

# МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ OFDM-СИСТЕМ И ОБРАБОТКИ РАДИОСИГНАЛА В ПРОГРАММЕ MATLAB SIMULINK

## METHODS OF BUILDING OFDM SYSTEMS AND RADIO SIGNAL PROCESSING IN MATLAB SIMULINK

**A. Dyomko  
O. Semenov**

*Summary.* In this article the propagation of a radio signal and the methods of its processing and transmission, which reduce the number of bit errors and increase the noise immunity of a data transmission system are studied. The main aspects of model-oriented design and simulation modeling are considered. In this work the MatLab code for the OFDM method of processing a radio signal are used. Dependency graphs explaining the effect of the impacting interference on the propagated signal are obtained. During the simulation, models of MIMO-OFDM systems using a radio channel for quadrature amplitude modulation types 64 and 16QAM are described.

*Keywords:* OFDM system, radio signal, amplitude modulation, MatLab Simulink, convolutional coding, MIMO, Gaussian noise, error probability coefficient BER.

**Дёмко Анатолий Ильич**

*К.т.н., доцент, Сургутский государственный  
университет  
dai321@mail.ru*

**Семенов Олег Юрьевич**

*К.ф.-м.н., доцент, Сургутский государственный  
университет  
ous.tutor.phinma@mail.ru*

*Аннотация.* В данной работе рассмотрены вопросы распространения радиосигналов, методы их обработки и передачи, позволяющие уменьшить количество битовых ошибок и повысить помехоустойчивость системы передачи данных. Рассмотрены основные аспекты модельно-ориентированного проектирования и имитационного моделирования. В работе применялся код программы MatLab для метода OFDM обработки радиосигнала. Получены графики зависимостей, поясняющие влияние помех на радиосигнал. В ходе проведения моделирования описаны модели MIMO-OFDM систем с применением радиоканала для квадратурной амплитудной модуляции 64QAM и 16QAM.

*Ключевые слова:* OFDM-система, радиосигнал, амплитудная модуляция, MatLab Simulink, сверточное кодирование, MIMO, гауссовский шум, коэффициент вероятности ошибок BER.

**В** условиях городской застройки используется отражение радиоволны от объектов с последующим его многолучевым распространением до приемника. Технология OFDM совместно с применением пространственного разнесения MIMO является одним из основных методов увеличения пропускной способности. Для передачи информации в системах широкополосного беспроводного доступа используются OFDM-сигналы, которые состоят из набора ортогональных поднесущих с частичным перекрытием спектра. OFDM применяют в каналах с частотно-селективным замиранием, в технологии передачи данных ADSL, беспроводной локальной сети Wi-Fi, сети дальнего действия WiMax, LTE, в цифровом кабельном (DVB-C), цифровом эфирном телевидении (стандарт DVB-T) и внедряемом стандарте 5G [1–14].

Технология ортогонального частотного мультиплексирования OFDM основана на формировании сигналов с использованием множества поднесущих частот

(частотных каналов), отличающихся на величину  $\Delta f$ , которая подбирается из условия ортогональности соседних поднесущих колебаний. Как правило, её значение варьируется от 1 до 8 кГц, в зависимости от режима передачи. Ортогональность сигналов предполагает, что частоты поднесущих гармонических колебаний соотно-

сятся между собой, что позволяет адаптивно регулировать скорость потока данных и помехоустойчивость для каждого канала (пользователя) в отдельности.

Сигнал на выходе OFDM демодуляторов при условии идеальной символьной и частотной синхронизации может быть представлен [4–6]:

$$\begin{bmatrix} y_k^I(n) \\ \vdots \\ y_k^{RX}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_k^{1,1}(n) & \dots & H_k^{TX,1}(n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_k^{1,RX}(n) & \dots & H_k^{TX,RX}(n) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} s_k^I(n) \\ \vdots \\ s_k^{TX}(n) \end{bmatrix} \times e^{j\psi(n)} + \begin{bmatrix} w_k^I(n) \\ \vdots \\ w_k^{TX}(n) \end{bmatrix} \quad (1)$$

где  $n$  — номер OFDM символа,

$s_k^{TX}(n)$  — сигнал в  $k$ -ом частотном подканале,

$H_k^{TX,RX}(n)$  — коэффициент передачи сигнала в канале,

$w_m(n)$  — аддитивный белый гауссовский шум с дисперсией  $\sigma_w^2$ ,

$N$  — число поднесущих,

$e^{j\psi(n)}$  — фазовая ошибка,

для частотных подканалов

$$\psi_m = \text{Arg} \left( \frac{1}{N_c} \sum_{v=0}^{N_c-1} \exp(i\theta_m(v)) \right),$$

где  $\theta_j(n)$  — фазовый шум в  $j$ -ом канале.

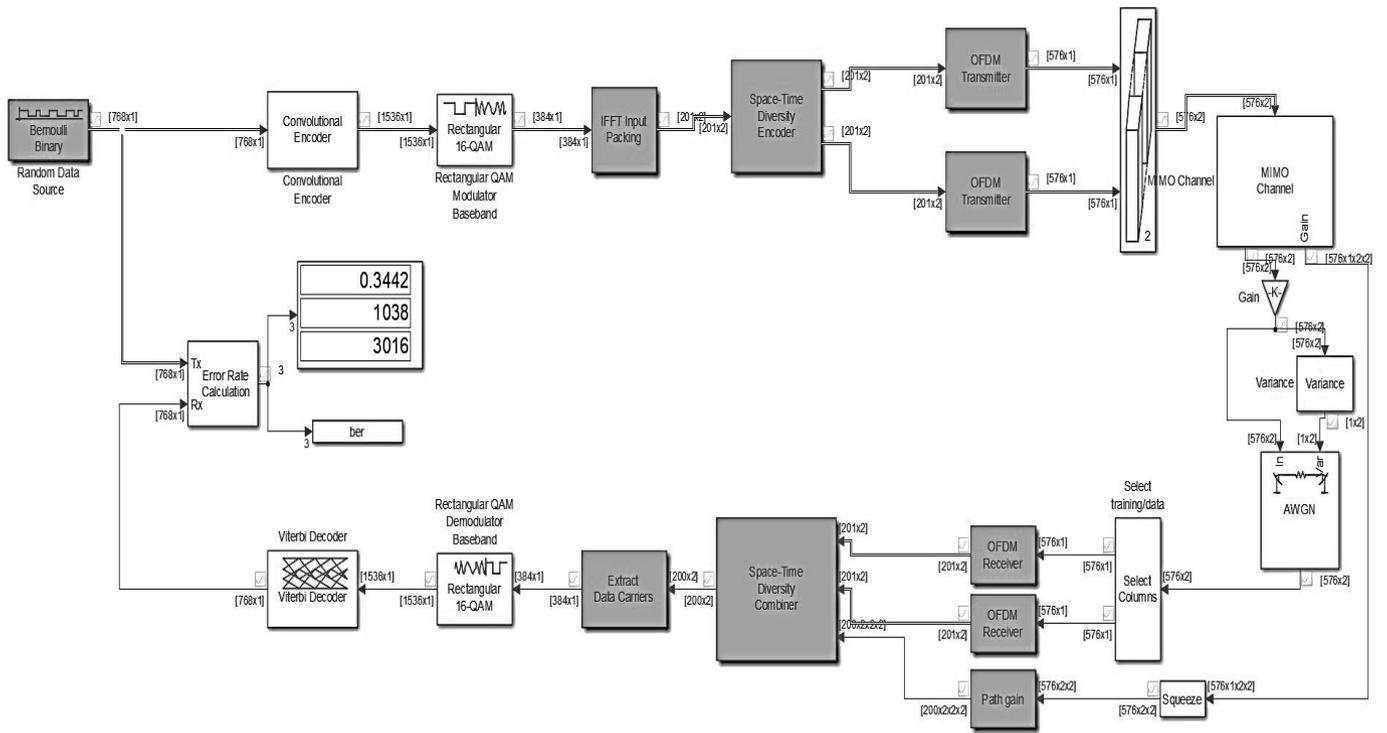


Рис. 1. Схема преобразования радиосигнала в системе MIMO-OFDM

Корреляционная функция для частотной характеристики радиоканала  $H_k^{TX,RX}(n)$ :

$$r_{k,l}(n, m) = E\{H_k(n), H_l^*(n-m)\} = J_0(2\pi f_d m T) \times \frac{1 - j2\pi(l-k)\sigma_t / T}{1 + 4\pi^2(l-k)^2 \sigma_t^2 / T^2} = r_{k,l}(m), \quad (2)$$

где  $f_d$  — максимальное Доплеровское смещение по частоте,

$\sigma_t$  — максимальной разброс задержек лучей в многолучевом канале,

$T$  — период OFDM-символа,

$J_0(\cdot)$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка.

Корреляционная функция  $H'_k(n)$  определяется из выражения:

$$r'_{k,l}(m) = r_{k,l}(m) \times R_{e^{j\psi(n)}}, \quad (3)$$

где  $R_{e^{j\psi(n)}}$  - корреляционная функция фазового шума (ФШ)  $\psi(n)$ , прошедшего через нелинейный элемент с характеристикой  $e^{\psi}$ .

Сигнал на выходе OFDM (1) принимает вид:

$$y(n) = D(n) \cdot x(n) + w(n) \quad (4)$$

где

$$y(n) = [y_1^1(n) \ \dots \ y_N^1(n) \ \dots \ y_1^{RX}(n) \ \dots \ y_N^{RX}(n)]^T,$$

$$w(n) = [w_1^1(n) \ \dots \ w_N^1(n) \ \dots \ w_1^{RX}(n) \ \dots \ w_N^{RX}(n)]^T,$$

$$D(n) = \begin{bmatrix} D^1(n) & \dots & D^{TX}(n) & 0_N & \dots & 0_N & 0_N & \dots & 0_N \\ 0_N & \dots & 0_N & \ddots & \ddots & \ddots & 0_N & \dots & 0_N \\ 0_N & \dots & 0_N & 0_N & \dots & 0_N & D^1(n) & \dots & D^{TX}(n) \end{bmatrix},$$

и  $S^{tx}(n)$  — диагональная матрица размерности  $N_c \times N_c$ , по диагонали которой расположены элементы  $S_k^{rx}(n)$ .

Модель MIMO-OFDM сигнала, заданная формулой (4), позволяет воспользоваться теорией многомерной фильтрации, оптимальной оценки канальной матрицы  $H_k(n)$  и групповой фазовой ошибки  $\psi_k(n)$ .

Построим модель MIMO-OFDM системы и получим графики зависимостей, определяющие влияние помех на радиосигнал. В качестве исходных данных программного кода программы использовались следующие параметры:

- ◆ число несущих: 64,
- ◆ используемое кодирование — сверточное,
- ◆ размер одного блока 96 бит,
- ◆ общее количество блоков 100,
- ◆ модуляция 16-QAM,

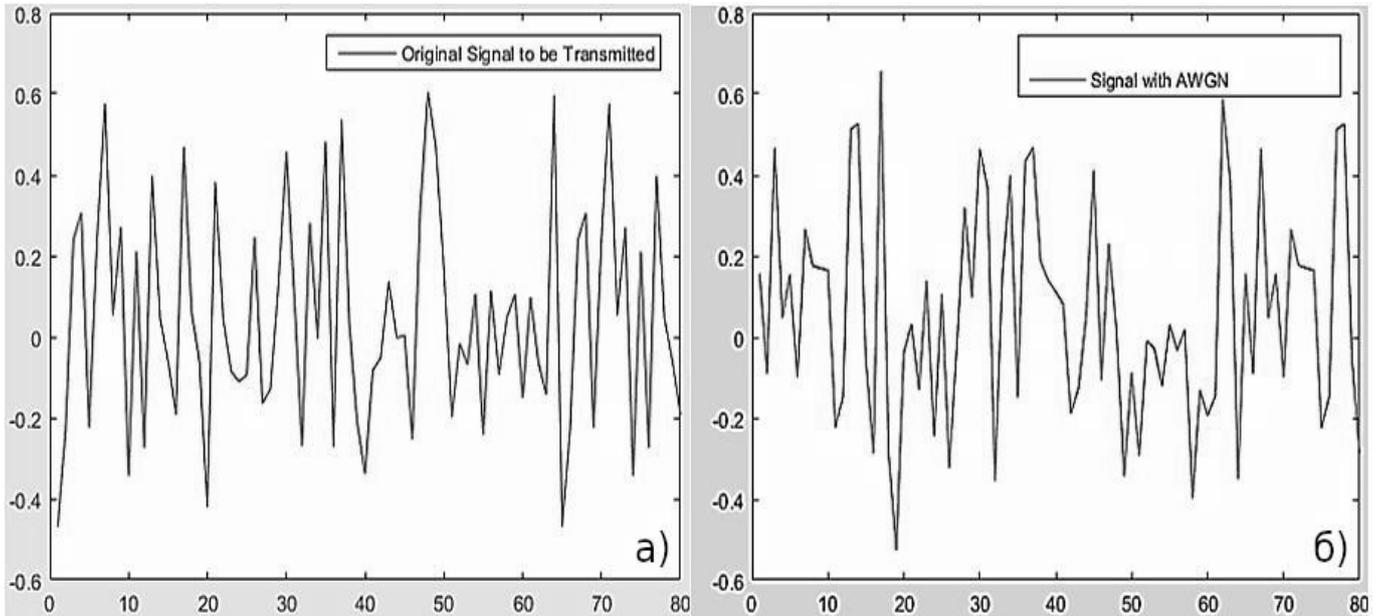


Рис. 2. Спектры передаваемых OFDM сигналов в радиоканале:  
а) сигнал без шума, б) с внесением шума

- ◆ число пилотных сигналов 4,
- ◆ циклический префикс 25%.

Схема приёма-передачи радиосигнала в MIMO-OFDM, представленная на рис. 1, включает следующие функциональные блоки: двоичный генератор случайных данных Бернулли, сверточный кодер, прямоугольный QAM (Quadrature Amplitude Modulation — квадратурная амплитудная модуляция) модулятор, блок ОБПФ (обратное быстрое преобразование Фурье), пространственно-временной кодер, OFDM-передатчик, блокconcatenation, MIMO канал, усилитель сигнала, блок дисперсии, аддитивный канал белого гауссовского шума, многопортовый селектор, уплотнитель, OFDM-приемник, пространственно-временной сумматор, блок извлечения данных несущих, QAM модулятор, декодер Витерби, блок расчета битовых ошибок, дисплей. В генераторе случайной двоичной последовательности Бернулли задается вероятность нуля — 0,5, время выборки —  $10^{-8}$ , тип выходных данных (генерация логических значений), при этом используются случайные двоичные символы с применением распределения Бернулли, количество выборок в одном фрейме — 768, формат выходного сигнала — в виде фреймов. При наличии большого числа рассеивателей на пути распространения сигнала используется гауссова модель канала.

Свёрточное кодирование двоичных данных происходит с использованием функции `poly2trellis`, которая принимает полиномиальное описание и преобразует его в решетчатое. Для создания решетки вводятся па-

раметры длины кодового ограничения равное 9, и порождающие полиномы, которые равны 561 и 753, что соответствует двоичному представлению 101110001 и 111101011, соответственно. Выбранный режим работы — непрерывный.

Кодирование последовательности происходит с помощью регистра сдвига. В модуляторе возможно задание следующих параметров: тип входных (последовательность бит) и выходных данных, разрядность квадратурной модуляции, метод нормализации (масштабирования) сигнального созвездия (минимальное расстояние между символами, средняя либо пиковая мощность), а также средняя мощность, приведённая к 1 Ом (Вт), фаза (рад). Блок ОБПФ содержит преобразователь сигнала с возможностью задания выходных размеров и параметров матрицы, мультипортовый селектор и блок concatenation (объединения).

Блок пространственно-временного кодирования кодирует входные последовательности сигналов с помощью ортогонального пространственно-временного кода. Входящий в блок кодер формирует матрицу по определенному закону, каждая строка поступает на передающие антенны отдельно. В этом блоке можно выбрать количество передающих антенн (от 2 до 4). В OFDM передатчике происходит добавление защитных интервалов, усиление сигнала, добавление циклического префикса. Далее сигналы из передатчиков объединяются в один MIMO канал. Параметры MIMO канала: частота дискретизации равна  $5 \cdot 10^7$  Гц, задержки дискретного

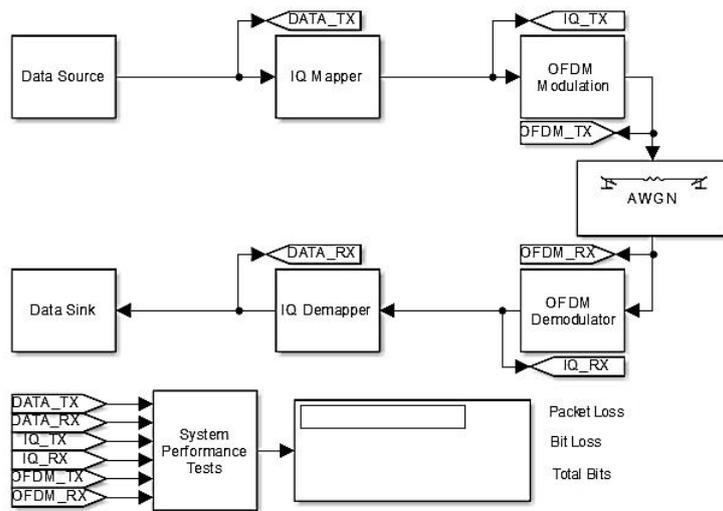


Рис. 3. Имитационная блок-схема канала OFDM для 16QAM

На рис. 4а), 4б) и рис. 5а), 5б) представлены сигнальные плоскости канального символа 16-QAM и её изменение после прохождения по каналу сигнала с затуханием.

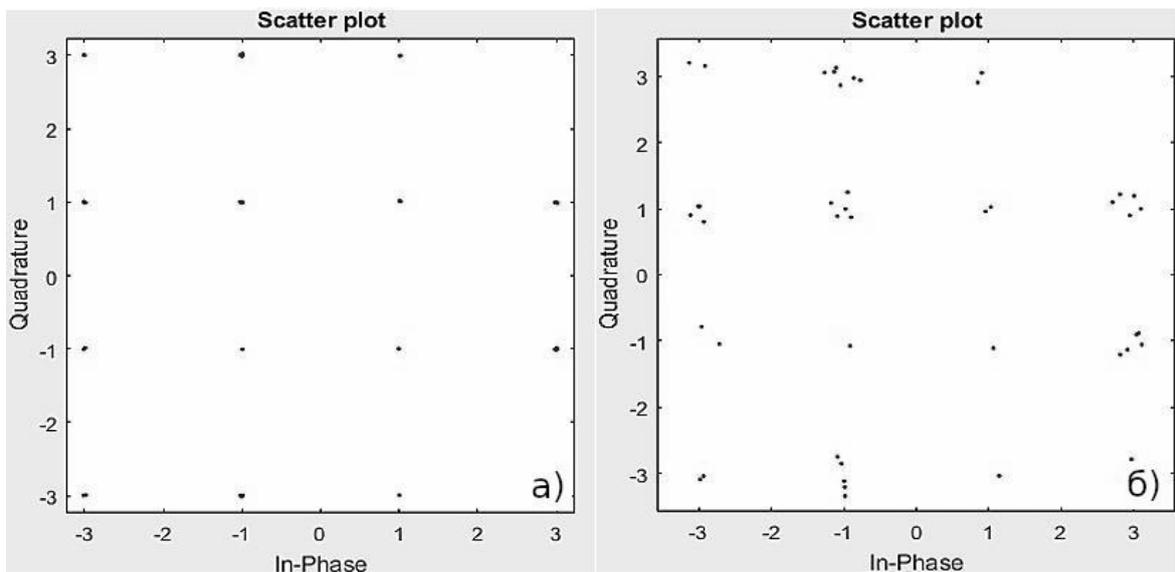


Рис. 4. Сигнальная плоскость канального символа:  
а) при 16-QAM, б) изменение положения сигналов

тракта 0, среднее усиление тракта 0, среднее усиление тракта нормализовано до 0 дБ, затухающее распределение — релейевское, максимальный доплеровский сдвиг частоты 100 Гц.

В блоке Variance (дисперсии) значение дисперсии определяется по каждому столбцу матрицы, в нём происходит преобразование кадров и перевод входного значения мощности в дБ. В радиоканале к сигналу до-

бавляется белый шум. Обработка данных производится на основе представления входных столбцов в качестве отдельных каналов. Параметр начальных данных для гауссовского генератора шума 67. Начальные данные могут принимать как скалярные значения, так и быть вектором, длина которого равна числу каналов входного сигнала. Блок Squeeze (блок уплотнения) удаляет одноэлементные значения многомерного входного сигнала, измерения которого равны 1.

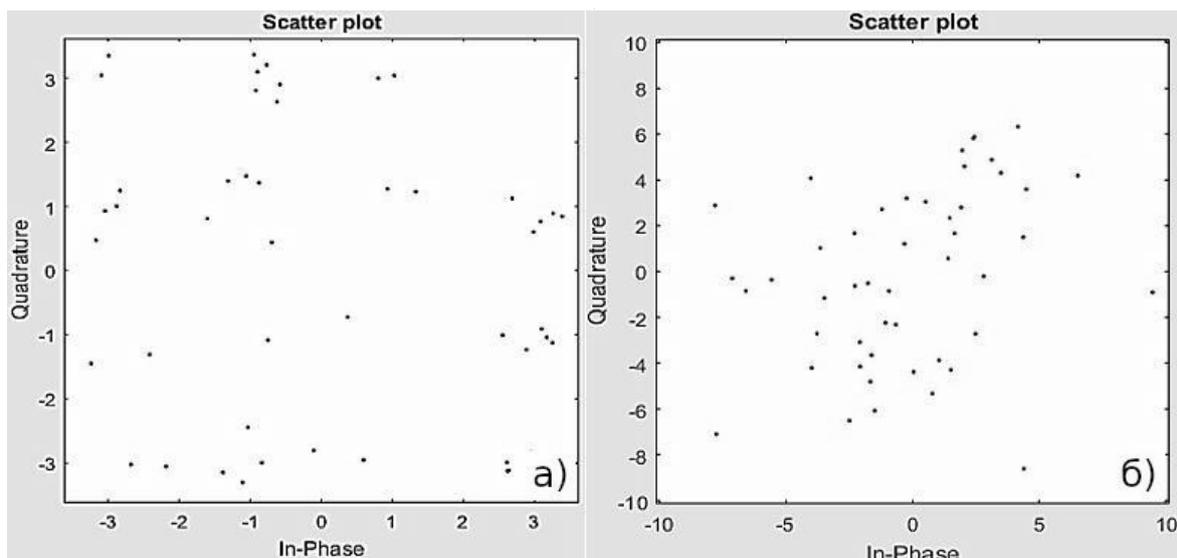


Рис. 5 Изменение сигнальной плоскости при 16-QAM:  
а) затухание сигнала, б) ослабление с потерей сигнала

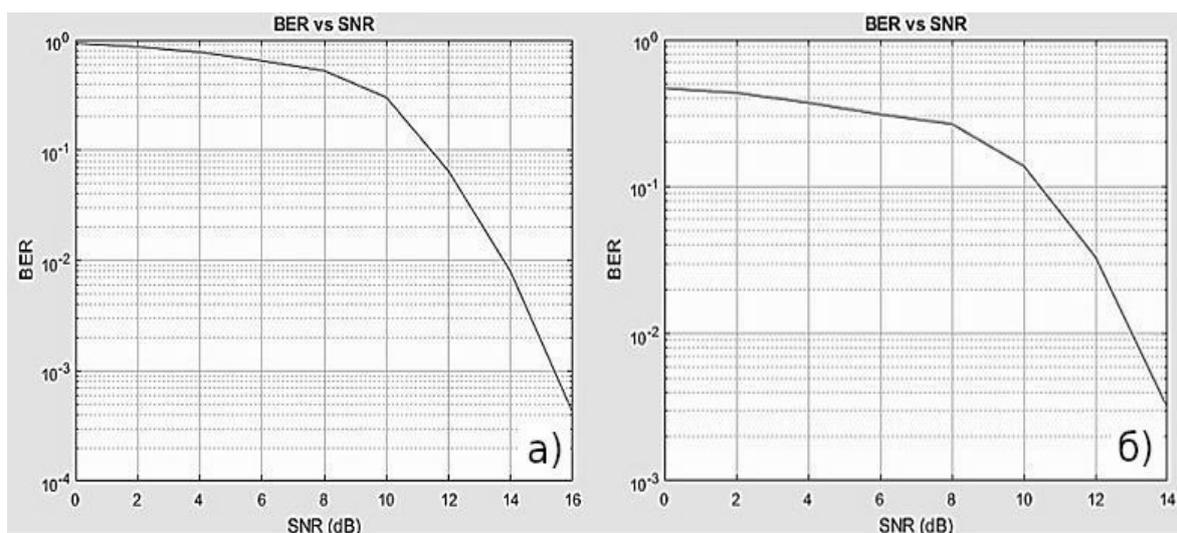


Рис. 6 Графики зависимости вероятности ошибки на бит (BER):  
а) отношение сигнал/шум (SNR), б) с применением коррекции ошибки

В результате запуска программного кода получены спектры передаваемых OFDM сигналов в канале без шума (рис. 2а) и с внесением в схему аддитивного белого гауссовского шума (рис. 2б).

Сравнение полученных данных позволяет заметить, что отдельные «пики» под действием шума объединились и изменили значение амплитуды, что усложняет их распознавание на приёмной стороне и вносит ошибки. Для анализа принятых сигналов используются сигнальные созвездия, с помощью которых можно определить

некоторые виды искажения сигнала. Оценка происходит из условия наилучшего приближения к переданному сигналу, так, при больших искажениях на приеме может быть выбрана неверная точка, что приведёт к ошибке. Тогда можно утверждать, что помехоустойчивость сигнала определяется расстоянием между двумя ближайшими точками созвездия.

Для изучения 16QAM сигнала в среде Simulink, реализована имитационная блок-схема канала OFDM, представленная на рис. 3.

Таблица 1. Допустимые значения отношения сигнал/шум SNR для различных типов модуляции

Тип модуляции	Допустимые значения SNR (max) по спецификации, дБ
BPSK	3
QPSK	9
16QAM	15,5
64QAM	21

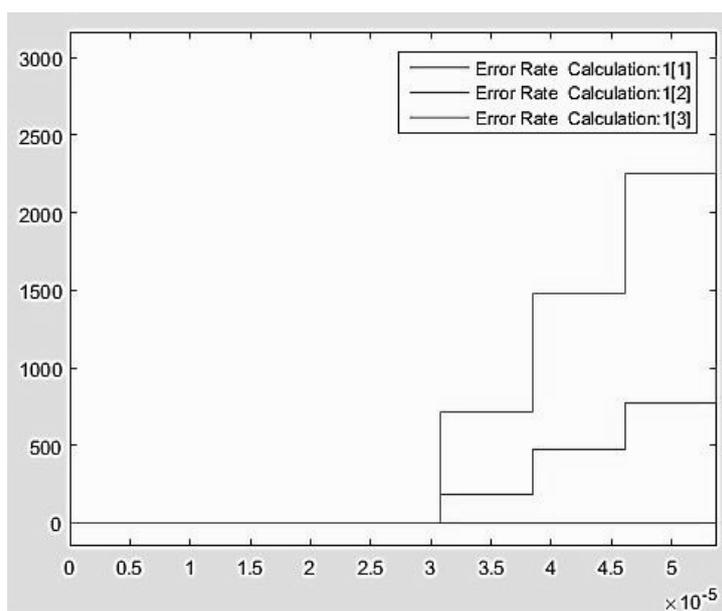


Рис. 7. График выходных данных блока расчета битовых ошибок

Гауссовский шум на сигнальной плоскости созвездия представляется в виде размытых точек, а некогерентная интерференция — в виде кругов; фазовые искажения распределены точками по окружности, а затухание сигнала — в виде точек ближе к центру.

На рисунках 6а) и 6б) представлены полученные графики зависимости вероятности ошибки на бит (BER) от отношения сигнал/шум (SNR) в зависимости от воздействующего на сигнал шума.

Для коррекции ошибок в сигнале применялся код Хэмминга, который позволяет обнаружить ошибки, возникшие при передаче данных в канале. Применение коррекции уменьшает вероятность ошибки на бит и на уровне  $BER=10^{-2}$  энергетический выигрыш от применения кодирования составляет около 0,7 дБ. В результате моделирования максимальные полученные значения SNR составили 16 дБ и 14 дБ, что соответствует значениям в таблице 1.

В OFDM приемнике преобразуются матричные данные, удаляется циклический префикс, осуществляется быстрое преобразование Фурье, усиливается сигнал, образуются фреймы и удаляются защитные интервалы. В блоке пространственно-временного объединения происходит оценка канала. Далее, извлекаются данные поднесущих и отделяются от пилотных. Данные, кодированные сверточным кодером, декодируются с применением алгоритма Витерби с глубиной трассировки равной 56. На основе имеющихся в модели данных о передатчике и приемнике сигнала, а также о канале распространения симулятор делает вывод о наличии или отсутствии ошибки при приеме. При этом могут учитываться такие факторы, как расстояние между приемником и передатчиком, тип модуляции, уровень шума, воздействие мешающих сигналов.

В симуляторе моделируется воздействие белого гауссовского шума при задании моделей затухания и задержки. Основываясь на исходных данных моделей, си-

мулятор рассчитывает вероятности ошибочного приема одного OFDM-символа, откуда выводится вероятность ошибочного приема кадра в целом. Для оценки ошибки используются формулы (1–4). В случае интерференции с кадром данных от другого источника мешающий кадр увеличивает эквивалентный уровень шума. Параметры блока расчета коэффициента ошибок: задержка приема — 56, задержка вычислений  $768 \cdot 4$ .

В результаты запуска симуляции схемы получены следующие результаты: частота ошибок — 0,3442, количество обнаруженных ошибок 1038 и общее количество сравниваемых символов 3016. Расчет коэффициента ошибок в данном случае производится путем сравнения полученных данных с задержанной версией передаваемых данных. В блок вносятся значения задержки приема и задержки вычислений, выбирается режим вычислений.

Параметры Рэлеевского канала для второй модели: максимальное доплеровское смещение —  $1/1000$ , средний вектор усиления — 0–12 дБ. Параметры канала АБГШ (аддитивный белый гауссовский шум) для второй модели: начальные данные для гауссовского генератора шума — 1000, SNR — 15 дБ, мощность сигнала, приведенная к 1 Ом — 0,004 Вт. Данные блока расчета коэффициента ошибок для схемы с многолучевым Рэлеевским затуханием: частота ошибок — 0,0005647, количество обнаруженных ошибок 525 и общее количество символов

9,297 $\cdot 10^5$ . Большое разнесение результатов связано с различием параметров модулируемых схем, во второй схеме применялась 64-QAM (рис. 7).

## Результаты

моделирования показали, что на распространение радиосигнала влияют внешние факторы и методы обработки данных в приёмно-передающем тракте радиоэлектронного устройства; система коррекции улучшает работу приемника с функцией оценки параметров канала, частотно-временным рассеянием и фазовых флуктуаций приемно-передающего тракта. Использование методов модуляции цифровых сигналов с частотным разделением ортогональных несущих частот вместе с технологией пространственного разнесения радиосигнала MIMO-OFDM систем способствует более качественной работе радиоустройств. Рассмотренные методы и построенная модель могут быть использованы при решении исследовательских задач.

Работа выполнена в рамках проекта в области фундаментальных и прикладных исследований «Комплект приборов для экологического мониторинга и нефтегазового комплекса» при поддержке Департамента образования и молодежной политики (приказ от 25.08.2017 № 1281) Ханты-Мансийского автономного округа — Югры и Сургутского государственного университета.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бакулин М. Г. Технология MIMO. Принципы и алгоритмы / М. Г. Бакулин, Л. А. Варукина, В. Б. Крейнделин; Горячая линия — Телеком. — М., 2014. — 244 с.
2. Hanzo L., Akhtman Y., Wang L., Jiang. M. MIMO-OFDM for LTE, WiFi and WiMAX. — IEEE Press, 2011. — 694 с.
3. Рашич А. В. Сети беспроводного доступа WiMAX: учебное пособие / А. В. Рашич; Издательство Политехнического университета. — СПб., 2011. — 180 с.
4. Семенов О. Ю. Моделирование передачи данных с применением технологии ортогонального частотного мультиплексирования / А. И. Дёмко, М. И. Ганиев, О. Ю. Семенов, А. Ф. Шафикова // Научный потенциал молодежи и технический прогресс: Материалы II международной научно-практической конференции. — СПб.: СПбФ НИЦ МС, 2019. — 75 с.
5. Казаков Л. Н., Кукушкин Д. С., Исмаилов А. В. Система коррекции фазы в каналах передачи с ортогональным частотным и пространственным разделением сигналов / Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов для связи и вещания: Сборник материалов научно-технического семинара. Одесса, — 2007, — С. 24–29.
6. Agarwal A. Implementation and Performance Evaluation of OFDM System in Diverse Transmission Channel Using Simulink / A. Agarwal, K. Agarwal // American Journal of Electrical and Electronic Engineering. — 2015. — № 5. — PP. 117–123.
7. Семенов О. Ю. OFDM-сигналы в телекоммуникационных системах беспроводной передачи данных / О. Ю. Семенов и др. // Техника. Технологии. Инженерия. — 2018. — № 3. — С. 6–8.
8. Лемме Д. В. Характеристики передачи сигналов OFDM в многолучевых каналах / Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. — 2015. — № 2 (30). — С. 207–216.
9. Caldeirinha R. Performance Evaluation of 60 GHz OFDM Communications under Channel Impairment over Multipath Fading Channels at 60 GHz / R Caldeirinha, A. Hammoudeh, P. Pires // Sensors & Transducers. — 2016. — Vol. 204, Issue 9. — PP. 29–38.
10. Абенев Р. Р. Исследование методов эквалайзирования для систем связи с использованием OFDM сигналов / Р. Р. Абенев и др. // Вестник СибГУТИ. — 2013. — № 1. — С. 21.
11. Семенов О. Ю. Организация связи передачи данных в SCADA-системе с нижним уровнем в автоматизированной системе управления технологического процесса / Давлетов Р. Р., Семенов О. Ю. // Роль физико-математического и инженерного образования в современном обществе: материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Сургут, 7 ноября 2017 г.). — Сургут. гос. ун-т. — Сургут: ИЦ СурГУ, 2017. — С. 22–26.

12. Стругов Ю. Ф. Стохастическое моделирование каналов с аддитивными и мультипликативными помехами. Схема реализации / Ю. Ф. Стругов // Математические структуры и моделирование. — 2015. — № 2 (34). — С. 48–63.
13. Pokamestov D. A. Concepts of the physical level of the fifth generation communications systems / D. A. Pokamestov, Y. V. Kryukov, E. V. Rogozhnikov et al. // Radioelectronics and Communications Systems. — 2017. — V. 60, № 7, PP. 285–296.
14. Wu S., Kuang L., Ni Z., Lu J., Huang D., & Guo Q. Low-complexity iterative detection for large-scale multiuser MIMO-OFDM systems using approximate message passing. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2014, — V. 8(5), PP. 902–915.

---

© Дёмко Анатолий Ильич ( dai321@mail.ru ), Семенов Олег Юрьевич ( ous.tutor.phinma@mail.ru ).  
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»

