extending the frequency band or increasing the radiated power. The theoretical foundations of matrix signal processing methods, including singular value decomposition (SVD) and autocorrelation analysis, are reviewed. A simulation model has been developed in MATLAB, which allows us to evaluate the influence of channel parameters on the accuracy of data transmission. The analysis was performed using normalized mean square error (NMSE) and bit error probability (BER). The dependence of noise immunity on noise level and other channel characteristics has been revealed, which confirms the effectiveness of using OFDM-MIMO technologies for high-speed data transmission.

**Key words:** communication channel, OFDM, MIMO, Simulink, modulation, signal, noise, BER, SNR, probability dependence.