

УДК 621.391.6

## Экспериментальная апробация технологии MIMO стандарта LTE средствами программно-конфигурируемого радио

Шеремет Н. В. ✉, Фокин Г. А.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Постановка задачи:** экспериментальная апробация существующих беспроводных телекоммуникационных систем, таких как технология Multiple Input Multiple Output (MIMO) в стандарте Long-Term Evolution (LTE), является примером актуальной и востребованной тенденции использования методов и средств программно-конфигурируемого радио для макетирования и прототипирования систем подвижной радиосвязи и позиционирования. **Целью работы** является проверка работоспособности режима многоантенной радиосвязи в стандарте LTE с помощью разнесенной передачи двумя антеннами и комбинирования на приеме двумя антеннами с использованием программно-конфигурируемого радио. **Используемые методы:** рассматривается реализация методов разнесенной передачи и приема посредством применения ортогонального пространственно-временного блочного кода Аламоути на передатчике в сочетании с комбинированием по критерию максимизации отношения сигнал/шум на приемнике. С целью экспериментальной апробации режима MIMO выполняется программная реализация разнесенной передачи и приема в среде MATLAB с использованием плат программно-конфигурируемого радио LibreSDR. **Результат:** в процессе макетирования на приемной стороне были получены экспериментальные оценки канальных коэффициентов передачи для схемы MIMO 2×2, исходя из которых в первом приближении сделан вывод о пространственной декорреляции двух каналов на передаче и приеме в лабораторных условиях. Элементом **новизны** работы является постановка эксперимента и анализ результатов по особенностям функционирования режима MIMO стандарта LTE в лабораторных условиях с использованием плат программно-конфигурируемого радио LibreSDR. **Теоретическая / Практическая значимость:** экспериментальная апробация специфицированного стандартом LTE режима MIMO средствами программно-конфигурируемого радио в лабораторных условиях подтверждает возможность и целесообразность проведения таких исследований с реальными сигналами операторских базовых станций на плате LibreSDR.

**Ключевые слова:** стандарт Long-Term Evolution (LTE), технология Multiple Input Multiple Output (MIMO), программно-конфигурируемое радио, схема Аламоути, язык программирования / среда разработки MATLAB

**Источник финансирования:** статья подготовлена в рамках прикладных научных исследований СПбГУТ, регистрационный номер 1023031600087-9-2.2.4;2.2.5;2.2.6;1.2.1;2.2.3 в ЕГИСУ НИОКТР.

### Введение

Исследование моделей и методов пространственной обработки сигналов в многоантенных системах MIMO (аббр. от англ. Multiple Input Multiple Output — системы с множественным входом и множественным выходом) средствами имитационного моделирования позволяет оценивать показатели функционирования перспективных сетей пятого поколения 5G [1–6]. Однако, опираясь исключительно на

#### Библиографическая ссылка на статью:

Шеремет Н. В., Фокин Г. А. Экспериментальная апробация технологии MIMO стандарта LTE средствами программно-конфигурируемого радио // Вестник СПбГУТ. 2024. Т. 2. № 3. С. 1. EDN: SCUWLY

#### Reference for citation:

Sheremet N., Fokin G. Experimental Testing of MIMO Technology of the LTE Standard Using Software-Defined Radio // Herald of SPbSUT. 2024. Vol. 2. Iss. 3. P. 1. EDN: SCUWLY

программную реализацию процедур формирования, передачи, приема и обработки сигналов в системах радиосвязи, невозможно учесть ряд факторов, определяемых в конечном счете аппаратными ограничениями. Для преодоления этого недостатка при разработке систем радиосвязи академическое и промышленное сообщество использует подход модельно-ориентированного проектирования в совокупности со средствами программно-конфигурируемого радио (SDR — *аббр. от англ. Software-Defined Radio*) [7–13]. Вследствие широкого распространения сетей подвижной радиосвязи LTE (*аббр. от англ. Long-Term Evolution — букв. «долгосрочное развитие»*) актуальной и востребованной остается задача макетирования режима многоантенной радиосвязи MIMO в стандарте LTE.

Многоантенные системы и пространственная обработка сигналов являются одними из наиболее перспективных средств повышения производительности, эффективности и надежности сетей подвижной радиосвязи посредством использования нескольких передающих и принимающих антенн. Технология MIMO стала фундаментальным компонентом современных сотовых сетей, включая стандарт LTE, обеспечивая пространственное мультиплексирование, разнесение и формирование луча. Данная статья посвящена разнесенной передаче и комбинированному приему как методу реализации MIMO, который позволяет повысить надежность канала связи за счет борьбы с эффектом замираний путем одновременной передачи избыточной информации с нескольких антенн и комбинирования принятых сигналов на приемной стороне. В частности, в качестве предмета исследования рассматривается программная реализация и экспериментальная апробация ортогонального пространственно-временного блочного кода Аламоути на передаче в сочетании с комбинированием сигналов по критерию максимизации отношения сигнал/шум (Maximum Ratio Combining, MRC) на приемнике, что позволяет использовать потенциал двух антенн как на передающем, так и на принимающем конце.

SDR-подход уже получил широкое распространение в прототипировании и экспериментальной апробации алгоритмов и методов передачи и приема в мобильной радиосвязи [7–11] и позиционирования [12]. Однако все еще остается актуальной задача экспериментальной апробации алгоритмов пространственной обработки сигналов, реализующих использование нескольких антенн на передающей и принимающей сторонах радиоканала стандарта LTE [13]. С целью апробации режима MIMO, реализованного в стандарте LTE, данная статья описывает соответствующие процедуры, их программную реализацию в среде MATLAB и демонстрирует работу средствами платы LibreSDR.

Анализ состояния проблемы в области прототипирования и экспериментальной апробации многоантенных систем стандарта LTE с использованием подхода SDR по открытым зарубежным источникам [14–23] показал высокую актуальность и востребованность данного направления исследований. В работе [14] представлен SDR-макет многоантенной приемной системы, построенной на платах USRP (*аббр. от англ. Universal Software Radio Peripheral — универсальное программное радиоустройство*), способный записывать сигналы базовых станций (БС) стандарта LTE из радиозфира в диапазоне до 6 ГГц и выполнять их последующую постобработку. Одним из практических приложений такой постобработки является калибровка аппаратного тракта USRP посредством конфигурации программно-управляемых параметров на приеме, в том числе фазового сдвига, что критично для макетирования процедур пространственной обработки сигналов в MIMO системах. В работе [15] приводятся результаты экспериментальной апробации алгоритма выбора антенны в многоантенной системе прототипированием на многоканальной платформе USRP-RIO посредством аппаратной прошивки кода HDL в программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС); такой подход характеризуется чрезвычайно высокой трудоемкостью, однако позволяет получить минимальную задержку при пространственной обработке за счет быстрого действия при параллельных вычислениях. В работе [16] описывается прототипирование приемопередатчика стандарта LTE на платах USRP с использованием среды с открытым исходным кодом srsRAN. Такой подход позволяет приступить к экспериментальной апробации достаточно оперативно, так как среда srsRAN реализует весь стек протоколов стандарта LTE, однако проследить выполнение математических операций по пространственной обработке сигналов в MIMO-системах на физическом уровне проблематично. Отдельным направлением работ является программно-аппаратная эмуляция радиоканала MIMO с использованием плат USRP, работающих на передачу и прием в радиозэфире в заданных условиях [17, 18]. Недостатком таких работ является отсутствие возможности как-либо верифицировать опубликованные результаты, так как исходные программные модули на языках HDL [17] и C/C++ [18], реализующие заявленный функционал, в открытый

доступ, как правило, не выкладываются. Исследования, направленные на оценку радиоканалов MIMO, могут использовать антенные системы, имеющие только одну антенну на одном из концов радиоканала; например в работе [19] рассматривается система MISO  $8 \times 1$ . (аббр. от англ. Multiple Input Single Output — системы с множественным входом и единственным выходом). Многоантенные системы следующих поколений мобильной связи также разрабатываются с применением прототипов на основе SDR-плат, как показано в [20], где макет восьмидантенной системы используется для проектирования модуля смартфонов поколения 5G NR. Платформы SDR применяются и для макетирования разрабатываемых в настоящий момент улучшений MIMO для стандарта 4G, как в статье [21], где за счет использования новых протоколов приема и пространственной обработки сигналов достигается увеличение пропускной способности сети при различных отношениях сигнал/шум (ОСШ). В статье [22] предложен зонд радиоканала MIMO  $4 \times 4$  на основе SDR-платформы, предназначенный для исследования особенностей пространственной обработки на железнодорожных путях. Схожая по своей сути оценка работоспособности системы MIMO  $2 \times 2$  при наличии и отсутствии прямой видимости, построенной с использованием плат SDR, описана в работе [23].

Исходя из проведенного анализа области исследования, можно сделать вывод об актуальности и востребованности задачи макетирования и апробации многоантенных систем MIMO стандарта LTE с использованием оборудования SDR-плат. По имеющейся у авторов информации решение данной задачи с использованием платформы LibreSDR до настоящего времени не проводилось.

### Формирование сигнала в режиме MIMO стандарта LTE

Формирование сигнала стандарта LTE включает в себя несколько этапов обработки изначальных бит информации, служащих для обеспечения отлаженной, эффективной и надежной передачи данных по нисходящим и восходящим каналам в сети мобильной связи, состоящей из сотен БС и миллионов пользовательских устройств (UE, аббр. от англ. User Equipment). В данной работе рассматривается формирование сигнала с точки зрения физического и канального уровня модели соединения открытых систем (OSI, аббр. от англ. Open Systems Interconnection) в соответствии со спецификациями 3GPP (аббр. от англ. 3rd Generation Partnership Project — проект партнерства третьего поколения), описывающими технологию LTE. Спецификацией 3GPP TS 36.212 [24] для канального уровня определены следующие процедуры на рисунке 1 при формировании нисходящего сигнала на примере PDSCH (аббр. от англ. Physical Downlink Shared Channel — физический нисходящий общий канал).

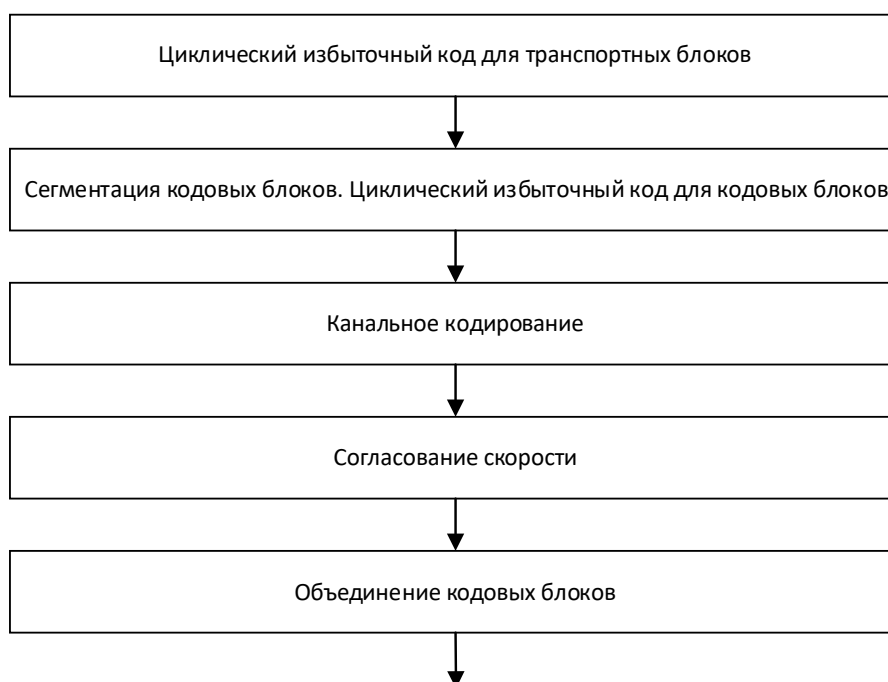


Рис. 1. Схема формирования нисходящего сигнала на канальном уровне LTE

*Этап 1. Присоединение CRC.* Формирование нисходящего сигнала LTE начинается с добавления в конец каждого транспортного блока бит циклического избыточного кода (CRC, аббр. от англ. Cyclic Redundancy Check), предназначенного для обнаружения ошибок. Длина блока определяется используемым полиномиальным генератором и может составлять 24 бит для передачи данных, 16 бит — для нисходящей контрольной информации и 8 бит — для восходящей контрольной информации. Выбор генератора зависит от типа кодируемого канала и требования к обнаружению ошибок. Избыточный код будет рассчитан на приемной стороне и сопоставлен с принятым; в случае обнаружения ошибки приемник выполнит гибридный автоматический запрос повторной передачи (HARQ, аббр. от англ. Hybrid Automatic Repeat Request).

*Этап 2. Сегментация.* Транспортные блоки при слишком большом размере разбиваются на кодовые блоки размером от 40 до 6144 бит в зависимости от конфигурации и возможностей дальнейшего перемежителя турбокодера. Слишком маленькие блоки дополняются незначащими битами в начале. Для кодовых блоков также производится добавление 24 бит CRC в конец каждого блока.

*Этап 3. Канальное кодирование.* Заключается в обработке кодовых блоков одним из методов: сверточным кодером (Tail-Biting Coder) для канала BCH (аббр. от англ. Broadcast Channel — широковещательный канал) или турбокодером с внутренним перемежителем для остальных каналов. Данные алгоритмы в отличие от CRC позволяют исправлять ошибки, а не только обнаруживать их. Турбокодер принимает входные данные и обрабатывает их через два составных кодера, каждый из которых имеет восемь состояний, для генерации битов четности. Систематические (изначальные) биты и получившиеся биты четности затем перемежаются внутри схемы для улучшения эффективности исправления ошибок за счет устранения их группового характера. В результате кодирования образуются три битовых потока, кодовая скорость составляет 1/3.

*Этап 4. Согласование скорости.* Для придания битовому потоку необходимой для заданной модуляционно-кодирующей схемы (MCS, аббр. от англ. Modulation and Coding Scheme) скорости происходит соответствующее согласование числа бит в транспортном блоке и числа доступных ресурсных элементов с перемежением согласно использованному ранее кодеру. Объединенная битовая последовательность преобразуется посредством удаления и копирования некоторых бит из потоков и объединяется в блоки кодовых слов. Количество кодовых слов зависит от канала и схемы передачи: все каналы используют одно кодовое слово, но PDSCH при передаче данных в схеме пространственного мультиплексирования использует два.

Спецификацией 3GPP TS 36.211 [25] определены следующие операции физического уровня для нисходящего трафика (рисунок 2).

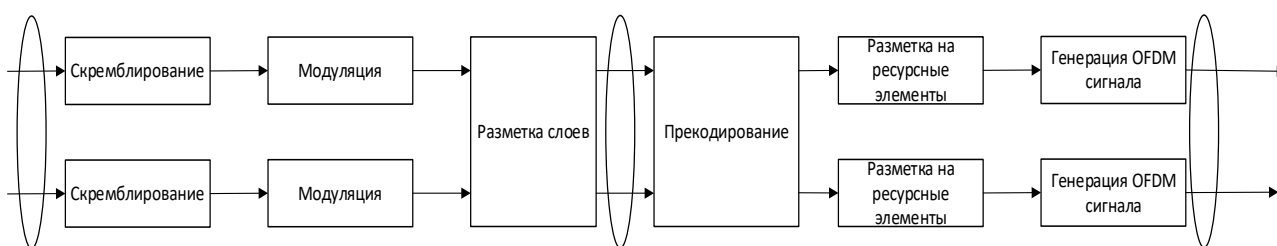


Рис. 2. Схема формирования нисходящего сигнала на физическом уровне

*Этап 5. Скремблирование.* При скремблировании кодовые слова побитово умножаются на ортогональную последовательность и псевдослучайную последовательность, уникальную для каждого UE скремблирующую последовательность, определяемую физическим идентификатором соты и временным идентификатором радиосети (RNTI, аббр. от англ. Radio Network Temporary Identifier). В качестве последовательности в зависимости от назначения могут применяться следующие: код Голда, последовательности Задова — Чу и PN-последовательности (аббр. от англ. Pseudo-Random Noise — псевдослучайный шум). Помимо различения UE процедура предназначена для рандомизации битового потока с целью исключения длинных цепочек нулей и единиц и равномерного распределения энергии сигнала.

В соответствии со спецификацией 3GPP TS 36.211 процедура скремблирования кодовых слов для канала PDSCH заключается в преобразовании блока бит  $b^{(q)}(0), \dots, b^{(q)}(M_{bit}^{(q)} - 1)$ , где  $M_{bit}^{(q)}$  —

число бит кодового слова  $q$ , в блок скремблированных бит  $\tilde{b}^{(q)}(0), \dots, \tilde{b}^{(q)}(M_{bit}^{(q)} - 1)$  в соответствии с формулой:

$$\tilde{b}^{(q)}(i) = (b^{(q)}(i) + c^{(q)}(i)) \bmod 2, \quad (1)$$

где  $c^{(q)}(i)$  – скремблирующая последовательность, определенная кодом Голда:

$$\begin{aligned} c(n) &= (x_1(n + N_C) + x_2(n + N_C)) \bmod 2, \\ x_1(n + 31) &= x_1(n + 3) + x_1(n) \bmod 2, \\ x_2(n + 31) &= x_2(n + 3) + x_2(n + 2) + x_2(n + 1 + x_2(n)) \bmod 2, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N_C = 1600$ ,  $x_1(0) = 1$ ,  $x_1(n) = 0$ ,  $n = 1, 2, \dots, 30$ .

Скремблирующая последовательность инициализируется в начале каждого субкадра значением  $c_{init}$ , которое зависит от типа транспортного канала. Для PDSCH  $c_{init}$  определено следующей формулой:

$$c_{init} = n_{RNTI} \cdot 2^{14} + q \cdot 2^{14} + [n_s/2] \cdot 2^9 + N_{ID}^{cell}, \quad (3)$$

где  $n_{RNTI}$  соответствует RNTI;  $n_s$  – номер слота в кадре;  $N_{ID}^{cell}$  – идентификатор соты.

При программной реализации в среде MATLAB и пакете расширения LTE Toolbox операция скремблирования кодовых слов канала PDSCH производится функцией `ltePDSCHPRBS`. Данная функция возвращает скремблированную последовательность заданной длины, подпоследовательность генератора и инициализирующее значение  $c_{init}$ . В качестве входных аргументов функция принимает конфигурацию БС, включающую в себя идентификатор соты и число субкадров, а также RNTI, индекс кодового слова, требуемую длину скремблированной последовательности, диапазон скремблирования подпоследовательности и тип данных результирующей последовательности.

*Этап 6. Модуляция.* Определяет, сколько бит может быть передано одним ресурсным элементом сетки в соответствии с MCS, и возвращает блок модулированных символов в виде синфазной и квадратурной составляющей в соответствии с наборами определенных спецификацией значений для схем модуляций. В технологии LTE используются следующие схемы: QPSK, 16QAM, 64QAM и 256QAM. При модуляции блок скремблированных бит  $\tilde{b}^{(q)}(0), \dots, \tilde{b}^{(q)}(M_{bit}^{(q)} - 1)$  преобразуется в блок комплексных символов  $\mathbf{d}^{(q)}(0), \dots, \mathbf{d}^{(q)}(M_{bit}^{(q)} - 1)$ .

В пакете LTE Toolbox модуляционное преобразование осуществляется посредством применения универсальной для всех каналов функции `lteSymbolModulate`, принимающей на вход одну или две последовательности бит и схему модуляции для каждого из наборов бит и возвращающей модулированные последовательности.

*Этап 7. Отображение на слои.* Далее символы отображаются на слои, число которых может быть от одного до восьми (нисходящий трафик) в зависимости от числа кодовых слов и передающих антенн. Отображение также отличается для случаев применения распределенной передачи и пространственного мультиплексирования.

При использовании разнесенной передачи возможно применение только двух или четырех слоев, предназначенных для передачи одного кодового слова. При пространственном мультиплексировании одно кодовое слово может передаваться на слоях в количестве от одного до четырех, два кодовых слова могут передаваться на слоях в количестве от двух до восьми.

Один слой используется для передачи одного кодового слова одним антенным портом, в данном случае символы передаются без изменений.

Распределение символов по слоям в зависимости от количества слоев и кодовых слов определено для пространственного мультиплексирования в соответствующей таблице спецификации [25] так, что при нечетном количестве слоев большая их часть служит для передачи второго кодового слова, например, для передачи двух кодовых слов тремя слоями отображение может быть представлено следующим образом:

$$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(i); x^{(1)}(i) = d^{(1)}(2i); x^{(2)}(i) = d^{(1)}(2i + 1). \quad (4)$$

В режиме разнесенной передачи символы поочередно и равномерно распределяются между двумя и четырьмя слоями. Если при отображении (разметке) на четыре слоя количество символов не кратно четырем, то два нулевых символа добавляются в конец слоя:

$$M_{symb}^{layer} = \begin{cases} M_{symb}^{(0)}/4 & \text{if } M_{symb}^{(0)} \bmod 4 = 0 \\ (M_{symb}^{(0)} + 2)/4 & \text{if } M_{symb}^{(0)} \bmod 4 \neq 0 \end{cases}. \quad (5)$$

Для разметки слоев в MATLAB LTE Toolbox используется универсальная для всех каналов функция `lteLayerMap`. Функция принимает на вход последовательность модулированных символов, количество слоев и схему передачи для формирования матрицы символов по слоям.

*Этап 8. Прекодирование.* Происходит разметка на антенные порты для передачи в соответствии с указанным режимом. Для прекодирования символов, передающихся с применением разнесенной передачи или пространственного мультиплексирования, используются прекодирующие матрицы из кодовых книг, определенных БС и UE.

Прекодирование для одного антенного порта  $p$  происходит без преобразований. Для пространственного мультиплексирования прекодирование возможно для случая с циклической задержкой (CDD, аббр. от англ. Cyclic Delay Diversity) и без. В последнем случае получим следующее правило:

$$\begin{bmatrix} y^{(0)}(i) \\ \vdots \\ y^{(P)}(i) \end{bmatrix} = \mathbf{W}(i) \begin{bmatrix} x^{(0)}(i) \\ \vdots \\ x^{(v-1)}(i) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где  $\mathbf{W}(i)$  — прекодирующая матрица размера  $P \times v$  ( $P$  — количество антенных портов,  $v$  — количество слоев). Прекодирующая матрица выбирается из элементов кодовой книги, сконфигурированной БС и UE.

При внесении CDD получим следующее правило:

$$\begin{bmatrix} y^{(0)}(i) \\ \vdots \\ y^{(P)}(i) \end{bmatrix} = \mathbf{W}(i) \mathbf{D}(i) \mathbf{U}(i) \begin{bmatrix} x^{(0)}(i) \\ \vdots \\ x^{(v-1)}(i) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $\mathbf{D}(i)$  — диагональная матрица CDD размера  $v \times v$  — и  $\mathbf{U}$  — матрица размера  $v \times v$  — определены спецификацией для двух, трех и четырех слоев.

Также возможно прекодирование для пространственного мультиплексирования с использованием уникальных для абонентского устройства опорных символов. В таком случае прекодирование осуществляется для антенных портов  $p = \{11, 13\}$  при использовании двух антенн.

Прекодирование для большего количества слоев (до восьми) осуществляется посредством использования антенных портов  $p = \{7, 8, \dots, v+6\}$ :

$$\begin{bmatrix} y^{(7)}(i) \\ y^{(8)}(i) \\ \vdots \\ y^{(v+6)}(i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^{(0)}(i) \\ x^{(1)}(i) \\ \vdots \\ x^{(v-1)}(i) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Прекодирование символов для режима разнесенной передачи определено для двух и четырех антенн фиксированными формулами, в которых квадратурная и синфазная составляющая каждого символа разделяются. При разнесенной передаче для двух антенн прекодирование осуществляется в соответствии со схемой Аламоути:

$$\begin{bmatrix} y^{(0)}(2i) \\ y^{(1)}(2i) \\ y^{(0)}(2i+1) \\ y^{(1)}(2i+1) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & j & 0 \\ 0 & -1 & 0 & j \\ 0 & 1 & 0 & j \\ 1 & 0 & -j & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \operatorname{Re}(x^{(0)}(i)) \\ \operatorname{Re}(x^{(1)}(i)) \\ \operatorname{Im}(x^{(0)}(i)) \\ \operatorname{Im}(x^{(1)}(i)) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Если длина блока символов не кратна четырем, при разнесенной передаче четырьмя антеннами, в конец блока добавляются два нулевых символа, как в выражении (5).

Для прекодирования слоев в MATLAB применяется функция `lteDLPrecode`, имеющая два возможных набора входных аргументов. В первом случае для прекодирования требуются матрица слоев, число антенных портов, схема передачи и кодовая книга. Во втором случае в качестве аргументов выступают матрица слоев, конфигурация БС, включающая в себя число антенных портов, идентификатор соты, число субкадров, число ресурсных блоков и индикатор информации управления, конфигурация канала передачи, включающая в себя схему передачи, индекс используемой кодовой книги, набор индикаторов матрицы прекодирования (PMI, аббр. от англ. Precoding Matrix Indicator) и индексы ресурсных блоков PDSCH.

Матрица прекодирования в MATLAB задается набором функций `PMISet`. Функция `ltePMISelect` позволяет на основе данных о режиме передачи и состоянии канала определить оптимальный набор PMI, информация о котором может быть получена через функцию `ltePMIInfo`. Функция `lteCSICodebook` используется внутри `ltePMISelect` для подбора кодовой книги прекодирования на основе информации о состоянии канала (CSI, аббр. от англ. Channel State Information).

*Этап 9. Разметка на ресурсные элементы.* Для каждого антенного порта блок комплексных символов размечается на ресурсные элементы сетки, не занятые другими физическими каналами, синхронизационными и опорными сигналами. Правила разметки для каждого канала и сигнала заранее определены, что необходимо для корректного приема и извлечения информации из сигнала.

Разметка канала PDSCH производится с помощью функции `ltePDSCHIndices`. Функция принимает на вход конфигурацию БС, конфигурацию канала передачи и индексы физических ресурсных блоков. Результатом работы функции является трехмерная матрица, представляющая сетки ресурсных элементов, соответствующие антенным портам.

*Этап 10. OFDM-модуляция.* Последним этапом обработки является модуляция с применением мультиплексирования с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM, аббр. от англ. Orthogonal Frequency Division Multiplexing), технологии разделения сигнала на множество ортогональных поднесущих, не создающих помех друг другу. OFDM-модуляция повышает спектральную эффективность за счет плотного расположения поднесущих и сочетается со всеми режимами передачи LTE.

В LTE Toolbox OFDM-модуляция осуществляется функцией `lteOFDMModulation`. Входными аргументами функции являются конфигурация БС, ресурсная сетка, параметр окна функции и число точек обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ). Функция осуществляет внесение постоянных поднесущих, вычисление ОБПФ, добавление циклического префикса и сглаживание начала и конца OFDM-символов функцией окна с последующим частичным перекрытием символов для снижения уровня внеполосного излучения. Функция возвращает последовательность временных выборок для каждого антенного порта. Длина последовательности (количество выборок) определяется следующей формулой:

$$T = K \cdot 30720 / 2048 \cdot N_{fft}, \quad (10)$$

где  $K$  — число субкадров ресурсной сетки;  $N_{fft}$  — число отсчетов ОБПФ, число поднесущих, выбираемое в соответствии с числом ресурсных блоков и, следовательно, с шириной полосы сигнала, как показано в таблице 1.

Таблица 1. Соответствие отсчетов ОБПФ и числа ресурсных блоков

Число ресурсных блоков	Число отсчетов ОБПФ
6	128
15	256
25	512
50	1024
75	2048
100	2048

Схема формирования сигнала канала PDSCH (рисунок 2) в рамках пакета LTE Toolbox представлена в виде соответствующих функций на рисунке 3.

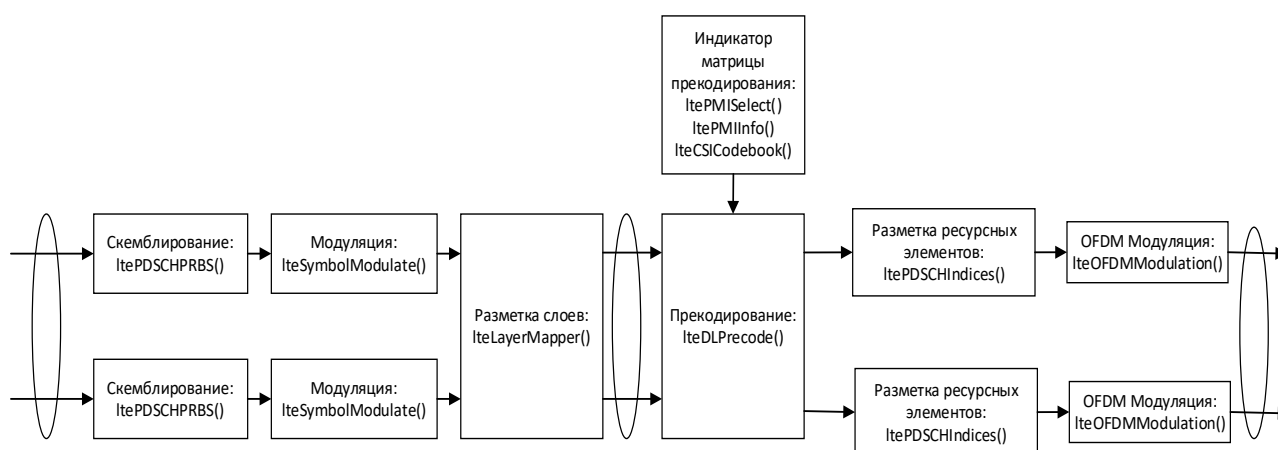


Рис. 3. Схема формирования сигнала PDSCH на физическом уровне в MATLAB

### Режимы передачи MIMO в стандарте LTE

Сети мобильной связи стандарта LTE изначально были рассчитаны на применение технологии MIMO, позволяющей БС и UE использовать несколько антенн для передачи и приема сигналов, таким образом увеличив пропускную способность и уменьшив число ошибок при обмене данными без снижения скорости передачи в условиях многолучевого распространения радиоволн.

Режимы передачи LTE включают в себя: разнесенную передачу, пространственное мультиплексирование (SU-MIMO и MU-MIMO – однопользовательский и многопользовательский MIMO) и управление лучом (Beamforming). В спецификации 3GPP TS 36.213 [26] для передачи данных в нисходящем канале определено 10 режимов передачи, часть которых будет рассмотрена далее, и соответствующие им форматы нисходящей информации управления (DCI, аббр. от англ. Downlink Control Information).

**Разнесенная передача.** Данный режим повышает энергетический запас и компенсирует часть затухания сигнала при распространении, что делает передачу более устойчивой за счет использования на передатчике двух или четырех антенн, каждая из которых может применять свое кодирование и частотный ресурс. Как и режим одиночной передающей антенны, использует форматы DCI 1 и 1A. Разнесенная передача в LTE подразделяется на замкнутую и незамкнутую.

**Замкнутая разнесенная передача.** В этом режиме одни и те же данные передаются одновременно через несколько антенн. Он используется для повышения качества и устойчивости сигнала за счет пространственного разделения канала.

В случае если помеховое воздействие слишком сильное и ОСШ становится слишком низким, осуществляется передача с CDD, при которой для второй копии сигнала вводится фазовый сдвиг, составляющий 180°, определяемый с помощью PMI. Выбор PMI зависит от частоты сигнала и скорости передвижения UE. Получение данной информации вносит временную задержку, из-за чего полученный индекс PMI может оказаться неактуальным, если UE движется относительно быстро.

**Разомкнутая разнесенная передача** в сетях LTE осуществляется по схеме Аламоути, в



соответствии с которой в первый момент времени первая антенна передает первый символ, и вторая передает второй, во второй момент времени первая антенна передает комплексно-сопряженный второй символ, и вторая передает комплексно-сопряженный первый символ с отрицательным знаком. Данный метод также известен как ортогональное пространственно-временное блочное кодирование. Сигналы и пары сигналов оказываются ортогональными по фазе и разнесенными в пространстве и времени, что повышает качество сигнала и снижает количество ошибок на приемнике. Схема Аламути [27] применима только для двух передающих антенн и не требует информации от приемника для прекодирования.

Сигнал, принятый приемным устройством, имеет вид:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{H}\mathbf{S} + \mathbf{N}, \quad (11)$$

где  $\mathbf{H}$  — матрица канала, определенная по опорным символам, принята неизменной во времени;  $\mathbf{N}$  — аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ);  $\mathbf{S}$  — кодовая матрица схемы Аламути:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где  $s_1$  и  $s_2$  — передаваемые символы;  $s_1^*$  — комплексно-сопряженный символ.

Для двух символов, передаваемых в течение двух временных слотов двумя антеннами на одну, выражение (11) приобретает вид:

$$\begin{bmatrix} y_1 & y_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 & -s_2^* \\ s_2 & s_1^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Выражение (13) можно записать как:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

Примем:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Для оценки переданных символов нужно умножить принятый сигнал на псевдообратную матрицу:

$$\mathbf{M}^+ = (\mathbf{M}^H \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^H, \quad (16)$$

где  $\mathbf{M}^H$  — эрмитово сопряженная матрица  $\mathbf{M}$ ;  $(\mathbf{M}^H \mathbf{M})^{-1}$  — диагональная матрица  $(\mathbf{M}^H \mathbf{M})$  с инвертированными диагональными элементами. Оценка принятых символов определяется выражением:

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_1 \\ \hat{s}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M}^+ \begin{bmatrix} y_1 \\ y_1^* \end{bmatrix} = \mathbf{M}^+ (\mathbf{M} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}) = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \mathbf{M}^+ \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (17)$$

Так как АБГШ не скоррелирован с сигналом, применение ортогональной матрицы кодирования символов в схеме Аламути позволяет значительно снизить негативное воздействие многолучевого распространения и повысить ОСШ. Хотя схема Аламути изначально предназначена для реализации режима передачи при двух передающих и одной приемной антенне (MISO), в стандарте LTE разнесенная передача сочетается с разнесенным приемом с применением метода MRC (SIMO, *аббр. от англ.* Single Input Multiple Output — системы с единственным входом и множественным выходом).

*Комбинирование максимальных соотношений.* Комбинирование по критерию MRC — один из основных методов комбинирования разнесенных сигналов, широко используемый в беспроводных системах связи для повышения качества и надежности приема. Метод использует независимость каналов с многолучевыми замираниями каждой приемной антенны для оптимального объединения сигналов, что позволяет усилить общую принимаемую мощность и уменьшить помехи.

При использовании MRC сигнал принимается двумя антеннами (приемными устройствами). Так как антенны разнесены, принимаемые ими сигналы имеют разные пути распространения и, соответственно, подвергаются воздействию разных канальных условий. Перед дальнейшей обработкой сигналы компенсируются с учетом известных канальных коэффициентов. При линейном объединении сигналов на две антенны за счет нескоррелированности шумов, принятых антеннами, результирующий сигнал имеет ОСШ на 3 дБ выше изначального.

Помимо повышения ОСШ, применение MRC позволяет увеличить устойчивость системы к частотно-избирательным замираниям. Так как принятые сигналы имеют разные пути распространения, велика вероятность, что при наличии замираний определенных поднесущих в одном канале те же поднесущие в другом не будут затронуты.

Принятый сигнал описывается выражением (11), которое в общем случае для одного символа  $s$  можем записать следующим образом:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \cdot s + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Канальные коэффициенты  $h_1$  и  $h_2$  представляют собой некоторые комплексные значения, реальная составляющая которых характеризует изменение амплитуды, а мнимая — изменение фазы сигнала. Так как канальные коэффициенты отличаются, то простое объединение сигналов, принятых разными антеннами, не позволит получить максимальное ОСШ.

Введем весовые коэффициенты  $w_1$  и  $w_2$ , с которыми сигнал  $\mathbf{Y}$  примет вид:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{Y} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \cdot s + \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

Весовой коэффициент для сигнала, принятого отдельной антенной, должен быть прямо пропорционален ОСШ, которое в данном случае выражено через реальную часть канального коэффициента. Мнимая компонента весового коэффициента должна, в свою очередь, подавлять фазовый сдвиг, вносимый канальным коэффициентом. Таким образом:

$$|\mathbf{w}| = |\mathbf{h}^*|. \quad (20)$$

Взвешенный сигнал  $\mathbf{Z}$  принимает вид:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} h_1^* \\ h_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \cdot s + \begin{bmatrix} h_1^* \\ h_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |h_1|^2 \\ |h_2|^2 \end{bmatrix} \cdot s + \begin{bmatrix} h_1^* \\ h_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Применение комплексно-сопряженных канальных коэффициентов в качестве весовых коэффициентов позволяет произвести оценку сигнала:

$$\hat{s} = \frac{\mathbf{Z}}{\begin{bmatrix} |h_1|^2 & |h_2|^2 \end{bmatrix}}. \quad (22)$$

Полное ОСШ  $\gamma$  при MRC составляет сумму ОСШ сигнала, принятого каждой из антенн, что показано в выражении:

$$\gamma = \frac{|\mathbf{h}^H \mathbf{h}|^2}{\sigma^2 \mathbf{h}^H \mathbf{h}} = \frac{\mathbf{h}^H \mathbf{h}}{\sigma^2} = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{|h_n|^2}{\sigma^2} = \sum_{n=0}^{N-1} \gamma_n. \quad (23)$$

где  $\gamma_n$  — ОСШ антенны  $n$ ;  $\sigma^2$  — дисперсия АБГШ.

Таким образом, метод MRC за счет применения разнесенного приема позволяет добиться увеличения ОСШ кратно числу антенн и устойчивости к частотно-избирательным замираниям и тем самым повысить надежность сети LTE.

*Пространственное мультиплексирование.* Эта технология используется для повышения спектральной эффективности и пропускной способности сети. Благодаря одновременной передаче нескольких потоков данных повышается общая пропускная способность системы при сохранении надежной связи между устройствами. Пространственное мультиплексирование основано на том, что сигналы, передаваемые через отдельные антенны, испытывают различные замирания из-за разницы в расстоянии, угле и других факторах. Данная технология является вариантом реализации однопользовательского режима MIMO в стандарте LTE и представлена в разомкнутом и замкнутом вариантах.

1. *Разомкнутое пространственное мультиплексирование (OLSM, аббр. от англ. Open Loop Spatial Multiplexing)* — это метод, используемый в системах MIMO для повышения спектральной эффективности и увеличения пропускной способности. Данному режиму передачи соответствует DCI формата 2A.

В режиме OLSM передатчик не располагает информацией о состоянии канала и поэтому не может адаптировать свою стратегию передачи в соответствии с ситуацией. Вместо этого передатчик посылает несколько потоков данных одновременно через разные антенны, не учитывая пространственную корреляцию между ними.

Согласно технической спецификации [25], OLSM передача нисходящего трафика может быть реализована с использованием двух или четырех передающих антенн. В OLSM количество пространственных слоев равно минимальному из числа передающих и принимающих антенн.

Например, если имеются две передающие и четыре приемные антенны, можно использовать только два пространственных слоя. Каждый слой соответствует независимому потоку данных, который предварительно кодируется перед передачей на соответствующую антенну. Матрица прекодирования предназначена для максимизации ОСШ на приемнике за счет использования пространственного разнесения, обеспечиваемого несколькими антеннами.

Разомкнутое пространственное мультиплексирование включает в себя передачу с CDD, которая вводит контролируемый фазовый сдвиг между последовательными символами в пределах одного OFDM-символа. При этом уменьшается межсимвольная интерференция, вызванная частотной селективностью канала, что повышает устойчивость передачи. Кроме того, CDD помогает увеличить количество потоков передачи вместе с рангом эффективной матрицы канала.

В LTE пространственное мультиплексирование с CDD реализуется путем применения заранее определенной схемы циклических сдвигов к модулированным символам перед их отображением на ресурсные элементы канала PDSCH. Количество применяемых циклических сдвигов зависит от числа передающих антенн.

2. *Замкнутое пространственное мультиплексирование (CLSM, аббр. от англ. Closed Loop Spatial Multiplexing)* в отличие от OLSM полагается на измерение состояния канала, проводимое UE с использованием опорных сигналов соты.

Для получения информации о состоянии канала зондирующие опорные символы (SRS, аббр. от англ. Sounding Reference Signal) периодически передаются UE на БС. На основе этих последовательностей SRS БС оценивает матрицу канала и определяет подходящие векторы прекодирования, которые максимизируют качество сигнала на приемнике. Эти векторы прекодирования являются частью DCI формата 2 и передаются обратно в БС по каналам восходящей линии связи.

Механизм обратной связи включает квантование и кодирование оценочной матрицы канала в кодовые книги, предоставляемые спецификацией. После получения DCI БС применяет соответствующий прекодер перед передачей потоков данных.

Режим CLSM осуществляется с передачей на двух или четырех антеннах.

*Многопользовательский MIMO (MU-MIMO, аббр. от англ. MultiUser MIMO).* Технология, определенная в спецификации [26] режимом передачи TM5, основана на использовании нескольких антенн как на БС, так и на UE. БС использует прекодирование для передачи различных потоков данных каждому UE в одном и том же блоке ресурсов, а UE использует несколько антенн для приема потоков данных. Метод прекодирования, используемый в TM5, является замкнутым, что означает, что БС использует обратную связь от UE для корректировки матрицы прекодирования, применяемой для передачи потоков данных.

MU-MIMO использует замкнутую схему прекодирования, как и замкнутое пространственное мультиплексирование, и формат DCI 1D. Основное преимущество данного режима передачи заключается в возможности размещения нескольких пользователей в одной полосе частот без взаимных помех, что обеспечивает оптимальное использование спектра. Кроме того, такой подход значительно увеличивает пропускную способность системы и повышает ее производительность, особенно в сетях высокой плотности.

Использование MU-MIMO в TM5 может значительно повысить спектральную эффективность системы, но при этом требует тщательной координации между БС и UE. БС должна обеспечить, разнесение сигналов и потоков для абонентских устройств, а те, в свою очередь, должны точно оценить матрицу каналов и обеспечить обратную связь с БС.

### **Физический нисходящий общий канал в режиме MIMO стандарта LTE**

Канал PDSCH предназначен для передачи транспортных каналов: нисходящего общего канала и канала пейджинга. PDSCH в LTE передает пользовательские данные, управляющую информацию, ширококвещательные и групповые данные от БС в нисходящем потоке.

Конкретное содержание и структура информации, передаваемой через PDSCH, зависят от типа передаваемых данных. DCI является одним из типов данных, передаваемых PDSCH. DCI передается в виде управляющих сообщений определенных форматов, которые предоставляют UE необходимую информацию для приема и декодирования данных PDSCH.

Сообщения DCI в общем виде могут включать: а) распределение ресурсов PDSCH, назначенных UE, таких как количество ресурсных блоков и их OFDM-символов; б) индекс MCS, определяющий комбинацию схемы модуляции и скорости кодирования, которые будут использоваться для передачи PDSCH; в) размер транспортного блока и индекс версии избыточности, которые определяют параметры согласования скорости и канального кодирования для передачи PDSCH; г) номер процесса HARQ и индикатор новых данных, чтобы UE могло выполнить коррекцию ошибок на основе HARQ.

PDSCH может использоваться для передачи ширококвещательных и групповых многоадресных данных, таких как системная информация, пейджинговые сообщения и другая общая информация, предназначенная для нескольких UE. В этом случае ресурсы PDSCH не выделяются специально для отдельных UE, а совместно используются всеми UE в соте.

Ширококвещательные/многоадресные данные могут включать различные типы системной информации, такие как главный информационный блок (MIB, аббр. от англ. Master Information Block) и системные информационные блоки (SIB, аббр. от англ. System Information Block).

Спецификация 3GPP TS 36.212 определяет форматы DCI, сценарии их применения и передаваемые ими данные. В таблице 2 отображены форматы DCI, используемые режимами передачи TM1–TM10.

В соответствии с 3GPP TS 36.331 [28] системная информация разделена между главным и несколькими информационными блоками информации. MIB, передаваемый каналом BCH, включает в себя ограниченное число самых важных и часто передаваемых параметров, необходимых для получения другой информации от соты. Первый блок системной информации SIB1 содержит список планирования информации, конфигурирующий порядок других SIB в сообщениях системной информации. Каждый SIB передается только один раз и только в одном сообщении. Сообщение может содержать несколько разных SIB, если они имеют одну и ту же периодичность в списке планирования. SIB2 всегда передается в первом сообщении. Блоки SIB в сообщениях системной информации и отдельный SIB1 передаются нисходящим общим каналом. SIB1 также может передаваться по выделенным каналам.

Таблица 2. Форматы DCI

Формат DCI	Сценарий применения	Применение
0	Одиночный антенный порт, широковещание, групповое вещание	Планирование физического восходящего общего канала (PUSCH, аббр. от англ. Physical Uplink Shared Channel). Распределение ресурсов восходящего общего канала
1	Одиночный антенный порт, разнесенная передача, управление лучом. Режимы 1, 2, 7	Планирование одного кодового слова PDSCH
1A	Одиночный антенный порт, разнесенная передача. Режимы 1–10	Компактное планирование одного кодового слова PDSCH при пейджинге и случайном доступе к присоединенному UE
1B	Замкнутое пространственное мультиплексирование с одним передающим слоем (SpatialMux). Режим 8	Компактное планирование одного кодового слова PDSCH и передача информации о прекодировании
1D	MU-MIMO (Posrt7-14). Режим 5	Компактное планирование одного кодового слова PDSCH и передача информации о прекодировании и отклонении мощности
2	Замкнутое пространственное мультиплексирование (SpatialMux). Режим 4	Планирование одного кодового слова PDSCH в режиме замкнутой разнесенной передачи
2A	Незамкнутое пространственное мультиплексирование (CDD). Режим 3	Планирование одного кодового слова PDSCH
2B	Управление лучом с поддержкой двух слоев передачи. Режим 8	Планирование PUSCH в соответствии с режимом передачи
2C	Поддержка восьми слоев передачи (Posrt7-14). Режим 9	
2D	Поддержка восьми слоев передачи (Posrt7-14). Режим 10	

Блок MIB передается с фиксированным периодом 40 мс в нулевом субкадре каждого 4-го кадра и повторяется также каждые 40 мс в нулевом субкадре каждого другого кадра. MIB содержит количество ресурсных блоков для определения ширины полосы нисходящего канала, номер системного кадра.

Блок SIB1 передается с фиксированным периодом 80 мс в пятом субкадре каждого восьмого кадра и повторяется каждые 80 мс в пятом субкадре каждого второго кадра. SIB1 содержит: а) информацию для подключения к сектору: список идентификаторов публичных территориальных мобильных сетей (PLMN, аббр. от англ. Public Land Mobile Network), идентификатор зоны отслеживания (TAC, аббр. от англ. Tracking Area Code); б) информацию для выбора соты: идентификаторы сот, флаги возможности выбора сот, минимальный уровень радиосигнала для подключения; в) список планирования информации: периодичность системных сообщений и разметку других SIB на сообщения; г) индикатор полосы частот, метку изменения системных сообщений и интервал передачи сообщения.

### Экспериментальная апробация режима MIMO в стандарте LTE

Макетирование разнесенных передачи по схеме Аламоути и приема методом MCR проводится на макете, состоящем из двух пар типа «компьютер — отладочная плата LibreSDR», представляющих передатчик БС и приемник UE. Характеристики платы LibreSDR приведены в таблице 3.

Плата LibreSDR оборудована четырьмя коаксиальными разъемами: разъемы 1А и 2А приемных каналов, 1В и 2В передающих каналов. К соответствующим разъемам присоединены штыревые антенны из комплекта поставки плат по две для передатчика и приемника для реализации MIMO в конфигурации 2×2. Расстояние между антеннами передатчика — 5 см, между антеннами приемника — 1,5 см. Эксперимент проводится в лабораторных условиях при прямой видимости, дистанция между приемником и передатчиком составляет 10 м.

Также платы подключены к компьютерам по двум USB-разъемам: OTG, предназначенному для доступа в консоль встроенной операционной системы платы, и Debug, предназначенному для отладки и загрузки встроенного программного обеспечения, однако в рамках эксперимента данные подключения используются только для обеспечения питания платы. Передача синфазных и квадратурных составляющих сигналов осуществляется посредством Ethernet-соединения. Схема макета представлена на рисунке 4.

Таблица 3. Технические характеристики платы LibreSDR.

Параметр	Значение
Семейство ПЛИС	Artix-7
Количество логических ячеек	28 000
Количество таблиц поиска (LUT)	17 600
Количество регистров-защелок	35 200
Объем памяти, Мбит	2,1
Количество блоков DSP	80
Модель трансивера	конфигурация AD9361
Количество каналов	2 TX, 2 RX
Разрядность ЦАП/АЦП	12 бит
Несущие частоты TX	от 47 МГц до 6 ГГц
Несущие частоты RX	от 70 МГц до 6 ГГц
Поддержка дуплексов	TDD и FDD
Полоса пропускания	от 200 кГц до 56 МГц

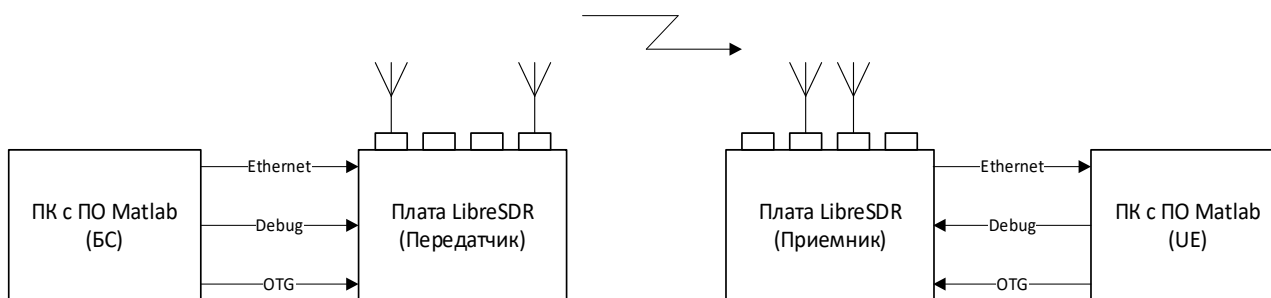


Рис. 4. Схема макета БС и UE

На рисунке 5 показан экспериментальный стенд, платы в иллюстративных целях размещены в ближней зоне распространения сигнала, однако дальнейшие результаты измерений приведены для указанного ранее разнесения плат на дистанцию 10 м.

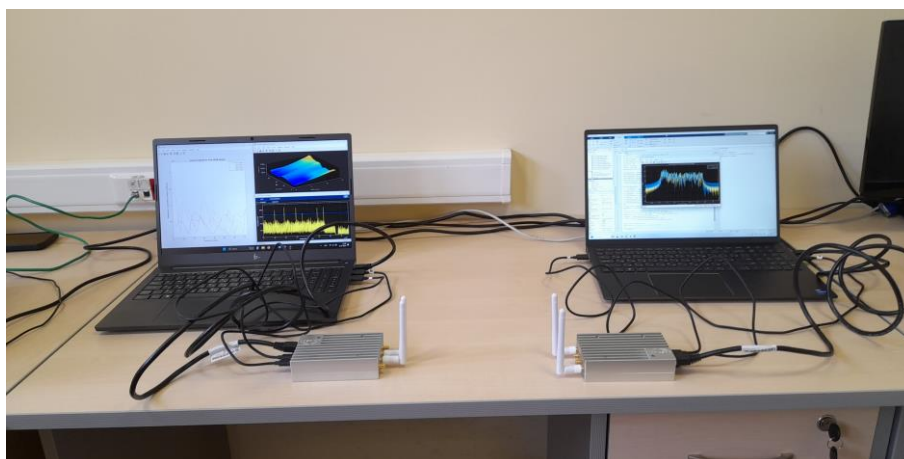


Рис. 5. Макет БС и UE. Передатчик (справа) и приемник (слева) расположены в ближней зоне диаграмм направленности антенн

Для формирования нисходящего сигнала используется определенная спецификацией 3GPP TS 36.101 [29] контрольно-измерительный канал R.12, содержащий стандартные параметры: а) число ресурсных блоков, соответствующее минимально возможной полосе LTE 1,4 МГц, в которой осуществляется передача системной информации; б) используемая схема модуляции QPSK, также применяемая для передачи каналов управления; в) режим передачи по умолчанию — «TxDiversity», соответствующий схеме Аламоути. Дополнительно для проверки осуществления передачи формируется блок системной информации SIB1 в соответствующем режиме передачи формате DCI «Format1A».

Параметры макета БС передатчика заданы следующим кодом [30]:

```
rmc = lteRMCDL('R.12');  
rmc.CellRefP = 2;  
rmc.PDSCH.NLayers = 2;  
rmc.PDSCH.Modulation = 'QPSK';  
rmc.NCellID = 65;  
rmc.NFrame = 100;  
rmc.TotSubframes = 8*10;  
rmc.OCNGPDSCHEnable = 'On';  
rmc.PDSCH.RNTI = 61;  
rmc.SIB.Enable = 'On';  
rmc.SIB.DCIFormat = 'Format1A';  
rmc.SIB.AllocationType = 0;  
rmc.SIB.VRBStart = 0;  
rmc.SIB.VRBLength = 6;  
rmc.SIB.Gap = 0;  
rmc.SIB.Data = randi([0 1],144,1);  
trData = [1;0;0;1];  
[eNodeBOutput,txGrid,rmc] = lteRMCDLTool(rmc,trData);
```

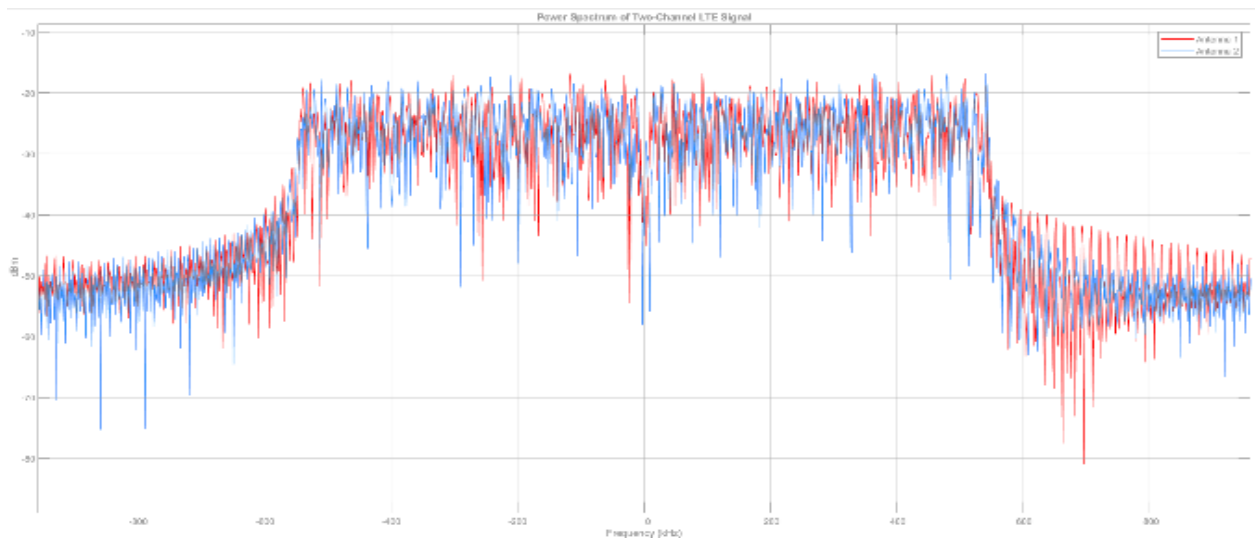
При передаче посредством платы LibreSDR задаются центральная частота 900 МГц, как часто используемая реальными БС LTE, полоса частот и частота дискретизации, согласованные с шириной полосы сигнала, и количество используемых для передачи антенн. Сама плата определена IP-адресом порта передачи данных. Код конфигурации передатчика:

```
tx = adi.AD9361.Tx('uri','ip:192.168.2.3');  
tx.CenterFrequency = 900e6;  
tx.RFBandwidth = rmc.SamplingRate;  
tx.EnabledChannels = [1 2]; % Число используемых каналов  
tx.DataSource = 'DMA'; % Источник данных внешний  
tx.EnableCyclicBuffers = true; % Циклический буфер передачи  
tx.AttenuationChannel0 = -20;  
tx.AttenuationChannel1 = -20;
```

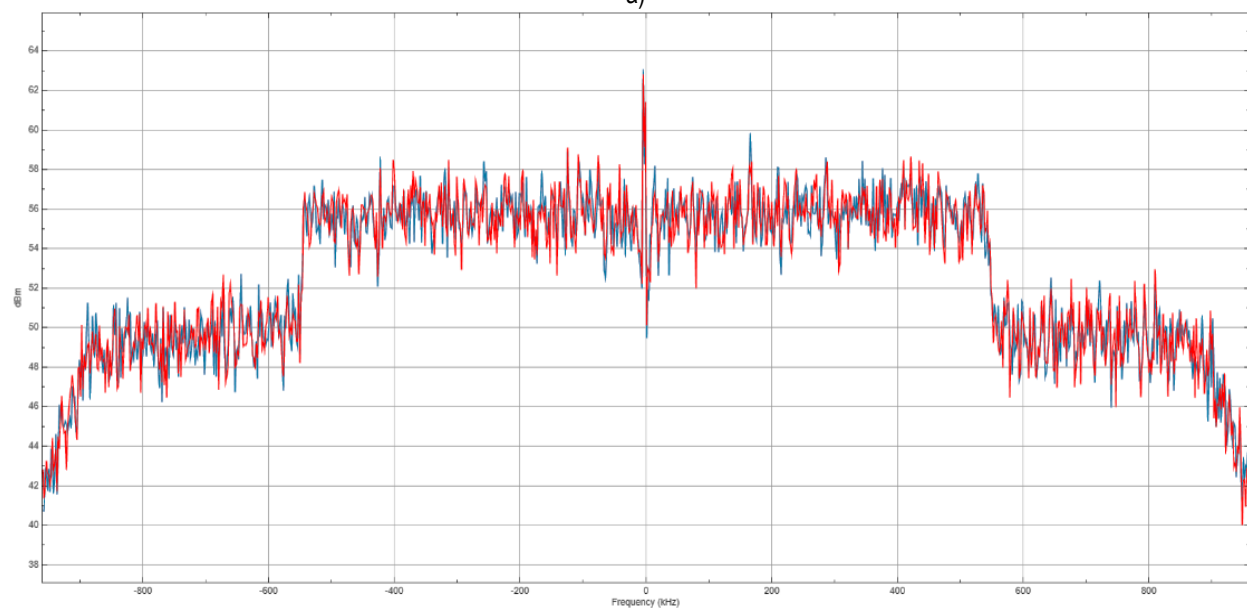
Сформированный на передающей стороне сигнал изображен на рисунке 6а. На рисунке 6б показан сигнал, принятый двумя антеннами в лабораторных условиях при наличии шумов.

В ходе работы программы БС передатчик ведет трансляцию восьми кадров, формат которых определяется параметром `rmc.TotSubframes`. Во время передачи производится запуск программы UE приемника. Запись сигнала из эфира ведется в течение времени равному длительности восьми кадров для увеличения вероятности корректного приема интересующих блоков информации MIB и SIB1.

Макет приемного пользовательского устройства UE выполняет синхронизацию с записанными из эфира отсчетами переданного сигнала по частоте и двум сигналам синхронизации: PSS (*аббр. от англ. Primary Synchronization Signal* — первичный сигнал синхронизации) и SSS (*аббр. от англ. Secondary Synchronization Signal* — вторичный сигнал синхронизации). На рисунке 7 изображен график синхронизирующих сигналов и обнаруженных опорных символов, имеющих уровень выше порога, что свидетельствует о синхронизации во времени.



а)



б)

Рис. 6. Спектрограмма переданного (а) и принятого (б) сигнала

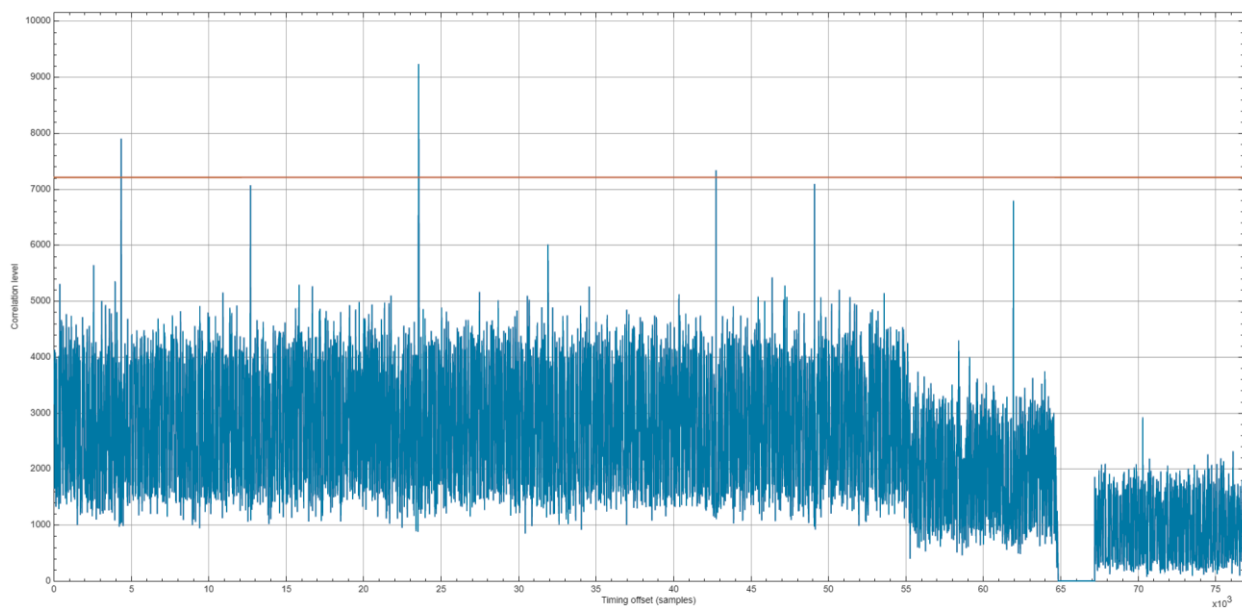


Рис. 7. График корреляции PSS / SSS для первого кадра

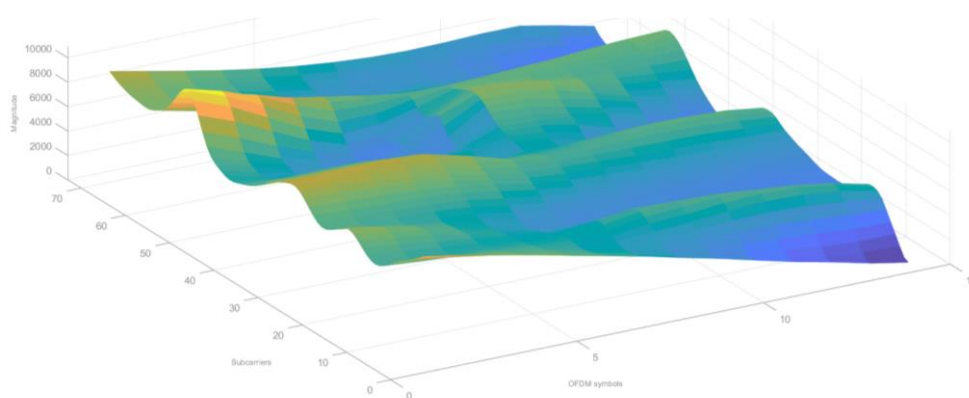


После приема данных сигналов абонентское устройство проводит анализ 72 центральных несущих, занимающих полосу 1,4 МГц. Успешно извлеченные из этой полосы MIB и SIB1 дают информацию о параметрах канала PDSCH, в том числе о режиме передачи — разнесенной передаче по схеме Аламути и двух передающих слоях (параметр NLayers), что отображено на рисунке 9.

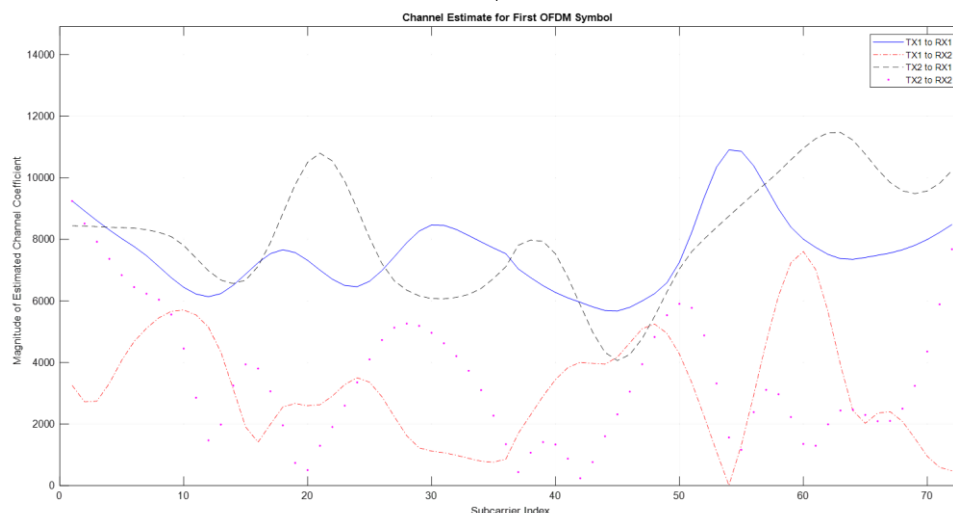
```
PDSCH settings after DCI decoding:
  RNTI: 65535
  PRBSet: [6x1 uint64]
  NLayers: 2
  CSI: 'On'
  Modulation: {'QPSK'}
  RV: 3
  TxScheme: 'TxDiversity'
  NTurboDecIts: 5
```

Рис. 8. Данные конфигурации канала PDSCH из командного окна MATLAB

Разнесенный прием по методу MCR применяется автоматически в соответствии с режимом передачи. Подтвердить это можно, проведя анализ канала MIMO 2×2 с оценкой канальных коэффициентов. На рисунке 9а изображен график оценки канальных коэффициентов одной комбинации передающей и принимающей антенн для массива принятых символов. На рисунке 9б приведен график канальных коэффициентов между всеми передающими и принимающими антеннами для одного OFDM-символа — ненулевые значения для всех комбинаций антенн свидетельствуют о применении разнесенного приема.



а)



б)

Рис. 9. Коэффициенты передачи MIMO 2×2 для: а) массива OFDM-символов; б) одного OFDM-символа

## Заключение

В настоящей работе было проведено макетирование одного из режимов передачи стандарта LTE — разнесенной передачи по схеме Аламоути на платформе LibreSDR; также был продемонстрирован разнесенный прием методом комбинирования максимальных соотношений с применением двух антенн на обоих концах радиоканала. Совокупное применение этих методов значительно повышает ОСШ на приемной стороне и позволяет подтвердить передачу и прием сигналов из радиоэффира несколькими каналами с последующей обработкой и извлечением информации, что говорит об успешной экспериментальной апробации и возможности дальнейшей реализации систем MIMO стандарта LTE средствами среды MATLAB и платформы LibreSDR в условиях полевых испытаний.

В ходе дальнейших исследований планируется проведение описанного эксперимента при различных удалениях передатчика и приемника с измерением числа битовых ошибок в качестве объективной метрики.

## Литература

1. Степанец И. В., Фокин Г. А., Мюллер А. Способы оценки пропускной способности систем massive MIMO // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 10. С. 64–69. DOI:10.24411/2072-8735-2018-10159. EDN: YMWVQL
2. Степанец И., Фокин Г. Особенности реализации Massive MIMO в сетях 5G // Первая миля. 2018. № 1 (70). С. 46–52. DOI: 10.22184/2070-8963.2018.70.1.46.52. EDN: YRTPDW
3. Степанец И. В., Фокин Г. А. Оценка показателей качества разнесенного приема систем Massive MIMO // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2018). Сборник научных статей VII Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 28 февраля–01 марта 2018 г.). СПб.: СПбГУТ, 2018. Т. 3. 2018. С. 279–284. EDN: VRUCFI
4. Лазарев В. О., Фокин Г. А. Особенности реализации и перспективы развития технологии Massive MIMO в сетях 5G // Интернет вещей и 5G (INTHITEN 2017). Материалы 3-й международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Санкт-Петербург, 20 декабря 2017 г.). СПб.: СПбГУТ, 2017. С. 186–190. EDN: YSZPAG
5. Мамонтов Д. Е., Фокин Г. А. Использование технологий MASSIVE MIMO в сетях 5G // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. сборник научных статей (АПИНО 2021). Сборник научных статей X Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 24–25 февраля 2021 года). СПб.: СПбГУТ, 2021. Т. 3. С. 236–241. EDN: MYCJPU
6. Никитин И. А., Фокин Г. А. Применение MIMO для радиосвязи в миллиметровом диапазоне. Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2022). Сборник научных трудов XI Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 15–16 февраля 2022 г.) СПб.: СПбГУТ, 2022. Т. 3. С. 319–324. EDN: NTCERB
7. Фокин Г. А., Буланов Д. В., Волгушев Д. Б. Модельно-ориентированное проектирование систем радиосвязи на основе ПКР // Вестник связи. 2015. № 6. С. 26–30. EDN: XDCTPR
8. Фокин Г. А., Лаврухин В. А., Волгушев Д. А., Киреев А. В. Модельно-ориентированное проектирование на основе SDR // Системы управления и информационные технологии. 2015. № 2 (60). С. 94–99. EDN: TWKVQB
9. Фокин Г. А. Современные тенденции в области программно-конфигурируемого радио // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2017). Сборник научных статей VI Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 01–02 марта 2017 г.). СПб.: СПбГУТ, 2017. Т. 1. С. 271–276. EDN: ZECFGR
10. Волгушев Д. Б., Киреев А. В., Фокин Г. А. Модельно-ориентированный синтез систем радиосвязи на основе программно-конфигурируемого радио // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. (АПИНО 2015). Сборник научных статей IV Международной научно-технической и научно-методической конференции (Санкт-Петербург, 03–04 марта 2015 г.). СПб.: СПбГУТ, 2015. Т. 1. С. 50–53. EDN: UNVNCF

11. Лаврухин В. А., Фокин Г. А. Разработка LPD-приемопередатчика с поддержкой MIMO на основе программно-конфигурируемого радио в приложении к управлению роботом // *Extreme Robotics*. 2016. Т. 1. № 1. С. 119–128. EDN: XERWIZ
12. Борисов Е. Г., Машков Г. М., Фокин Г. А. Экспериментальный стенд оценки точности позиционирования на основе программно-конфигурируемого радио // *Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании*. (АПИНО 2016). Сборник научных статей V Международной научно-технической и научно-методической конференции. (Санкт-Петербург, 10–11 марта 2016 г.). СПб.: СПбГУТ, 2016. Т. 1. С. 120–125. EDN: WZINRT
13. Фокин Г. А., Шеремет Н. В., Рютин К. Е., Гришин И. В. Лабораторные испытания SDR демонстратора передачи и приема сигнала LTE с двух антенн // *Сборник докладов 79-й Научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, посвященной Дню радио*. 2024. № 1 (79). С. 170–173. EDN: ZRYTXS
14. Izydorczyk T., Tavares F. M. L., Berardinelli G., Mogensen P. A USRP-Based Multi-Antenna Testbed for Reception of Multi-Site Cellular Signals // *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*. 2019. Vol. 7. PP. 162723–162734. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2952094
15. Zhang P., Jiajun X., Shida Z., Haogang F. Design of Reconfigurable SDR Platform for Antenna Selection Aided MIMO Communication System // *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*. 2019. Vol. 7. PP. 169267–169280. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2946720
16. Rao R. M., Ha S., Marojevic V., Reed J. H. LTE PHY Layer Vulnerability Analysis and Testing Using Open-Source SDR Tools // *Proceedings of IEEE Military Communications Conference (MILCOM-2017, Baltimore, MD, USA, 23–25 October 2017)*. IEEE, 2017. PP. 744–749. DOI: 10.1109/MILCOM.2017.8170787
17. Schwind A., Berlt P., Lorenz M., Schneider C., Hein M. A. Implementation of a MIMO Channel Emulator for Over-the-Air LTE Testing Using Software Defined Radio // *Proceedings of 11<sup>th</sup> German Microwave Conference (GeMiC, Freiburg, Germany, 12–14 March 2018)*. IEEE, 2018. PP. 307–310. DOI: 10.23919/GEMIC.2018.8335091
18. Chen R., Cai Q., Alecke K., Lazar O., Kaiser T. A Real-Time pre-MIMO-LTE Software Radio Testbed // *Processings of 15<sup>th</sup> European Signal Conference (EUSIPCO, Poznan, Poland, 03–07 September 2007)*. IEEE, 2007. PP. 1844–1848.
19. Buey C., Ratajczak P., Ferrero F., Lizzi L., Magounaki T. et al. Validation of an Open Source Software Defined Radio Test Bed // *Proceedings of 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting (San Diego, CA, USA, 09-14 July 2017)*. IEEE, 2017. PP. 1875–1876. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072980
20. Lu X., Ni L., Jin S., Wen C.-K., Lu W.-J. SDR Implementation of a Real-Time Testbed for Future Multi-Antenna Smartphone Applications // *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*. 2017. Vol. 5. PP. 19761–19772. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2751622
21. Verdecia-Peña R., Alonso J. I. A Comparative Experimental Study of MIMO A&F and D&F Relay Nodes Using a Software-Defined Radio Platform // *Electronics*. 2021. Vol. 10. PP. 570–594. DOI: 10.3390/electronics10050570
22. Behaegel R. Sub 6 GHz MIMO Channel Sounder Development Based on Software Defined Radio Boards and LTE Signal. These. Microelectronics. Université de Lille, 2021. URL: <https://theses.hal.science/tel-03613677>
23. Nehete V. D. Experimental Evaluation of 2x2 MIMO in LOS and NLOS Channels Using NI USRP-2953R. PhD diss. Queensland University of Technology, 2016. 85 p. DOI:10.1007/s42979-022-01649-1
24. 3GPP TS 36.212 V12.4.0 (2015-03). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (Release 12). URL: [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.212/36212-c40.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.212/36212-c40.zip) (дата обращения 30.04.2024)
25. 3GPP TS 36.211 V12.4.0 (2015-02). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 12). URL: [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.211/36211-c40.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.211/36211-c40.zip) (дата обращения 30.04.2024)
26. 3GPP TS 36.213 V12.4.0 (2015-02). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 12). URL: [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.213/36213-c40.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.213/36213-c40.zip) (дата обращения 30.04.2024)
27. Alamouti S. M. A simple transmit diversity technique for wireless communications // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 1998. Vol. 16. Iss. 8. PP. 1451–1458. DOI: 10.1109/49.730453

28. 3GPP TS 36.331 V12.4.0 (2014-12). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (Release 12). URL: [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.331/36331-c40.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.331/36331-c40.zip) (дата обращения 30.04.2024)

29. 3GPP TS 36.101 V12.4.0 (2015-03). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 12). URL: [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36\\_series/36.101/36101-c40.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.101/36101-c40.zip) (дата обращения 30.04.2024)

30. LTE Toolbox. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/lte> (дата обращения 30.04.2024)

**Статья поступила 12 июля 2024 г.  
Одобрена после рецензирования 26 июля 2024 г.  
Принята к публикации 27 июля 2024 г.**

### **Информация об авторах**

*Шеремет Никита Викторович* — магистрант 1-го года обучения (группа Р-32м) Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: [sidwavedata@gmail.com](mailto:sidwavedata@gmail.com)

*Фокин Григорий Алексеевич* — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. E-mail: [fokin.ga@sut.ru](mailto:fokin.ga@sut.ru)

## Experimental Testing of MIMO Technology of the LTE Standard Using Software-Defined Radio

N. Sheremet ✉, G. Fokin

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Purpose:** experimental testing of existing wireless telecommunication systems, such as Multiple Input Multiple Output (MIMO) technology in the Long-Term Evolution (LTE) standard, is an example of a current and popular trend in the use of software-defined radio methods and tools for prototyping and prototyping mobile radio communication and positioning systems. The purpose of the work is to test the functionality of the multi-antenna radio communication mode in the LTE standard by performing diversity transmission with two antennas and combining reception with two antennas using a software-defined radio. **Methods:** the implementation of diversity transmission and reception methods is considered by using the orthogonal space-time Alamouti block code at the transmitter in combination with combining according to the criterion of maximizing the maximum ratio combining signal-to-noise ratio at the receiver. For the purpose of experimental testing of the MIMO mode, a software implementation of diversity transmission and reception is carried out in the MATLAB environment using LibreSDR software-defined radio boards. **Result:** as a result of the prototyping carried out on the receiving side, experimental estimates of the channel transmission coefficients for the MIMO 2×2 scheme were obtained, based on which, as a first approximation, a conclusion was made about the spatial decorrelation of the two channels during transmission and reception in laboratory conditions. The element of **novelty** of the work is the setting up of an experiment and analysis of the results on the peculiarities of the functioning of the MIMO mode of the LTE standard in laboratory conditions using LibreSDR software-defined radio boards. **Theoretical / Practical relevance:** experimental testing of the MIMO mode specified by the LTE standard using software-defined radio in laboratory conditions confirms the possibility and feasibility of conducting such studies with real signals from operator base stations on the LibreSDR board.

**Key words:** Long-Term Evolution (LTE) standard, Multiple Input Multiple Output (MIMO), software-defined radio, Alamouti scheme, MATLAB

### Information about Authors

*Sheremet Nikita* – B.Sc., master student of R-32m group (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: sidwavedata@gmail.com

*Fokin Grigoriy* – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Radio Communications and Broadcasting (The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications). E-mail: fokin.ga@sut.ru