

DOI: 10.17725/rensit.2022.14.073

## Моделирование каналов связи с многолучевым распространением сигналов процедурами помехоустойчивого кодирования в рамках стандарта LTE

<sup>1</sup>Ташатов Н.Н., <sup>1</sup>Сексембаева М.А., <sup>2</sup>Овечкин Г.В., <sup>1</sup>Сейткулов Е.Н.

<sup>1</sup>Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, <https://fit.enu.kz/>

Нур-Султан 010000, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, <http://www.rsreu.ru/>

Рязань 390005, Российская Федерация

E-mail: [tash.nur@mail.ru](mailto:tash.nur@mail.ru), [anuarkizi@gmail.com](mailto:anuarkizi@gmail.com), [g\\_ovechkin@mail.ru](mailto:g_ovechkin@mail.ru), [yerzhan.seitkulov@gmail.com](mailto:yerzhan.seitkulov@gmail.com)

Поступила 29.12.2021, рецензирована 05.01 2022, принята 12.01.2022

Представлена действительным членом РАЕН П.Б. Петровым

**Аннотация:** Использована схема технологий мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов с циклическим префиксом, использующая алгоритм быстрого преобразования Фурье и усилителей со стороны передатчика и нормализатора со стороны приемника. Путем регулирования коэффициентов усиления передающей и приемной стороны схема практически позволяет сводить ситуации при воздействии межсимвольной помехи (ISI) к ситуациям ее отсутствия. Предлагаемая модель моделируется с помощью Simulink на базе MATLAB. Схема была исследована на частоту битовых ошибок (BER) по каналу аддитивного белого гауссовского шума (AWGN) и многолучевому каналу райсовского замирания, работающие в условиях воздействия ISI. Исследовались разные параметры для многолучевого канала, где рассматривались случаи задержки сигнала, подобные для стандартов расширенной модели "пешехода" (Extended Pedestrian A model). Передача данных в системе включает в себя канал Релея и AWGN с различными значениями отношения сигнал/шум (SNR) и различными значениями усилителя Gain, dbGain. Получен график производительности передачи данных в многолучевом канале с замиранием по отношению к BER и SNR (BER  $\approx 0$  при значений SNR  $-21$ дБ). Также рассмотрено влияние межсимвольной интерференции на стороне приемника путем анализа глазковых диаграмм. Полученные данные исследования можно использовать при проектировании радиотехнических устройств для передачи данных по беспроводной сети.

**Ключевые слова:** беспроводная связь, стандарт LTE, турбо коды, межсимвольные помехи, БПФ, канал Релея, усилители, помехоустойчивое кодирование, цифровая обработка сигналов

PACS: 84.40.Ua

**Для цитирования:** Ташатов Н.Н., Сексембаева М.А., Овечкин Г.В., Сейткулов Е.Н. Моделирование каналов связи с многолучевым распространением сигналов процедурами помехоустойчивого кодирования в рамках стандарта LTE. РЭНСИТ: Радиозлектроника. наносистемы. Информационные технологии, 2022, 14(1):73-78. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.073.

## Modeling of communication channels with multipath propagation of signals by noise-immunity coding procedures in the frameworks of LTE standard

Nurlan N. Tashatov, Manara A. Seksembayeva, Yerzhan N. Seitkulov

Gumilyov Eurasian National University, <https://fit.enu.kz/>

Nur-Sultan 010000, Republic of Kazakhstan

E-mail: [tash.nur@mail.ru](mailto:tash.nur@mail.ru), [anuarkizi@gmail.com](mailto:anuarkizi@gmail.com), [yerzhan.seitkulov@gmail.com](mailto:yerzhan.seitkulov@gmail.com)

## Gennady V. Ovechkin

Utkin Ryazan State Radio Engineering University, <http://www.rsreu.ru/>  
Ryazan 390005, Russian Federation

E-mail: [g\\_ovechkin@mail.ru](mailto:g_ovechkin@mail.ru)

Received December 29, 2021, peer-reviewed January 05, 2021, accepted January 12, 2022

**Abstract:** A scheme of orthogonal frequency division multiplexing technologies with a cyclic prefix was used, using the fast Fourier transform algorithm and amplifiers on the transmitter side and a normalizer on the receiver side. By adjusting the gains of the transmitting and receiving sides, the circuit practically makes it possible to reduce situations when intersymbol interference (ISI) is affected to situations where it does not exist. The proposed model is modeled using Simulink based on MATLAB. The scheme was investigated for the bit error rate (BER) using the additive white Gaussian noise (AWGN) channel and the multipath Rice fading channel operating under the influence of ISI and different parameters for the channel were investigated, where cases of signal delay similar to the EPA standards (Extended Pedestrian A model) were considered. Data transmission in the system includes a Relay channel and AWGN with different values of signal-to-noise ratio (SNR, dB) and different values of Gain, dBGain amplifier. **Result:** A graph of data transmission performance in a multipath channel with fading with respect to BER and SNR (BER  $\approx 0$  with values of SNR  $-21$ dB) was obtained. The effect of intersymbol interference on the receiver side is also considered by analyzing eye diagrams. The research data can be used in the design of radio engineering devices for data transmission over a wireless network.

**Keywords:** wireless communication, standard LTE, turbo codes, intersymbol interferences, FFT, relay channel, amplifiers, noise-immunity coding, digital signal processing

**PACS:** 84.40.Ua

*For citation:* Nurlan N. Tashatov, Manara A. Seksembayeva, Gennady V. Ovechkin, Yerzhan N. Seitkulov. Modeling of communication channels with multipath propagation of signals by noise-immunity coding procedures in the frameworks of LTE standard. *RENSIT: Radioelectronics. Nanosystems. Information Technologies*, 2022, 14(1):73-78. DOI: 10.17725/rensit.2022.14.073.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (74)
2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ (75)
3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ (76)
4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (78)

## ЛИТЕРАТУРА (78)

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Стандарт беспроводной высокоскоростной передачи данных LTE (Long-Term Evolution – долгосрочное развитие) разработан консорциумом 3GPP (Франция) [1] и представлен в его спецификациях Release 8 (2008 г.) и Release 9 (2009 г.). Технология LTE является развитием стандартов GSM/GPRS/UMTS на основе методов цифровой

обработки сигналов и модуляции, разработанных на рубеже тысячелетий. Согласно спецификациям, стандарт LTE обеспечивает скорость загрузки до 3 Гбит/с при снижении задержки передачи до 2 мс; поддерживаемая частота пропускания от 1.4 МГц до 20 МГц; разделение каналов частотное (FDD – Frequency-Division Duplex) и временное (TDD – Time-Division Duplex).

Существует два основных различия между LTE-TDD и LTE-FDD: по данным на входе и на выходе и по частотным спектрам развертывания сетей. Разделение каналов LTE-FDD использует парные частоты для входных и выходных данных, а LTE-TDD использует одну частоту, чередуя загрузку и обработку данных во времени. Соотношение

между загрузкой и обработкой в сети LTE-TDD может изменяться динамически, в зависимости от соотношения объёмов данных на входе и на выходе.

Разные полосы частот обусловлены тем, что LTE-TDD лучше работает на более высоких частотах, а LTE-FDD – на более низких частотах. В сетях LTE-TDD используются полосы в диапазоне от 1850 МГц до 3800 МГц, что дешевле для доступа и свободней по трафику.

На физическом уровне при передаче данных используется схема OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing – мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) с циклическим префиксом. При этом используются следующие пилотные сигналы:

*Опорный сигнал*, состоящий из набора известных символов, передаётся в чётко определенной позиции символа OFDM в интервале. Это помогает терминалу пользователя оценить импульсную характеристику канала, чтобы компенсировать искажение канала при приёме. На каждый порт антенны приёмника передаётся один опорный сигнал, и для антенного порта назначается позиция эксклюзивного символа (когда один антенный порт передает опорный сигнал, другие порты молчат).

*Сигнал синхронизации*: первичные и вторичные сигналы синхронизации передаются в фиксированном положении подкадров (первом и шестом) в кадре и помогают в процессе поиска сот и синхронизации терминала пользователя. Каждой соте назначается уникальный первичный сигнал синхронизации [2].

При приёме сигнала используется схема SC-FDMA (Single-carrier Frequency-Division Multiple Access – FDMA с одной несущей). Схема SC-FDMA реализована как двухэтапный процесс, где на первом этапе входной сигнал преобразуется в частотную область (представленную коэффициентами DFT – Discrete Fourier Transform), а на втором этапе коэффициенты DFT преобразуются

в сигнал OFDM с использованием схемы OFDM. Поэтому схему SC-FDMA также часто называют DFT-Spread OFDM.

При приёме используются следующие пилотные сигналы:

*Опорный сигнал* демодуляции (DM-RS – Demodulation Reference signal): сигнал, отправляемый терминалом пользователя для оценки импульсной характеристики канала для приёма пакетов, чтобы эффективно демодулировать входящий сигнал.

*Зондирующий опорный сигнал* (SRS – Sounding Reference Signal): сигнал, отправляемый терминалом пользователя для оценки общего состояния канала и выделения соответствующих частотных ресурсов для приёма сигнала.

По состоянию на май 2019 года LTE-сети имеют более 90% охвата в 15 странах; в первую пятёрку входят Южная Корея (97.5%), Япония (96.3%), Норвегия (95.5%), Гонконг (94.1%) и США (93.0%) [3].

Цель настоящей работы – повышение эффективности подавления негативного воздействия межсимвольной интерференции (далее МСИ) при использовании передачи данных по многолучевым каналам с замираниями на основе стандарта передачи данных LTE. Критерием эффективности в данной работе будем считать требуемое отношение сигнал/шум канала связи для обеспечения заданной вероятности битовой ошибки системы.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С помощью Simulink разработан физический уровень стандарта LTE, а его производительность оценивается в условиях релеевских затуханий и шумовых эффектов AWGN (Additive white Gaussian noise). Эта система включает в себя SISO (Single Input Single Output) технологию и рассмотрены пути улучшения качества передачи данных с помощью конвертера размера и типа передающих и полученных данных, усилителя и нормализатора Gain, dBGain, использование алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ, FFT). Применяемые модели

моделируются путем передачи и приема данных через разработанную систему. Затем производительность системы измеряется по отношению к BER (Bit Error Rate – коэффициент ошибок по битам).

В качестве параметров канала была выбрана стандартная модель ЕРА (Extended Pedestrian A model) [4]. Эта модель используется для формирования многолучевого канала в беспроводных системах связи в сетях стандарта LTE/4G и может быть обобщена на стандарт 5G [5]. Параметры модели - 7 лучей, параметры лучей приведены в **Таблице 1** (Path delay vector (s) и Average Path gain vector (dB)).

Ниже в **Таблицах 1 и 2**, приведена проектная спецификация для фиксированного стандарта LTE.

Поскольку многолучевой канал отражает сигналы в нескольких местах, передаваемый сигнал проходит к приемнику по нескольким путям, каждый из которых может иметь различные расстояния и временные задержки. В диалоговом окне блока, параметр дискретной векторной задержки определяет время задержки для каждого пути. Если вы не установили значение вектора параметра усиления на 0 дБ в параметре Normalize, общий коэффициент усиления примет среднее значение усиления для каждого пути. Когда вы установите флажок, блок использует кратное вектора среднего усиления пути вместо самого среднего вектора усиления путь, выбирая

коэффициент масштабирования так, что эффективное усиление канала, учитывая все пути, составляет 0 дБ. Число путей указывает длину дискретных векторных задержек пути или среднее вектора усиления пути. Если оба эти параметра являются векторами, то они должны иметь одинаковую длину. Если только один из этих параметров содержит скалярное значение, то блок преобразует его в вектор, размер которого совпадает с размером другого вектора.

Для помехоустойчивого кодирования в системе использованы турбокоды и блок преобразования однополярного сигнала в биполярный сигнал (Unipolar to Bipolar Converter)

В блоке *Free space path loss* указываем дистанцию и значение несущей частоты:

Distance (km): 10; Carrier frequency (MHz): 800

Учитывая дополнительные потери энергии (например, тепловой шум) добавили дополнительный блок *Free space path loss*, указывая потерю до значений 180 дБ.

Значение блоков усилителей Power dB Gain – 120 и Gain – 10<sup>6</sup>.

### 3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Производительность разработанной модели оценивается при условии канала с замиранием и анализируется значения BER при малых значениях ОСШ ( $E_b/N_0$ ). Также анализируются глазковые диаграммы для эффективного снижения негативного влияния межсимвольной интерференции.

Теоретические значения получены с помощью модуля расчета BER, присутствующего в программном обеспечении MATLAB. На **Рис. 1** показан скриншот сгенерированного MATLAB проекта для системы передачи данных.

Фиксированная передача данных с замиранием показана в **Таблице 3** и на **Рис. 2**.

На **Рис. 3** показана глазковая диаграмма принятого сигнала при ОСШ = -21 (после AWGN канала). Видно очевидное

Таблица 1

Параметры многолучевого канала

Max Doppler shift (f)	1/1000
Doppler spectrum type	Jakes
Path delay vector (s)	[0 30 70 90 110 190 410]·10 <sup>-9</sup>
Average Path gain vector (dB)	[0 -1 -2 -3 -8 -17 -20.8]

Таблица 2.

Шумовые характеристики канала AWGN

Initial Read	67
Mode	Signal to Noise rate (Eb/No)
Eb/No(dB)	-40-20
No. of bits/symbol	1
Input signal power	1
Symbol Period	1

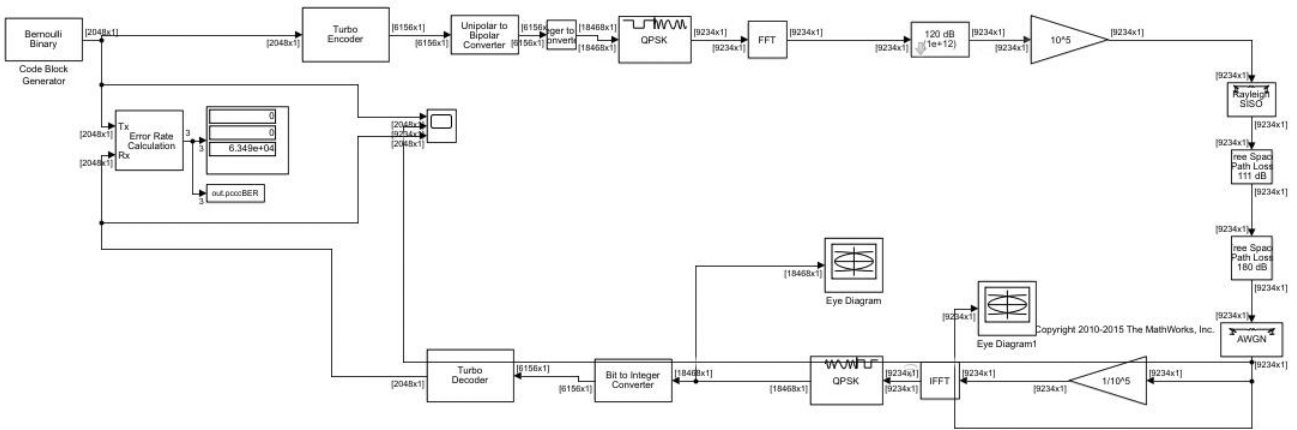


Рис. 1. Приемно-передатчик для данных на основе стандарта LTE.

наложение волн друг на друга – явление интерференции.

На Рис. 4 глазковая диаграмма при ОСШ = -21 после IFFT и QPSK модулятора, можно увидеть «раскрытые глаза».

На Рис. 5 показан сравнительный анализ переданного, искаженного и полученного сигнала с помощью блока Time Scope при ОСШ = -21.

Таблица 3.

Вероятность появления ошибочного бита при малых отношениях сигнал/шум

ОСШ (дБ)	BER	ОСШ (дБ)	BER
-40	0.382	-27	0.04777
-39	0.3	-26	0.04
-37	0.2552	-25	0.03256
-35	0.1908	-24	0.015
-33	0.1756	-23.5	$7.876 \cdot 10^{-3}$
-31	0.1113	-23	$3.15 \cdot 10^{-5}$
-29	0.07986	-21	0.0

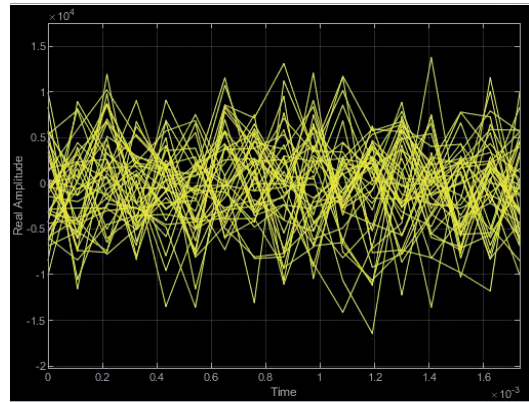


Рис. 3. Глазковая диаграмма принятого сигнала ОСШ = -21 после AWGN канала.

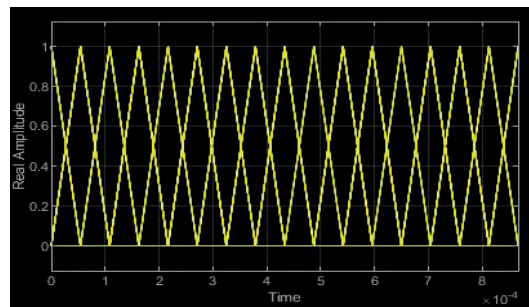


Рис. 4. Глазковая диаграмма при ОСШ = -21 после OFDM модулятора.

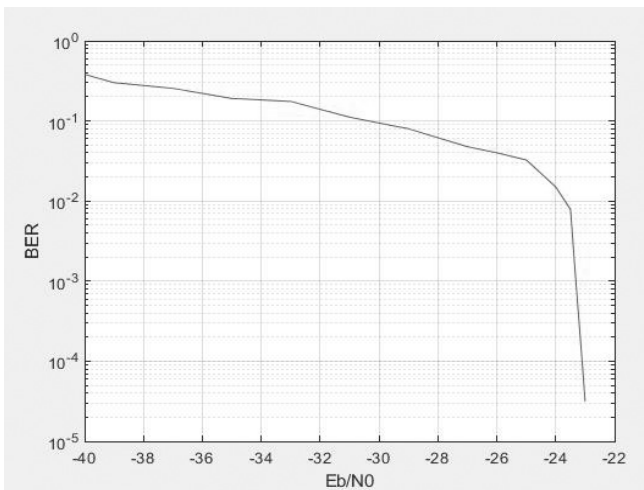


Рис. 2. Вероятности ошибок в канале Релея и Гаусса.

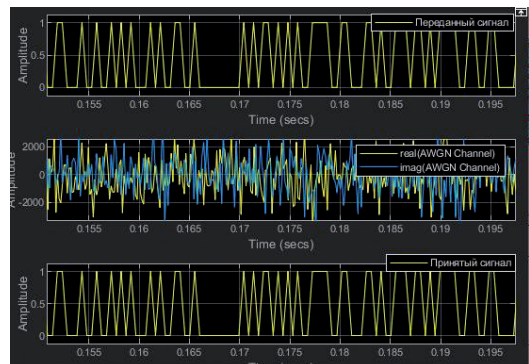


Рис. 5. Анализ переданного и полученного сигнала с помощью блока Time Scope при ОСШ = -21.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе исследована и представлена оценка производительности беспроводной системы на основе стандарта LTE с технологией OFDM, использующая алгоритм быстрого преобразования Фурье. Проведена оценка предлагаемой системы для передачи данных в беспроводной сети с задержкой 7 лучей по ЕРА модели, с учетом дистанций между антеннами и дополнительной потери энергий при передаче данных по каналу Релея. Предлагаемая модель моделируется с помощью Simulink на базе MATLAB. Получен график производительности передачи данных в многолучевом канале с замиранием по отношению к ВЕР и ОСШ, а также рассмотрена межсимвольная интерференция на стороне приемника путем анализа глазковых диаграмм.

Полученные данные исследования можно использовать при проектировании радиотехнических устройств для передачи данных по беспроводной сети.

Кроме того, разработанная модель может быть использована в качестве пособия для изучения различных особенностей систем на основе LTE.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. <https://www.3gpp.org/> – официальный сайт консорциума 3GPP.
2. <https://sites.google.com/site/lteencyclopedia/home> – LTE Encyclopedia.
3. Boyland P. The State of Mobile Network Experience, May 2019. Opensignal, [https://www.opensignal.com/sites/opensignal-com/files/data/reports/global/data-2019-05/the\\_state\\_of\\_mobile\\_experience\\_may\\_2019\\_0.pdf](https://www.opensignal.com/sites/opensignal-com/files/data/reports/global/data-2019-05/the_state_of_mobile_experience_may_2019_0.pdf).
4. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz. 3GPP TR 38.901 version 14.0.0 Release 14, Technical Report 138 901 V14.0.0, European Telecommunications Standards Institute, 2017, 90 p.
5. Venkataraman H, Trestian R. 5G Radio Access Networks: Centralized RAN, Cloud-RAN and Virtualization of Small Cells. Boca Raton, Taylor&Francis, CRC Press, 2017, 315 p.

**Ташатов Нурлан Наркенович**

*к.ф.-м.н., доцент*

Евразийский национальный университет им.

Л.Н. Гумилева

**11, ул. Пушкина, Нур-Султан 010000, Казахстан**

**E-mail: tash.nur@mail.ru**

**Сексембаева Манара Ануаровна**

*докторант*

Евразийский национальный университет им.

Л.Н. Гумилева

**11, ул. Пушкина, Нур-Султан 010000, Казахстан**

**E-mail: anuarkizi@gmail.com; sexembayeva\_**

**ma\_1@edu.enu.kz**

**Овечкин Геннадий Владимирович**

*д.т.н., профессор*

Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина

**59/1, ул. Гагарина, Рязань 390005, Россия**

**E-mail: g\_ovechkin@mail.ru**

**Сейткулов Ержан Нураханович**

*к.ф.-м.н., доцент*

Евразийский национальный университет им.

Л.Н. Гумилева

**11, ул. Пушкина, Нур-Султан 010000, Казахстан**

**E-mail: yerzhan.seitkulov@gmail.com.**