

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ SDR ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЗАДАЧ СЕТЕВОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ. ФОРМИРОВАНИЕ ОПОРНЫХ СИГНАЛОВ LTE

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-5-28-47

Фокин Григорий Алексеевич,
СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
г. Санкт-Петербург, Россия, grihafokin@gmail.com

Manuscript received 22 April 2022;
Accepted 16 May 2022

Волгушев Дмитрий Борисович,
СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
г. Санкт-Петербург, Россия, d.volgushev@yandex.ru

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-00528). <https://rscf.ru/project/22-29-00528/>

Харин Виталий Николаевич,
ООО "Лаборатория инфокоммуникационных сетей",
г. Санкт-Петербург, Россия, kh.vet@labics.ru

Ключевые слова: 4G, LTE, PSS, SSS, CRS, PRS, SDR, позиционирование

Анализ состояния проблемы построения прототипов технологии сетевого позиционирования четвертого и пятого поколений с использованием подхода модельно-ориентированного проектирования и программно-конфигурируемого радио SDR (Software-Defined Radio) по открытым зарубежным источникам показал высокую актуальность и востребованность данного направления исследований. В то же время в отечественных источниках данному направлению исследований и разработок уделяется недостаточно внимания. Предложен облик разрабатываемого SDR демонстратора технологии сетевого позиционирования. Задачей разработки демонстратора является обоснование технических решений по повышению точности определения местоположения устройств в современных и перспективных сетях связи в условиях отсутствия сигналов глобальной навигационной спутниковой системы. Целью использования SDR технологии для задач сетевого позиционирования является получение возможности совершенствования разрабатываемых технических решений в процессе их фактической эксплуатации. Разрабатываемый демонстратор включает следующие подсистемы: подсистема макетов базовых станций eNB с известными координатами, реализующих формирование и передачу опорных сигналов стандарта LTE; макет пользовательского устройства UE, реализующий прием и обработку опорных сигналов стандарта LTE, а также первичную обработку измерений по опорным сигналам стандарта LTE; подсистема синхронизации макетов базовых станций eNB, реализующая раздачу сигнала временной метки; подсистема управления SDR демонстратором, реализующая управление процедурами сбора первичных измерений сетевого позиционирования и их вторичную обработку с результирующей оценкой координат пользовательского устройства UE. Также в настоящей статье приводится описание результатов программно-аппаратной реализации и экспериментальной апробации формирователя опорных сигналов стандарта LTE на SDR устройствах USRP в среде Matlab. Процедура формирования опорных сигналов однозначно определяется идентификатором соты, а сам формирователь является составной частью разрабатываемого макета SDR технологии сетевого позиционирования. Экспериментальная апробация формирователя опорных сигналов в лабораторных условиях с использованием средств объективного контроля показала корректное определение идентификатора группы и идентификатора соты внутри группы, которые однозначно определяют предварительно установленный идентификатор соты.

Информация об авторах:

Фокин Григорий Алексеевич, д.т.н., доцент, доцент Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия

Волгушев Дмитрий Борисович, научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия

Харин Виталий Николаевич, к.т.н., начальник отдела контроля и испытаний ООО "Лаборатория инфокоммуникационных сетей", г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Фокин Г.А., Волгушев Д.Б., Харин В.Н. Использование SDR технологии для задач сетевого позиционирования. Формирование опорных сигналов LTE // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №5. С. 28-47.

For citation:

Fokin G.A., Volgushev D.B., Kharin V.N. Development of SDR-based network positioning technology. LTE reference signals generation. T-Comm, vol. 16, no.5, pp. 28-47. (in Russian)

Введение

Эволюция технологий мобильной связи LTE/LTE Advanced [1] и 5G [2] привела к совершенствованию архитектуры построения сетей, совершенствованию методов передачи, приема и обработки сигналов, а также к новым требованиям по синхронизации [3]. Вместе с новыми технологиями передачи данных в сетях мобильной связи развиваются и новые услуги, в том числе, приложения *сетевое позиционирования*. Актуальность и востребованность данного направления в последние годы подтверждается объемными трудами в отечественной [4, 5] и зарубежной [6-8] научно-технической литературе. Прорывным рубежом в развитии технологий сетевого позиционирования обоснованно можно считать переход к сетям пятого поколения, в которых технические возможности определения местоположения (ОМП) подвижных устройств с использованием стационарной инфраструктуры в экосистеме 5G рассматриваются как *цель* при предоставлении новых услуг геолокации [9], а также как *средство* при использовании данных о местоположении для повышения показателей функционирования сети [10]. Требования к точности оценки координат устройств, а также другие характеристики технологий ОМП формализованы в виде соответствующих сценариев позиционирования в сетях 5G [11, 12].

Несмотря на достаточно высокую публикационную активность в области сетевого позиционирования пятого и последующих поколений в отечественной и зарубежной научно-технической литературе опыта практической реализации данных технологий на сегодняшний день в проектируемых и развертываемых сетях 5G NR явно недостаточно. В то же время на сегодняшний день накоплен и систематизирован достаточный практический опыт в области технологий позиционирования в сетях LTE (Long-Term Evolution) [13-34].

С точки зрения теории радионавигации по типу первичных измерений различают дальномерные [13], разностно-дальномерные [14-17] и угломерные [18, 19] методы позиционирования, в том числе, с использованием круговой антенной решетки [20, 21]. Разностно-дальномерный метод, или метод позиционирования по наблюдаемой разности времен прихода сигналов OTDOA (Observed time difference of arrival) был предложен в 9-м релизе LTE [22] для определения местоположения пользовательских устройств UE с использованием территориально-распределенных синхронизированных базовых станций eNB (eNodeB). Угломерный метод позиционирования, описанный в работах [18-21], использовался для пеленгации базовых станций eNB при решении задач радиоуправления.

Объектом исследования в настоящей работе является разностно-дальномерный метод позиционирования OTDOA, предложенный для реализации в сетях LTE. Потенциальная точность позиционирования устройств определяется рядом факторов и устанавливается нижней границей Крамера-Рао [23]. Помимо прочих факторов, точность ОМП непосредственно зависит от формы используемых сигналов; в сетях LTE для измерений времени прихода сигнала используются специальные опорные сигналы позиционирования PRS (Positioning Reference Signal) [24]. Для сбора первичных измерений в методе OTDOA сетей LTE используется параметр разности времен прихода опорных сигналов RSTD (Reference Signal Time Difference) [25]. Достижимая на практике

точность позиционирования устройств с использованием опорных сигналов соты CRS (Cell Specific Reference Signal) в условиях плотной городской застройки составляет несколько десятков метров [26]. Несмотря на достаточно низкую точность технологии позиционирования OTDOA в сетях LTE, по сравнению с ожидаемой дециметровой точностью в сетях 5G NR, интерес исследователей и операторов, подтверждающийся публикациями [25-34], обусловлен тем, что на сегодняшний день в условиях плотной городской застройки альтернатив операторского класса ей просто нет. Данное обстоятельство обусловлено невозможностью надежного приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) устройством в плотной городской застройке в условиях отсутствия прямой видимости NLOS (Non-Line of Sight).

Рисунок 1 иллюстрирует сценарий NLOS для ГНСС в условиях плотной городской застройки.

В то же время пользовательское устройство UE может находиться в условиях непосредственной прямой видимости LOS (Line of Sight) с территориально распределенными базовыми станциями eNB сети мобильной LTE и собирать корректные первичные измерения времени прихода сигнала. Далее, зная координаты eNB, UE может успешно решать задачу оценки координат (ОК) в результате вторичной обработки первичных разностно-дальномерных измерений. В условиях LOS ограничивающим фактором точности позиционирования остается энергетика радиолиний eNB-UE, а также неточность синхронизации территориально распределенных базовых станций eNB [27]. Общей особенностью работ [25-27] является реализация макета приемника устройства UE с использованием распространенного в исследовательской и образовательной среде подхода программно-конфигурируемого радио SDR (Software-defined radio) [28].

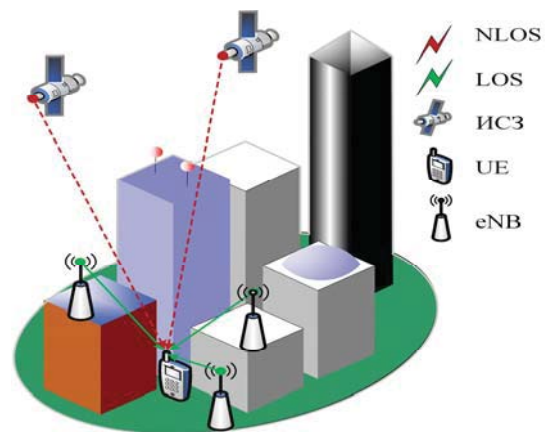


Рис. 1. Отсутствие прямой видимости ГНСС в условиях городской застройки

Из открытых источников на сегодняшний день известно, что наибольший вклад в разработку SDR макетов, решающих задачу приема и обработки опорных сигналов LTE для сетевого позиционирования, сделали две исследовательские группы. Первая группа под руководством J.A. del Peral-Rosado занималась разработкой SDR макета приемника опорных сигналов стандарта LTE [29-31]. Основным результатом является разработка моделей и методов повышения точности оценки времени прихода по принимаемому в условиях многолучевости сигналу OFDM (Orthogonal frequency division

multiplexing) путем одновременной оценки состояния канала в частотном домене. Разработанные методы были апробированы на сигналах реальной сети LTE с использованием SDR макета. Вторая группа под руководством К. Shamaei занималась разработкой SDR макета приемника опорных сигналов стандарта LTE и NR [32-34]. Основным результатом является разработка методов приема и обработки доступных сигналов SOP (Signals of Opportunity) сетей 4G и 5G, среди которых сигналы синхронизации и опорные сигналы CRS. Несмотря на результаты [29-34], предметом их исследования является преимущественно подсистема приема и обработки сигналов.

Предметом исследования в настоящей работе является SDR демонстратор технологии сетевого позиционирования, включая как подсистему формирования и передачи, так и подсистему приема и обработки опорных сигналов.

Целью разработки SDR демонстратора технологии сетевого позиционирования является обоснование технических решений по повышению точности определения местоположения в процессе фактической эксплуатации сети.

Задачей настоящей работы является описание предлагаемого SDR демонстратора технологии сетевого позиционирования а также программная реализация процедур формирования опорных сигналов макетом базовой станции eNB стандарта LTE согласно спецификации 3GPP TS 36.211 [35] в специальном программном обеспечении (СПО) Matlab с последующими лабораторными испытаниями с использованием SDR модулей Ettus B210 [36]. В разделе 0 приводится описание разрабатываемого демонстратора SDR технологии сетевого позиционирования. Далее в разделе 0 формализуются процедуры формирования опорных сигналов стандарта LTE согласно спецификации 3GPP TS 36.211 [35]; также в разделе приводятся программные модули, реализующие соответствующие процедуры. В разделе 0 содержится описание программы и методик лабораторных испытаний процедур формирования опорных сигналов LTE. Раздел 0 содержит выводы и направления дальнейших исследований.

SDR демонстратор технологии сетевого позиционирования

Рисунок 2 иллюстрирует SDR демонстратор для испытаний технологии сетевого позиционирования в лабораторных условиях.

Демонстратор включает следующие подсистемы: а) подсистема макетов базовых станций eNB с известными координатами, реализующих формирование и передачу опорных сигналов стандарта LTE, включая опорные сигналы позиционирования PRS; б) макет пользовательского устройства UE, реализующий прием и обработку опорных сигналов стандарта LTE, а также первичную обработку измерений по опорным сигналам сетевого позиционирования PRS; в) подсистема синхронизации четырех макетов базовых станций eNB, реализующая задачу сигнала временной метки; г) подсистема управления SDR демонстратором, реализующая управление процедурами сбора первичных измерений сетевого позиционирования и их вторичную обработку с результирующей оценкой координат пользовательского устройства UE. Далее рассмотрим состав аппаратно-программных средств подсистем.

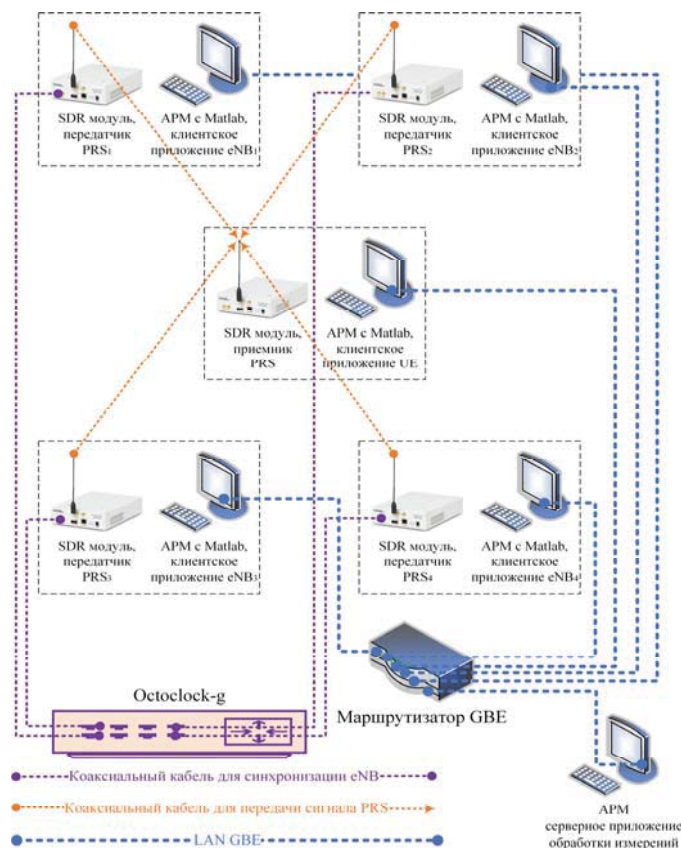


Рис. 2. SDR демонстратор технологии сетевого позиционирования

Подсистема макетов базовых станций образована четырьмя SDR приемопередатчиками eNB, которые реализуют процедуры формирования и передачи опорных сигналов стандарта LTE, включая опорные сигналы сетевого позиционирования PRS. Аппаратная часть макета eNB представлена SDR модулем Ettus B210 [36] или N210 [37]. Программно реализованный функционал формирования и передачи опорных сигналов представлен автоматизированным рабочим местом (АРМ) с предустановленным специальным программным обеспечением (СПО) Matlab [38, 39]. Интерфейсом взаимодействия макета eNB с подсистемой управления SDR демонстратором является предустановленное на АРМ клиентское приложение eNB, реализующее выполнение команд на запуск процедур формирования и передачи опорных сигналов стандарта LTE, включая опорные сигналы позиционирования PRS.

Макет пользовательского устройства образован SDR приемопередатчиком UE, который реализует процедуры приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE, а также первичную обработку измерений по опорным сигналам сетевого позиционирования PRS. Аппаратная часть макета UE представлена SDR модулем Ettus B210 [36] или N210 [37]. Программно реализованный функционал приема и обработки опорных сигналов представлен АРМ с предустановленным СПО Matlab [38, 39]. Интерфейсом взаимодействия макета UE с подсистемой управления SDR демонстратором является предустановленное на АРМ клиентское приложение UE, реализующее выполнение команд на запуск процедур приема и обработки опорных сигналов LTE, включая опорные сигналы сетевого позиционирования PRS.

Подсистема синхронизации четырех макетов базовых станций eNB образована устройством типа OctoClock-G [40], которое реализует раздачу восьми опорных сигналов с меткой времени PPS (Pulse Per Second) и восьми опорных сигналов с эталонной частотой 10 МГц. Источником опорного сигнала временной метки в устройстве OctoClock-G является GPS приемник. В лабораторных условиях опорные сигналы с меткой времени раздаются аппаратно по коаксиальному кабелю с разъемом SMA (SubMiniature Version A). В полевых условиях для синхронизации территориально распределенных макетов базовых станций в каждой SDR плате могут использоваться источники опорных сигналов PPS, управляемые GPS приемником, например, GPSDO (GPS-Disciplined Oscillator) [41] для плат USRP N210. Точность временной метки от источника, управляемого GPS приемником, составляет порядка 50 нс.

Подсистема управления SDR демонстратором образована APM и маршрутизатором GBE (Gigabit Ethernet), который связывает четыре SDR макета базовых станций eNB и SDR макет пользовательского устройства UE в локальную сеть LAN (Local Area Network). Программно реализованный функционал подсистемы управления представлен APM с СПО Matlab и серверным приложением, которое реализует выдачу команд на выполнение следующих операций: а) запуск процедур формирования и синхронной передачи опорных сигналов стандарта LTE макетами базовых станций eNB; б) запуск процедур приема и первичной обработки навигационных измерений по опорным сигналам стандарта LTE макетом пользовательского устройства UE; в) преобразование известных координат базовых станций eNB из глобальной системы координат (СК) в локальную; г) вторичная обработка первичных измерений с оценкой координат пользовательского устройства UE по известным координатам базовых станций eNB.

Прототип СПО сбора первичных измерений их вторичной обработки для технологии сетевого позиционирования по стандарту LTE представлен в [42] и [43] соответственно. Предметом разработки в настоящем исследовании является функционал формирования опорных сигналов стандарта LTE из примитивных функций Matlab без использования LTE Toolbox [42].

На этапе лабораторных испытаний объектом проверки являются представленные выше четыре подсистемы SDR демонстратора технологии сетевого позиционирования при организации сбора первичных с подключением SDR макетов по коаксиальному кабелю. Данное условие на начальном этапе позволяет исключить влияние многолучевости на процедуры сбора и обработки первичных измерений. При корректном функционировании рассмотренных выше подсистем в лабораторных условиях далее можно будет переходить к этапу полевых испытаний с территориальным распределением макетов базовых станций eNB и пользовательского устройства; синхронизация макетов eNB при этом возможна с использованием GPSDO [41]. Далее рассмотрим процедуры формирования опорных сигналов LTE по 3GPP TS 36.211 [35].

Формирование опорных сигналов LTE

Структура кадра

Элементарным временным интервалом является символ длительностью $T_s = 1/(15000 \cdot 2048) = 32,552$ нс.

Передача в каналах вверх UL (Uplink) и вниз DL (Downlink) организована в кадры длительностью $T_f = 307200 \cdot T_s = 10$ мс. В режиме частотного дуплекса FDD (Frequency Division Duplex) используется структура кадра типа 1 (далее кадр). Кадр содержит 10 субкадров длительностью $307200 \cdot T_s = 1$ мс с нумерацией от 0 до 9. Субкадр i в кадре n_f имеет свой абсолютный номер $n_{sf}^{abs} = 10n_f + i$, где n_f – системный номер кадра SFN (System Frame Number). Для передачи с разносом поднесущих $\Delta f = 2,5$ кГц, $\Delta f = 7,5$ кГц или $\Delta f = 15$ кГц субкадр i определяется двумя соседними слотами с индексами $2i$ и $2i + 1$ и длительностью $T_{slot} = 15360 \cdot T_s = 0,5$ мс (рис. 3).

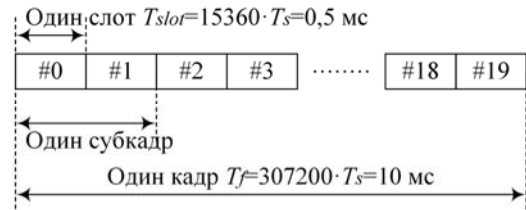


Рис. 3. Структура кадра типа 1

Элементарным блоком частотно-временной ресурсной сетки в канале «вниз» Downlink (DL) является ресурсный элемент RE (Resource Element). Набор субкадров в кадре канала «вниз» может быть сконфигурирован верхними уровнями как набор субкадров MBSFN (Multimedia Broadcast Multicast Service Single Frequency Network). За исключением случая с разносом $\Delta f \approx 0.37$ кГц, каждый субкадр MBSFN разделяется на две области: MBSFN и non-MBSFN. Для субкадров MBSFN с разносом поднесущих $\Delta f = 15$ кГц область non-MBSFN занимает первый один или два OFDM символа. Для субкадров MBSFN с разносом поднесущих $\Delta f = 7.5$ кГц, $\Delta f = 2.5$ кГц, $\Delta f = 1.25$ кГц, а также для слотов с $\Delta f \approx 0.37$ кГц область non-MBSFN отсутствует. Область MBSFN в субкадре MBSFN образована OFDM символами, не используемыми для области non-MBSFN. В соте, предназначенной для вещания MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Services), субкадры, в которых сигналы PSS/SSS/PBCH/PDSCH передают служебную информацию с $\Delta f = 15$ кГц, являются субкадрами non-MBSFN.

Структура слота и физических ресурсных элементов

Передаваемый сигнал в каждом слоте описывается одним или несколькими ресурсными сетками из $N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB}$ поднесущих в частотной области и N_{sym}^{DL} OFDM символов во временной области, где N_{sc}^{RB} – размер ресурсного блока RB (Resource Block) в частотном домене, исчисляемый числом поднесущих; N_{RB}^{DL} – ширина полосы частот в канале «вниз».

Рисунок 4 иллюстрирует структуру частотно-временной ресурсной сетки. Значение N_{RB}^{DL} определяется шириной полосы частот в DL и должно удовлетворять

$$N_{RB}^{min,DL} \leq N_{RB}^{DL} \leq N_{RB}^{max,DL}; \tag{1}$$

где $N_{RB}^{min,DL} = 6$ и $N_{RB}^{max,DL} = 110$ – минимальное и максимальное число RB в канале «вниз» соответственно.

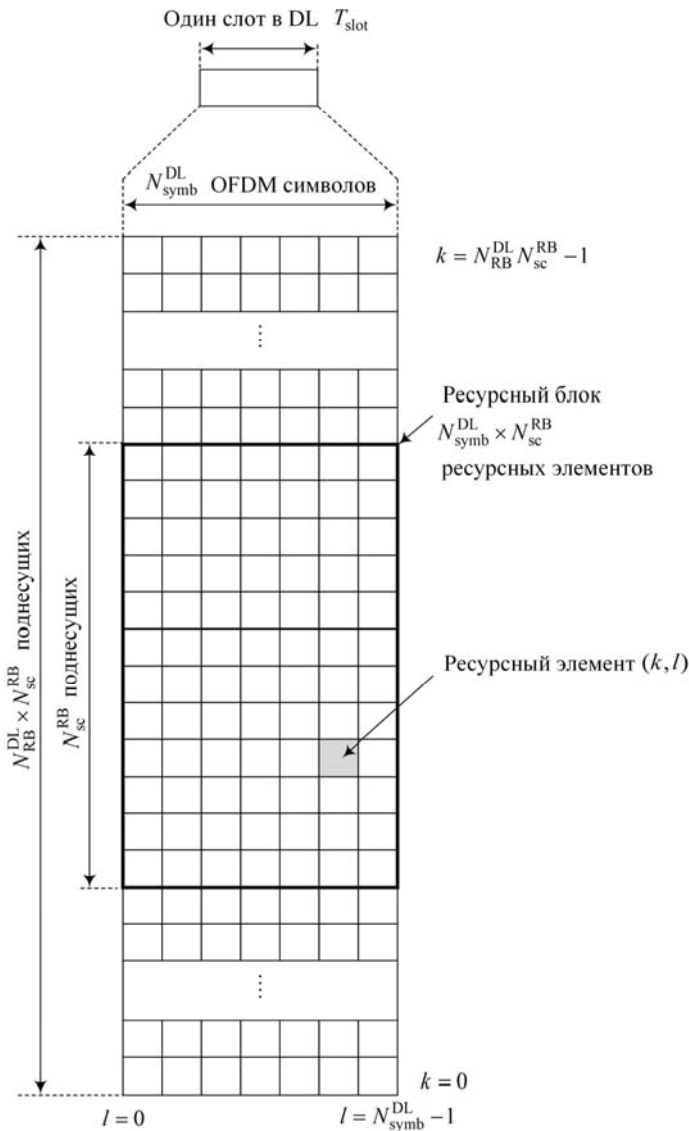


Рис. 4. Частотно-временная ресурсная сетка в DL

Число OFDM символов в слоте определяется циклическим префиксом и конфигурацией разнеса поднесущих (таблица 1).

Таблица 1

Параметры физических ресурсных блоков

Конфигурация		N_{sc}^{RB}	N_{symb}^{DL}
Нормальный циклический префикс	$\Delta f = 15$ кГц	12	7
	$\Delta f = 15$ кГц		6
Расширенный циклический префикс	$\Delta f = 7.5$ кГц	24	3
	$\Delta f = 2.5$ кГц	72	1
	$\Delta f = 1.25$ кГц	144	1
	$\Delta f \approx 0.37$ кГц	486	1

Антенный порт определяется так, что канал, по которому был передан символ через данный порт, может быть установлен по признаку того, что через данный канал был передан другой символ с использованием того же антенного порта.

Каждому антенному порту соответствует своя ресурсная сетка.

Специальные опорные сигналы соты CRS поддерживают конфигурацию одного, двух и четырех антенных портов и могут передаваться на $p = 0$, $p \in \{0,1\}$ и $p \in \{0,1,2,3\}$ соответственно. Для опорных сигналов позиционирования определен антенный порт $p = 6$, а канал, по которому осуществляется передача PRS, может быть установлен в пределах передачи N_{PRS} последовательных субкадров сигнала PRS.

Каждый ресурсный элемент RE ресурсной сетки для антенного порта p идентифицируется парой индексов (k, l) в слоте, где $k = 0, \dots, N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} - 1$ обозначает индекс RE в частотном домене, $l = 0, \dots, N_{symb}^{DL} - 1$ обозначает индекс RE во временном домене. RE (k, l) на антенном порте p представляет комплексное число $a_{k,l}^{(p)}$; иногда при записи индекс антенного порта опускается. Ресурсные блоки RB (Resource Block) используются для описания отображения конкретных физических каналов на ресурсные элементы. Определены физические и виртуальные ресурсные блоки.

Физический ресурсный блок образован N_{symb}^{DL} последовательными OFDM символами во временном домене и N_{sc}^{RB} последовательными поднесущими в частотном домене, где N_{symb}^{DL} и N_{sc}^{RB} определяются параметрами физических ресурсных блоков (табл. 1). Физический ресурсный блок, таким образом, состоит из $N_{symb}^{DL} \times N_{sc}^{RB}$ ресурсных элементов и занимает один слот во временном домене и 180 кГц в частотном домене. Физические ресурсные блоки нумеруются от 0 до $N_{RB}^{DL} - 1$ в частотном домене. Соотношение между номером физического ресурсного блока n_{PRB} в частотном домене и индексами ресурсного элемента (k, l) в слоте определяется

$$n_{PRB} = \left\lfloor \frac{k}{N_{sc}^{RB}} \right\rfloor; \quad (2)$$

За исключением случая с разнесом поднесущих $\Delta f = 1.25$ кГц и $\Delta f \approx 0.37$ кГц, пара физических ресурсных блоков определена как два физических RB одного субкадра с одинаковым номером физического ресурсного блока n_{PRB} .

Физические каналы и сигналы в DL

Физический канал в DL образован набором ресурсных элементов, содержащих данные верхних уровней, и служит интерфейсом между спецификациями 3GPP TS 36.212 и 3GPP TS 36.211 [35]. Спецификацией 3GPP TS 36.211 определены следующие физические каналы в DL: а) физический разделяемый канал «вниз» PDSCH (Physical Downlink Shared Channel); б) физический вещательный канал PBCH (Physical Broadcast Channel); в) физический широковещательный (многоадресный) канал PMCH (Physical Multicast Channel); г) физический канал управления индикатора формата PCFICH (Physical Control Format Indicator Channel); д) физический канал управления «вниз» PDCCCH (Physical Downlink Control Channel); е) физический канал индикатора HARQ PHICH (Physical Hybrid ARQ Indicator Channel); ж) улучшенный канал PDCCCH – EPDCCCH (Enhanced Physical Downlink Control Channel); з) физический канал управления «вниз» MTC – MPDCCCH (MTC Physical Downlink Control Channel); и) короткий физический канал управления «вниз» SPDCCCH (Short Physical Downlink Control Channel). Физический сигнал в DL образован набором ресурсных элементов, используемых на

физическом уровне, и не содержит данных верхних уровней. 3GPP TS 36.211 определены следующие физические сигналы в DL: а) опорный сигнал (Reference signal); б) сигнал синхронизации (Synchronization signal); в) сигнал обнаружения (Discovery signal); г) сигнал пробуждения МТС (MTC wake-up signal, MWUS).

Рисунок 5 иллюстрирует обобщенную структуру процедур обработки сигналов в физических каналах DL. Комплексный сигнал на нулевой частоте (baseband), представляющий физический канал DL, получается в результате последовательности: а) скремблирование кодированных бит в каждом кодовом слове при передаче в физическом канале; б) модуляция скремблированных бит и получение комплексных модуляционных символов; в) отображение комплексных модуляционных символов на один или несколько слоев; г) прекодирование комплексных модуляционных символов на каждом из слоев для передачи через антенные порты; д) отображение комплексных модуляционных символов для каждого антенного порта на ресурсные элементы; е) формирование комплексных выборок OFDM сигнала во временном домене для каждого антенного порта.

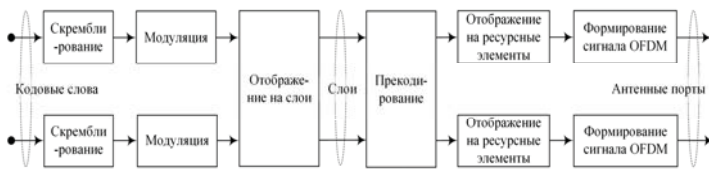


Рис. 5. Обобщенная структура процедур обработки в физических каналах DL

В DL определены шесть опорных сигналов RS (Reference Signal): а) опорный сигнал соты CRS (Cell Specific RS); б) опорный сигнал MBSFN; в) опорный сигнал заданного пользовательского устройства UE (DM-RS), ассоциированный с каналом PDSCH; г) опорный сигнал демодуляции DM-RS (DeModulation RS), ассоциированный с каналом EPDCCH или MPDCCH; д) опорный сигнал позиционирования PRS (Positioning Reference Signal); е) опорный сигнал информации о состоянии канала CSI-RS (Channel State Information RS). Через каждый антенный порт канала «вниз» передается один опорный сигнал. Для задач определения местоположения интерес представляют следующие сигналы: сигналы первичной синхронизации PSS (Primary Synchronization Signal), сигналы вторичной синхронизации SSS (Secondary Synchronization Signal), специальные опорные сигналы соты CRS, а также, опорные сигналы позиционирования PRS.

Опорные сигналы соты CRS

Пользовательское устройство UE принимает опорные сигналы соты CRS в сотах, поддерживающих передачи в канале PDSCH, в: а) субкадрах DL со структурой кадра типа 1; б) субкадрах DL и пилотных слотах DwPTS (Downlink Pilot Time Slot) со структурой кадра типа 2; в) не пустых субкадрах со структурой кадра типа 3. Опорные сигналы CRS передаются через один или несколько антенных портов от 0 до 3. В субкадрах с CRS разнос поднесущих $\Delta f = 15$ кГц.

Формирование последовательности. Последовательность опорного сигнала соты CRS $r_{l,n_s}(m)$ определяется выражением

$$r_{l,n_s}(m) = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m)) + j \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m + 1)); \quad (3)$$

$$m = 0, 1, \dots, 2N_{RB}^{max,DL} - 1;$$

где n_s – номер слота в кадре, l – номер OFDM символа в слоте. Псевдослучайная последовательность $c(n)$ задается кодом Голда длиной 31. Выходная последовательность $c(n)$ длины M_{PN} определяется для $n = 0, 1, \dots, M_{PN} - 1$ выражением

$$c(n) = (x_1(n + N_C) + x_2(n + N_C)) \bmod 2;$$

$$x_1(n + 31) = (x_1(n + 3) + x_1(n)) \bmod 2; \quad (4)$$

$$x_2(n + 31) = (x_2(n + 3) + x_2(n + 2) + x_2(n + 1) + x_2(n))$$

где $N_C = 1600$ и первая m -последовательность инициализируется согласно

$$x_1(0) = 1; x_1(n) = 0; n = 1, 2, \dots, 30; \quad (5)$$

Скрипт 1 содержит функцию формирования кода Голда согласно (4) и (5).

Скрипт 1. Функция формирования кода Голда

```
function c = gen_gold(M_pn, c_init)
N_c = 1600;
x_1 = zeros(N_c + M_pn + 31, 1);
x_2 = zeros(N_c + M_pn + 31, 1);
x_1(1) = 1;
for i=1:31
    x_2(i) = mod(bitshift(c_init, -(i-1)), 2);
end
for i=1:(N_c+M_pn)
    x_1(i+31) = mod(x_1(i+3) + x_1(i), 2);
    x_2(i+31) = mod(x_2(i+3) + x_2(i+2) + x_2(i+1) +
x_2(i), 2);
end
c = zeros(M_pn, 1);
for i=1:M_pn
    c(i) = mod(x_1(i+N_c) + x_2(i+N_c), 2);
end
end
```

Вторая m -последовательность инициализируется выражением

$$c_{init} = \sum_{i=0}^{30} x_2(i) \cdot 2^i; \quad (6)$$

в начале каждого OFDM символа согласно

$$c_{init} = 2^{10} \cdot (7 \cdot (n'_s + 1) + l + 1) \cdot (2 \cdot N_{ID}^{cell} + 1) + 2 \cdot N_{ID}^{cell} + N_{CP}; \quad (7)$$

$$n'_s = \begin{cases} 10 \lfloor n_s / 10 \rfloor + n_s \bmod 2, & \text{для структуры кадра 3,} \\ n_s, & \text{когда CRS в составе DRS;} \\ & \text{в остальных случаях;} \end{cases} \quad (8)$$

$$N_{CP} = \begin{cases} 1, & \text{для нормального CP} \\ 0, & \text{для расширенного CP} \end{cases}; \quad (9)$$

Отображение на ресурсные элементы. Последовательность $r_{l,n_s}(m)$ опорного сигнала соты CRS отображается на комплексные модуляционные символы $a_{k,l}^{(p)}$, являющиеся опорными символами антенного порта p в слоте n_s , согласно

$$a_{k,l}^{(p)} = r_{l,n_s}(m'); \quad (10)$$

$$k = 6m + (v + v_{shift}) \bmod 6; \quad (11)$$

$$l = \begin{cases} 0, N_{symp}^{DL} - 3 & \text{если } p \in \{0,1\} \\ 1 & \text{если } p \in \{2,3\} \end{cases} \quad (12)$$

$$m = 0, 1, \dots, 2 \cdot N_{RB}^{DL} - 1; \quad (13)$$

$$m' = m + N_{RB}^{max,DL} - N_{RB}^{DL}. \quad (14)$$

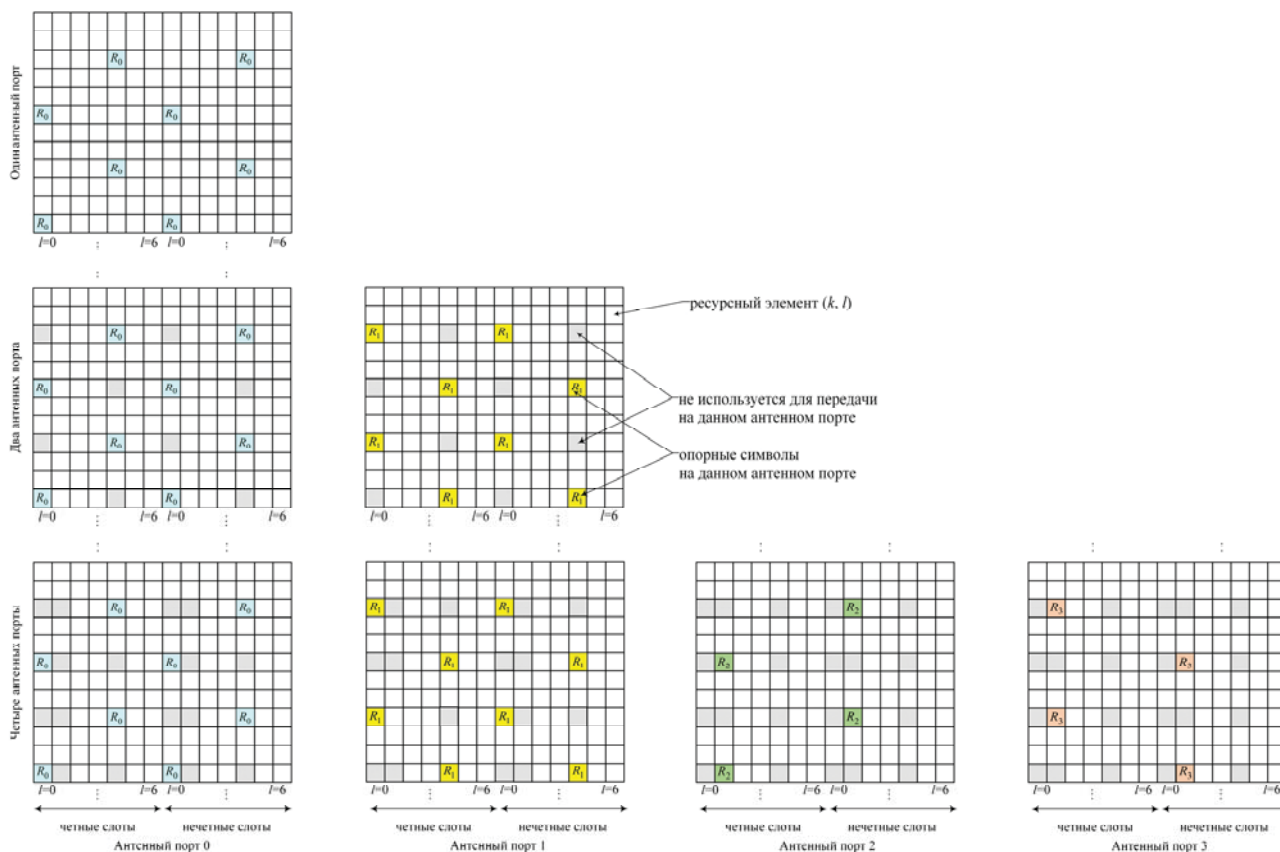


Рис. 6. Отображение сигналов CRS на ресурсные элементы с нормальным CP

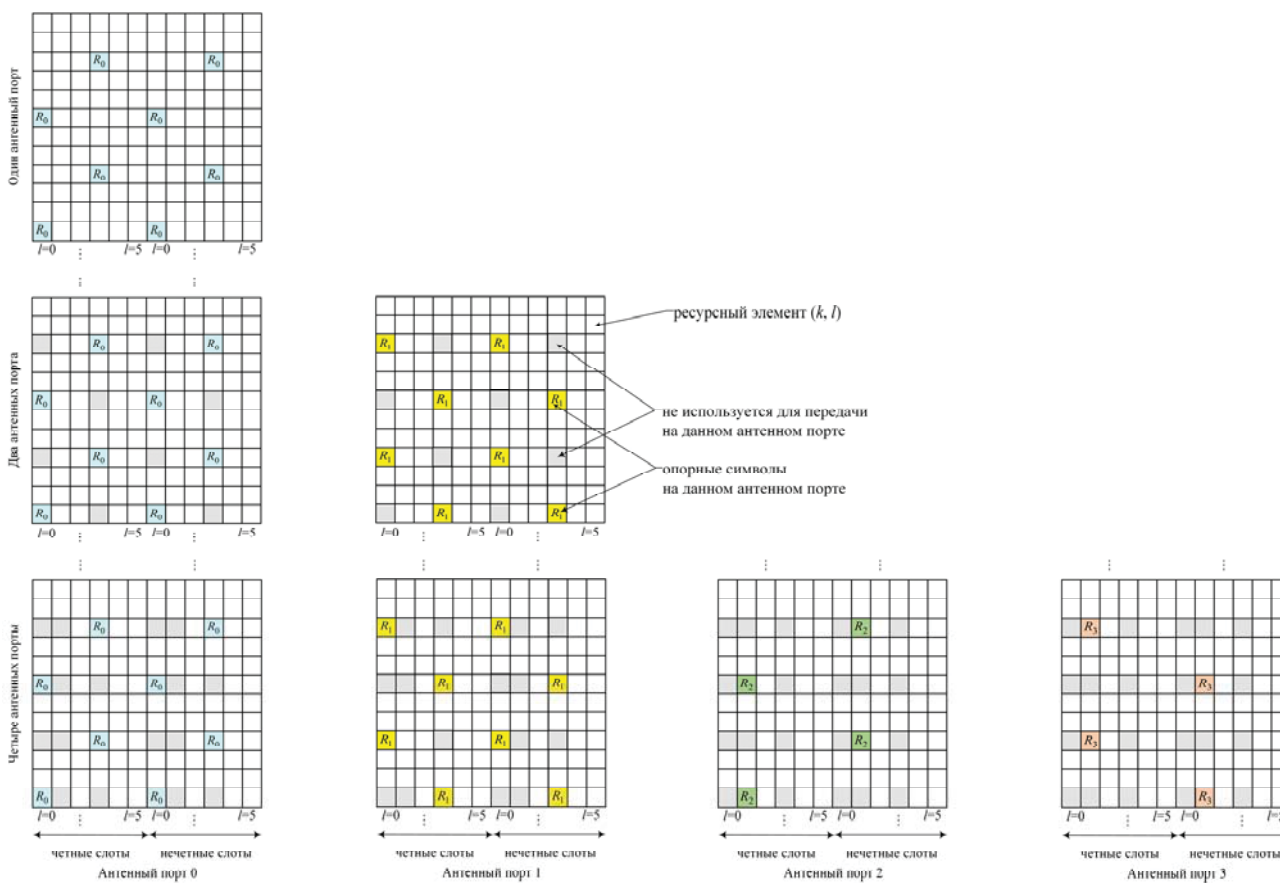


Рис. 7. Отображение сигналов CRS на ресурсные элементы с расширенным CP

Переменные v и v_{shift} определяют положение опорных сигналов в частотном домене ресурсной сетки согласно выражению

$$v = \begin{cases} 0, & \text{если } p = 0 \text{ и } l = 0 \\ 3 & \text{если } p = 0 \text{ и } l \neq 0 \\ 3 & \text{если } p = 1 \text{ и } l = 0 \\ 0 & \text{если } p = 1 \text{ и } l \neq 0 \\ 3(n_s \bmod 2) & \text{если } p = 2 \\ 3 + 3(n_s \bmod 2) & \text{если } p = 3 \end{cases} \quad (15)$$

Сдвиг в частотном домене для заданной соты определяется выражением

$$v_{shift} = N_{ID}^{cell} \bmod 6. \quad (16)$$

Рисунки 6 и 7 иллюстрируют отображение сигналов CRS на ресурсные элементы RE ресурсной сетки с нормальным и расширенным CP соответственно; R_p обозначает RE, используемый для передачи CRS через антенный порт p .

Ресурсный элемент (k, l) , используемый для передачи опорного сигнала соты CRS через один из антенных портов в данном слоте, не будет задействован для каких-либо других передач через другие антенные порты в данном слоте и устанавливается в нулевое значение. Отображение сигналов CRS на ресурсные элементы ресурсной сетки реализуется двумя функциями. Первая функция (

скрипт 2) вычисляет индексы расположения сигналов CRS в ресурсных элементах ресурсной сетки согласно выражениям (11)–(16); аргументом функции является параметр `enbParam`, содержащий идентификатор соты. Вторая функция (

скрипт 3) выполняет формирование и отображение сигналов CRS на ресурсные элементы ресурсной сетки согласно выражениям (3)–(10); аргументом функции является параметр `enbParam` и номер субкадра `sfrm`.

Скрипт 2. Функция вычисления индексов расположения сигналов CRS

```
function [ind_s0, ind_s1] = get_crs_indices(enbParam)
Nidcell = enbParam.CellID; % ID соты (Cell ID)
Nrbdl = enbParam.NRBdl; % число RB (resource block)
в полосе downlink
RB
Nrbsc = enbParam.NRBSC; % число поднесущих в одном
Nsymbd1 = enbParam.NSYMBDL; % число символов в слоте
L_crs = [0, Nsymbd1-3];
v = [0, 3]; m_crs = (0:2*Nrbdl-1).';
k_crs_s0 = 6*m_crs + mod(v + mod(Nidcell, 6), 6) + 1;
ind_s0 = k_crs_s0 + L_crs*Nrbdl*Nrbsc;
ind_s1 = ind_s0 + Nsymbd1*Nrbdl*Nrbsc;
ind_s0 = ind_s0(:); ind_s1 = ind_s1(:);
end
```

Скрипт 3. Функция отображения сигналов CRS на ресурсные элементы

```
function ap_crs = get_crs(enbParam, sfrm)
Nidcell = enbParam.CellID; % ID соты (Cell ID)
Nrbdl = enbParam.NRBdl; % число RB (resource block)
в полосе downlink
Nsymbd1 = enbParam.NSYMBDL; % число символов в слоте
Nrbmaxdl = 110; % максимальное число RB в LTE
M_pn = 4*Nrbmaxdl; % максимальная длина последовательности Голда
if (Nsymbd1 == 7)
```

```
Ncp = 1;
else
Ncp = 0;
end
L_crs = [0, Nsymbd1-3];
m_crs = 0:2*Nrbdl-1;
Ncrs_symb = length(L_crs);
m_crs_s = length(m_crs);
nSfrm = length(sfrm);
ap_crs = zeros(Ncrs_symb*m_crs_s*2, nSfrm);
for n=1:nSfrm
ns = [0; 1] + (sfrm(n))*2;
c_init = 2^10*(7*(ns + 1) + L_crs + 1)*(2*Nidcell+1)
+ 2*Nidcell + Ncp;
for i=1:2
for j=1:Ncrs_symb
c = gen_gold(M_pn, c_init(i, j));
r = 1/sqrt(2)*((1 - 2*c(1:2:end)) + 1i*(1 -
2*c(2:2:end)));
ap_crs((i-1)*m_crs_s + m_crs+1, n)
= ...
r(m_crs + Nrbmaxdl - Nrbdl + 1);
end
end
end
end
```

Опорные сигналы позиционирования PRS

Опорные сигналы позиционирования передаются в ресурсных блоках субкадров канала «вниз», сконфигурированных для передачи опорных сигналов позиционирования. Если в соте для позиционирования сконфигурированы два субкадра, включая нормальный и MBSFN, то OFDM символы субкадра MBSFN, сконфигурированные для передачи сигналов позиционирования, будут использовать тот же циклический префикс, что и в субкадре #0. Если в соте для позиционирования сконфигурированы только субкадры MBSFN, OFDM символы субкадра MBSFN, сконфигурированные для передачи сигналов позиционирования, будут использовать расширенный циклический префикс. В субкадре, сконфигурированном для передачи сигналов PRS, начальное положение OFDM символов, сконфигурированных для передачи сигналов PRS, будет идентичным положением тех символов в субкадре, которые имеют тот же циклический префикс, что и OFDM символы, сконфигурированные для передачи сигналов позиционирования.

Опорные сигналы позиционирования передаются через 6-й антенный порт. Если ресурсный элемент (k, l) распределен для передачи сигналов PBCH, PSS или SSS, то независимо от используемого антенного порта опорный сигнал позиционирования не будет отображен на этот ресурсный элемент. Для опорных сигналов позиционирования определен разнос поднесущих $\Delta f = 15$ кГц.

Формирование последовательности. Последовательность опорного сигнала позиционирования PRS $r_{l,n_s}(m)$ определяется, как и в (3), согласно

$$r_{l,n_s}(m) = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m)) + j \frac{1}{\sqrt{2}}(1 - 2 \cdot c(2m + 1));$$

$$m = 0, 1, \dots, 2N_{RB}^{max,DL} - 1;$$

где n_s – номер слота в кадре, l – номер OFDM символа в слоте. Генератор псевдослучайной последовательности $c(i)$ определяется выражением (4) и инициализируется в начале каждого OFDM символа согласно выражению

$$c_{init} = 2^{28} \cdot [N_{ID}^{PRS}/512] + 2^{10} \cdot (7 \cdot (n_s + 1) + l + 1) \cdot (2 \cdot (N_{ID}^{PRS} \bmod 512) + 1) + 2 \cdot (N_{ID}^{PRS} \bmod 512) + N_{CP}; \quad (17)$$

где $N_{ID}^{PRS} \in \{0,1, \dots, 4095\}$ равно значению N_{ID}^{cell} , если другое значение не сконфигурировано верхними уровнями, а N_{CP} , как и в (9), определяется выражением

$$N_{CP} = \begin{cases} 1, & \text{для нормального CP} \\ 0, & \text{для расширенного CP} \end{cases};$$

Отображение на ресурсные элементы. Если верхними уровнями не сконфигурирован режим прыжков по частоте, то последовательность $r_{l,n_s}(m)$ PRS отображается на комплексные модуляционные символы $a_{k,l}^{(p)}$, являющиеся опорными символами антенного порта $p = 6$ в слоте n_s согласно выражению (10), где для нормального циклического префикса

$$k = 6(m + N_{RB}^{DL} - N_{RB}^{PRS}) + (6 - l + v_{shift}) \bmod 6; \quad (18)$$

$$l = \begin{cases} 3,5,6 & \text{если } n_s \bmod 2 = 0 \\ 1,2,3,5,6 & \text{если } n_s \bmod 2 = 1 \text{ и (1 или 2 антенных порта PBCH)} \\ 2,3,5,6 & \text{если } n_s \bmod 2 = 1 \text{ и (4 антенных порта PBCH)} \end{cases} \quad (19)$$

$$m = 0,1, \dots, 2 \cdot N_{RB}^{PRS} - 1; \quad (20)$$

$$m' = m + N_{RB}^{max,DL} - N_{RB}^{PRS}; \quad (21)$$

а для расширенного циклического префикса

$$k = 6(m + N_{RB}^{DL} - N_{RB}^{PRS}) + (5 - l + v_{shift}) \bmod 6; \quad (22)$$

$$l = \begin{cases} 4,5 & \text{если } n_s \bmod 2 = 0 \\ 1,2,4,5 & \text{если } n_s \bmod 2 = 1 \text{ и (1 или 2 антенных порта PBCH)} \\ 2,4,5 & \text{если } n_s \bmod 2 = 1 \text{ и (4 антенных порта PBCH)} \end{cases} \quad (23)$$

$$m = 0,1, \dots, 2 \cdot N_{RB}^{PRS} - 1;$$

$$m' = m + N_{RB}^{max,DL} - N_{RB}^{PRS};$$

Ширина полосы частот опорного сигнала N_{RB}^{PRS} конфигурируется верхними слоями, а специальный для данной соты сдвиг частот определяется выражением

$$v_{shift} = N_{ID}^{PRS} \bmod 6; \quad (24)$$

где $N_{ID}^{PRS} = N_{ID}^{cell}$, если верхними уровнями не сконфигурировано другое значение N_{ID}^{PRS} . Если верхними уровнями сконфигурирован режим прыжков по частоте при передаче сигналов PRS, конфигурация включает следующие параметры передачи: а) длина группы события, PRS L_{GROUP}^{PRS} ; б) число диапазонов для прыжков по частоте при передаче сигналов PRS, N_{BAND}^{PRS} ; в) начальный индекс PRB диапазона i для прыжков по частоте, n_i^{RB} ; если $i = 0$, то $n_i^{RB} = N_{RB}^{DL} - N_{RB}^{PRS}$; если $i \in \{1, \dots, N_{BAND}^{PRS} - 1\}$, то $n_i^{RB} = 2 \cdot \tilde{n}_i^{RB}$, где \tilde{n}_i^{RB} – индекс первого ресурсного блока PRB в конфигурации сигналов PRS с прыжками по частоте.

При конфигурации режима прыжков по частоте на более высоком уровне последовательность опорного сигнала позиционирования PRS $r_{l,n_s}(m)$ в событии PRS с индексом j , где $j = 0, \dots, L_{GROUP}^{PRS} - 1$ в группе событий PRS, будет отображаться на комплексные модуляционные символы $a_{k,l}^{(p)}$, являющиеся опорными символами антенного порта $p = 6$ в слоте n_s согласно выражению (10), где для нормального CP

$$i = j \bmod N_{BAND}^{PRS}; \quad (25)$$

$$k = 6(m + n_i^{RB}) + (6 - l + v_{shift}) \bmod 2; \quad (26)$$

$$(27)$$

$$l = \begin{cases} 3,5,6 & \text{если } n_s \bmod 2 = 0 \\ 1,2,3,5,6 & \text{если } n_s \bmod 2 = 1 \text{ и (1 или 2 антенных порта PBCH)} \\ 2,3,5,6 & \text{если } n_s \bmod 2 = 1 \text{ и (4 антенных порта PBCH)} \end{cases}$$

$$m = 0,1, \dots, 2 \cdot N_{RB}^{PRS} - 1; \quad (28)$$

$$m' = m + n_i^{RB} + N_{RB}^{max,DL} - N_{RB}^{DL}; \quad (29)$$

а для расширенного циклического префикса

$$i = j \bmod N_{BAND}^{PRS}; \quad (30)$$

$$k = 6(m + n_i^{RB}) + (5 - l + v_{shift}) \bmod 2; \quad (31)$$

$$l = \begin{cases} 4,5 & \text{если } n_s \bmod 2 = 0 \\ 1,2,4,5 & \text{если } n_s \bmod 2 = 1 \text{ и (1 или 2 антенных порта PBCH)} \\ 2,4,5 & \text{если } n_s \bmod 2 = 1 \text{ и (4 антенных порта PBCH)} \end{cases} \quad (32)$$

$$m = 0,1, \dots, 2 \cdot N_{RB}^{PRS} - 1; \quad (33)$$

$$m' = m + n_i^{RB} + N_{RB}^{max,DL} - N_{RB}^{DL}; \quad (34)$$

Рисунки 8 и 9 иллюстрируют ресурсные элементы ресурсной сетки при передаче сигналов PRS с нормальным и расширенным CP соответственно.

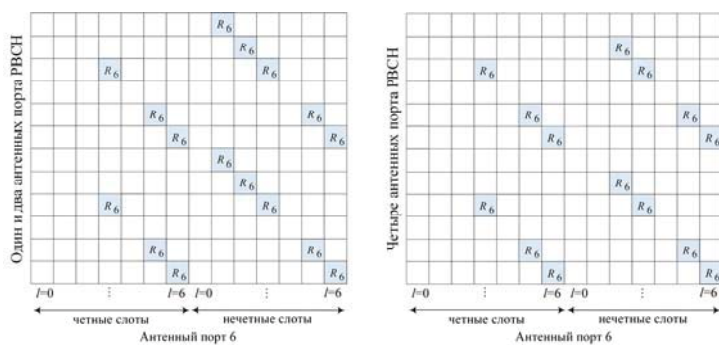


Рис. 8. Отображение сигналов PRS на ресурсные элементы с нормальным CP

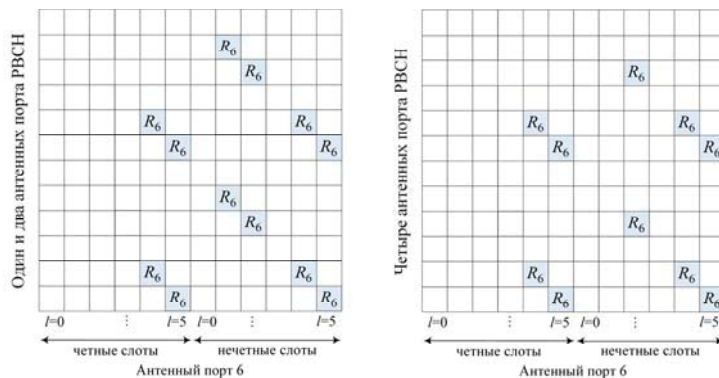


Рис. 9. Отображение сигналов PRS на ресурсные элементы с расширенным CP

Таблица 2 содержит параметры конфигурации субкадра для сигналов PRS, включая период повторения субкадров PRS T_{PRS} и сдвиг субкадров PRS Δ_{PRS} . Индекс конфигурации PRS I_{PRS} конфигурируется более высокими уровнями. Опорные сигналы позиционирования передаются только в сконфигурированных субкадрах канала «вниз»; в слотах DwPTS (Downlink Pilot Time Slot) сигналы PRS не передаются. Опорные сигналы позиционирования PRS передаются в N_{PRS} последовательных субкадрах канала «вниз», где параметр N_{PRS}

конфигурируется на более высоких уровнях. Фрагменты опорных сигналов позиционирования в первом субкадре из N_{PRS} субкадров канала «вниз» удовлетворяют

$$(10 \times n_f + \lfloor n_s/2 \rfloor - \Delta_{PRS}) \bmod T_{PRS} = 0; \quad (35)$$

где n_f – системный номер кадра SFN (System Frame Number), n_s – номер слота внутри кадра.

Таблица 2

Параметры конфигурации субкадра для сигналов PRS

Индекс конфигурации PRS, I_{PRS}	Период субкадров PRS, T_{PRS} (в числе субкадров)	Сдвиг субкадров PRS, Δ_{PRS} (в числе субкадров)
0 – 159	160	I_{PRS}
160 – 479	320	$I_{PRS} - 160$
480 – 1119	640	$I_{PRS} - 480$
1120 – 2399	1280	$I_{PRS} - 1120$
2400 – 2404	5	$I_{PRS} - 2400$
2405 – 2414	10	$I_{PRS} - 2405$
2415 – 2434	20	$I_{PRS} - 2415$
2435 – 2474	40	$I_{PRS} - 2435$
2475 – 2554	80	$I_{PRS} - 2475$
2555 – 4095	Зарезервировано	

Отображение сигналов PRS на ресурсные элементы ресурсной сетки реализуется двумя функциями. Первая функция (скрипт 4) вычисляет индексы ресурсных элементов и субфреймов расположения сигналов PRS; аргументом функции является параметр `enbParam`, содержащий идентификатор соты. Вторая функция (скрипт 5) выполняет формирование и отображение сигналов PRS на ресурсные элементы ресурсной сетки; аргументом функции является параметр `enbParam` и номер субкадра `sfrm`.

Скрипт 4. Функция вычисления индексов расположения сигналов PRS

```
function [ind_s0, ind_s1, sbfrm0_ind, sbfrm5_ind] =
get_prs_indices(enbParam)
Nidprs = enbParam.PrsID; % ID PRS (выбирается равным ID соты)
Nrbdl = enbParam.NRBDL; % число RB (resource block) в полосе downlink
Nrbprs = enbParam.NRBPRS; % число RB для передачи PRS
Nrbsc = enbParam.NRBSC; % число поднесущих в одном RB
Nsymbdl = enbParam.NSYMBDL; % число символов в слоте
vshift = mod(Nidprs, 6);
m_prs = (0:2*Nrbprs-1).';
L_prs_s0 = [3, 5, 6];
k_prs_s0 = 6*(m_prs+Nrbdl-Nrbprs) + mod(6 - L_prs_s0 + vshift,6) + 1;
ind_s0 = k_prs_s0 + L_prs_s0*Nrbdl*Nrbsc;
L_prs_s1 = [1, 2, 3, 5, 6];
k_prs_s1 = 6*(m_prs+Nrbdl-Nrbprs) + mod(6 - L_prs_s1 + vshift,6) + 1;
ind_s1 = k_prs_s1 + L_prs_s1*Nrbdl*Nrbsc + Nsymbdl*Nrbdl*Nrbsc;
ind_s0 = ind_s0(:);
ind_s1 = ind_s1(:);
% размещение сигнала PRS в RG (используются только те RE,
% которые не заняты другими сигналами)
[~, pos_s0, ~] = setxor(ind_s0, [get_pss_indices(enbParam), ...
get_sss_indices(enbParam)]);
```

```
% вычисление индексов RE в пределах субфрейма для PBCH (TS 36.211 6.6.4)
k_pbch = Nrbdl*Nrbsc/2 - 36 + (0:71) + 1;
ind_pbch_s0_3 = k_pbch + (0:3).'*Nrbdl*Nrbsc + Nsymbdl*Nrbdl*Nrbsc;
[~, pos_s1, ~] = setxor(ind_s1, ind_pbch_s0_3(:));
sbfrm0_ind = [pos_s0; pos_s1 + length(L_prs_s0)*2*Nrbprs];
sbfrm5_ind = [pos_s0; (1:length(ind_s1)).' + length(L_prs_s0)*2*Nrbprs];
end
```

Скрипт 5. Функция отображения сигналов PRS на ресурсные элементы

```
function ap_prs = get_prs(enbParam, sfrm)
Nidprs = enbParam.PrsID; % ID PRS (выбирается равным ID соты)
Nrbdl = enbParam.NRBDL; % число RB (resource block) в полосе downlink
Nrbprs = enbParam.NRBPRS; % число RB для передачи PRS
Nsymbdl = enbParam.NSYMBDL; % число символов в слоте
% константы
Nrbmaxdl = 110; % максимальное число RB в LTE
M_pn = 4*Nrbmaxdl; % максимальная длина последовательности Голда
l_symb = 0:Nsymbdl; % номера символов в слоте LTE с нормальным CP
if (Nsymbdl == 7)
Ncp = 1;
else
Ncp = 0;
end
L_prs_s0 = [3, 5, 6];
L_prs_s1 = [1, 2, 3, 5, 6];
m_prs = 0:2*Nrbprs-1;
m_prs_s = length(m_prs);
nSfrm = length(sfrm);
Nprs_symb_s0 = length(L_prs_s0);
Nprs_symb_s1 = length(L_prs_s1);
Nprs_symb = Nprs_symb_s0 + Nprs_symb_s1;
ap_prs = zeros(Nprs_symb*m_prs_s, nSfrm);
for n=1:nSfrm
ns = [0; 1] + (sfrm(n))*2;
c_init = 2^28*floor(Nidprs/512) + ...
2^10*(7*(ns + 1) + l_symb + 1)*(2*mod(Nidprs, 512)+1) + ...
2*mod(Nidprs, 512) + Ncp;
for i=1:2
if (i == 1)
L_prs = L_prs_s0 + 1;
else
L_prs = L_prs_s1 + 1;
end
for j=1:length(L_prs)
c = gen_gold(M_pn, c_init(i, L_prs(j)));
r = 1/sqrt(2)*((1 - 2*c(1:2:end)) + 1i*(1 - 2*c(2:2:end)));
ap_prs((i-1)*Nprs_symb_s0*m_prs_s + (j-1)*m_prs_s + m_prs+1, n) = ...
r(m_prs + Nrbmaxdl - Nrbprs + 1);
end
end
end
```

Первичные сигналы синхронизации PSS

В сети LTE всего 504 уникальных идентификатора соты на физическом уровне. Идентификаторы соты на физическом уровне сгруппированы в 168 уникальных групп, где в каждой группе по 3 идентификатора. Группировка осуществляется так, что каждый идентификатор соты на физическом уровне

является частью одной и только одной группы идентификаторов сот на физическом уровне. Идентификатор соты на физическом уровне N_{ID}^{cell} определяется как

$$N_{ID}^{cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)}; \quad (36)$$

где число $N_{ID}^{(1)}$ находится в диапазоне от 0 до 167 и определяет группу идентификаторов сот на физическом уровне, а число $N_{ID}^{(2)}$ находится в пределах от 0 до 2 и определяет идентификатор сот на физическом уровне в пределах группы.

Формирование последовательности. Последовательность первичного сигнала синхронизации PSS (Primary Synchronization Signal) $d(n)$ формируется из последовательности Задова-Чу в частотном домене согласно выражению

$$d_u(n) = \begin{cases} e^{-j\frac{\pi u n(n+1)}{63}} & n = 0, 1, \dots, 30; \\ e^{-j\frac{\pi u (n+1)(n+2)}{63}} & n = 31, 32, \dots, 61. \end{cases} \quad (37)$$

где u – показатель корня последовательности Задова-Чу (таблица 3).

Таблица 3

Показатель корня первичного сигнала синхронизации

Идентификатор соты в группе $N_{ID}^{(2)}$	Показатель корня u
0	25
1	29
2	43

Отображение на ресурсные элементы. Отображение последовательности $d_u(n)$ на ресурсные элементы зависит от структуры кадра. Пользовательское устройство UE считает, что если по одному из антенных портов ведется передача одного из опорных сигналов канала «вниз», то по тому же антенному порту не может вестись передача первичного сигнала синхронизации. Также UE считает, что если через данный антенный порт ведется передача первичного сигнала синхронизации PSS, то никакой другой сигнал PSS через данный антенный порт не передается. Отображение последовательности $d_u(n)$ на ресурсные элементы осуществляется согласно

$$a_{k,l} = d(n), n = 0, \dots, 61; \quad (38)$$

$$k = n - 31 + \frac{N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB}}{2}; \quad (39)$$

Для структуры кадра типа 1 первичный сигнал синхронизации PSS отображается на последний OFDM символ в слотах 0 и 10. Для структуры кадра типа 2 первичный сигнал синхронизации PSS отображается на 3-й OFDM символ в субкадрах 1 и 6. Индексы ресурсных элементов (k, l) в OFDM символах, определяются согласно выражениям

$$k = n - 31 + \frac{N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB}}{2}; \quad (40)$$

$$n = -5, -4, \dots, -1, 62, 63, \dots, 66; \quad (41)$$

зарезервированы и не используются для передачи первичных сигналов синхронизации PSS.

Для структуры кадра типа 3 первичный сигнал синхронизации отображается на ресурсные элементы аналогично структуре кадра типа 1 с учетом следующих исключений: а)

первичный сигнал синхронизации передается только тогда, когда соответствующий субкадр не пустой и его последние 12 OFDM символов задействованы для передачи; б) первичный сигнал синхронизации, являющийся составной частью сигнала обнаружения, передается в последнем OFDM символе первого слота фрагмента сигнала обнаружения.

Для выделенных сот MBMS первичный сигнал синхронизации отображается на ресурсные элементы аналогично структуре кадра типа 1 с учетом следующего исключения: первичный сигнал синхронизации передается в слоте 0 только в субкадрах, номера которых удовлетворяют условию $n_f \bmod 4 = 0$.

Отображение сигналов PSS на ресурсные элементы ресурсной сетки реализуется двумя функциями. Первая функция (скрипт 6) вычисляет индексы расположения сигналов PSS в ресурсных элементах ресурсной сетки; аргументом функции является параметр enbParam, содержащий идентификатор соты. Вторая функция (скрипт 7) выполняет формирование и отображение сигналов PSS на ресурсные элементы ресурсной сетки; аргументом функции является параметр cellID.

Скрипт 6. Функция вычисления индексов расположения сигналов PSS

```
function ind = get_pss_indices(enbParam)
Nrbdl = enbParam.NRBDL; % число RB (resource block)
% полосе downlink
Nrbsc = enbParam.NRBSC; % число поднесущих в одном RB
Nsymbdl = enbParam.NSYMBOL; % число символов в слоте
L_pss = Nsymbdl - 1;
m_pss = 0:61;
k_pss_s0_s10 = m_pss - 31 + Nrbdl*Nrbsc/2 + 1;
ind = k_pss_s0_s10 + L_pss*Nrbdl*Nrbsc;
end
```

Скрипт 7. Функция отображения сигналов PSS на ресурсные элементы

```
function pss = get_pss(cellID)
[~, Nid_2] = get_group_ids(cellID);
switch (Nid_2)
case 0
u = 25;
case 1
u = 29;
case 2
u = 34;
end
pss = [exp(-1i*pi*u.*(0:30)/63), exp(-1i*pi*u.*(32:62).*(33:63)/63)];
end
```

Вторичные сигналы синхронизации SSS

Формирование последовательности. Последовательность $d(0), \dots, d(61)$ вторичного сигнала синхронизации SSS (Secondary Synchronization Signal) формируется в результате соединения (сцепления) с перемежением двух бинарных последовательностей длины 31. Полученная в результате соединения последовательность скремблируется последовательно первичного сигнала синхронизации. Комбинация двух последовательностей длины 31, образующая вторичный сигнал синхронизации, изменяется от субкадра к субкадру согласно выражению

$$d(2n) = \begin{cases} s_0^{(m_0)}(n)c_0(n) & \text{в субкадрах } 0,1,2,3,4; \\ s_1^{(m_1)}(n)c_0(n) & \text{в субкадрах } 5,6,7,8,9; \end{cases} \quad (42)$$

$$d(2n + 1) = \begin{cases} s_1^{(m_1)}(n)c_1(n)z_1^{(m_0)}(n) & \text{в субкадрах } 0,1,2,3,4; \\ s_0^{(m_0)}(n)c_1(n)z_1^{(m_1)}(n) & \text{в субкадрах } 5,6,7,8,9; \end{cases} \quad (43)$$

где $0 \leq n \leq 30$. Индексы m_0 и m_1 определяются идентификатором группы сот на физическом уровне $N_{ID}^{(1)}$ согласно выражению

$$m_0 = m' \bmod 31; \quad (44)$$

$$m_1 = (m_0 + \lfloor m'/31 \rfloor + 1) \bmod 31; \quad (45)$$

$$m' = N_{ID}^{(1)} + q(q + 1)/2; q = \left\lfloor \frac{N_{ID}^{(1)} + q'(q' + 1)/2}{30} \right\rfloor; q' = \lfloor N_{ID}^{(1)} / 30 \rfloor. \quad (46)$$

Две последовательности $s_0^{(m_0)}(n)$ и $s_1^{(m_1)}(n)$ определяются как два различных циклических сдвига m -последовательности $\tilde{s}(n)$ согласно выражениям

$$s_0^{(m_0)}(n) = \tilde{s}((n + m_0) \bmod 31); \quad (47)$$

$$s_1^{(m_1)}(n) = \tilde{s}((n + m_1) \bmod 31); \quad (48)$$

где

$$\tilde{s}(i) = 1 - 2x(i); 0 \leq i \leq 30; \quad (49)$$

$$x(\bar{i} + 5) = (x(\bar{i} + 2) + x(\bar{i})) \bmod 2, 0 \leq \bar{i} \leq 25; \quad (50)$$

с начальными условиями

$$x(0) = 0; x(1) = 0; x(2) = 0; x(3) = 0; x(4) = 1. \quad (51)$$

Две скремблирующие последовательности $c_0(n)$ и $c_1(n)$ зависят от сигнала первичной синхронизации PSS и определяются двумя различными циклическими сдвигами m -последовательности $\tilde{c}(n)$ согласно выражениям

$$c_0(n) = \tilde{c}((n + N_{ID}^{(2)}) \bmod 31); \quad (52)$$

$$c_1(n) = \tilde{c}((n + N_{ID}^{(2)} + 3) \bmod 31); \quad (53)$$

где $N_{ID}^{(2)} \in \{0,1,2\}$ – идентификатор соты внутри группы $N_{ID}^{(1)}$, а

$$\tilde{c}(i) = 1 - 2x(i); 0 \leq i \leq 30; \quad (54)$$

$$x(\bar{i} + 5) = (x(\bar{i} + 3) + x(\bar{i})) \bmod 2, 0 \leq \bar{i} \leq 25; \quad (55)$$

с начальными условиями

$$x(0) = 0; x(1) = 0; x(2) = 0; x(3) = 0; x(4) = 1. \quad (56)$$

Скремблирующие последовательности $z_1^{(m_0)}(n)$ и $z_1^{(m_1)}(n)$ определяются как два различных циклических сдвига m -последовательности $\tilde{z}(n)$ согласно

$$z_1^{(m_0)}(n) = \tilde{z}((n + (m_0 \bmod 8)) \bmod 31); \quad (57)$$

$$z_1^{(m_1)}(n) = \tilde{z}((n + (m_1 \bmod 8)) \bmod 31); \quad (58)$$

где

$$\tilde{z}(i) = 1 - 2x(i); 0 \leq i \leq 30; \quad (59)$$

$$x(\bar{i} + 5) = (x(\bar{i} + 4) + x(\bar{i} + 2) + x(\bar{i} + 1) + x(\bar{i})) \bmod 2, 0 \leq \bar{i} \leq 25; \quad (60)$$

с начальными условиями

$$x(0) = 0; x(1) = 0; x(2) = 0; x(3) = 0; x(4) = 1. \quad (61)$$

а индексы m_0 и m_1 содержит таблица 4.

Отображение последовательности на ресурсные элементы зависит от структуры кадра. В субкадре структуры кадра типа 1 и типа 3 и в половине кадра структуры кадра типа 2 для вторичного сигнала синхронизации SSS используется тот же антенный порт, что и для первичного сигнала синхронизации PSS. Последовательность $d(n)$ отображается на ресурсные элементы согласно

$$a_{k,l} = d(n), n = 0, \dots, 61; \quad (62)$$

$$k = n - 31 + \frac{N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB}}{2}; \quad (63)$$

$$l = \begin{cases} N_{Symb}^{DL} - 2 & \text{в слотах } 0 \text{ и } 10 & \text{для кадра типа 1} \\ & & \text{за исключением MBMS;} \\ N_{Symb}^{DL} - 1 & \text{в слотах } 1 \text{ и } 11 & \text{для структуры кадра типа 2} \\ N_{Symb}^{DL} - 2 & \text{в слотах с PSS} & \text{для структуры кадра типа 3} \\ N_{Symb}^{DL} - 2 & \text{в слотах с PSS} & \text{для выделенных сот MBMS} \end{cases} \quad (64)$$

Ресурсные элементы с индексами (k, l) , определяемыми выражениями (62) и (63) при $n = -5, -4, \dots, -1, 62, 63, \dots, 66$, зарезервированы и не используются для передачи вторичных сигналов синхронизации SSS.

Таблица 4

Соответствие идентификатора группы $N_{ID}^{(1)}$ и индексов m_0, m_1

$N_{ID}^{(1)}$	m_0	m_1	$N_{ID}^{(1)}$	m_0	m_1	$N_{ID}^{(1)}$	m_0	m_1	$N_{ID}^{(1)}$	m_0	m_1	$N_{ID}^{(1)}$	m_0	m_1
0	0	1	34	4	6	68	9	12	102	15	19	136	22	27
1	1	2	35	5	7	69	10	13	103	16	20	137	23	28
2	2	3	36	6	8	70	11	14	104	17	21	138	24	29
3	3	4	37	7	9	71	12	15	105	18	22	139	25	30
4	4	5	38	8	10	72	13	16	106	19	23	140	0	6
5	5	6	39	9	11	73	14	17	107	20	24	141	1	7
6	6	7	40	10	12	74	15	18	108	21	25	142	2	8
7	7	8	41	11	13	75	16	19	109	22	26	143	3	9
8	8	9	42	12	14	76	17	20	110	23	27	144	4	10
9	9	10	43	13	15	77	18	21	111	24	28	145	5	11
10	10	11	44	14	16	78	19	22	112	25	29	146	6	12
11	11	12	45	15	17	79	20	23	113	26	30	147	7	13
12	12	13	46	16	18	80	21	24	114	0	5	148	8	14
13	13	14	47	17	19	81	22	25	115	1	6	149	9	15
14	14	15	48	18	20	82	23	26	116	2	7	150	10	16
15	15	16	49	19	21	83	24	27	117	3	8	151	11	17
16	16	17	50	20	22	84	25	28	118	4	9	152	12	18
17	17	18	51	21	23	85	26	29	119	5	10	153	13	19
18	18	19	52	22	24	86	27	30	120	6	11	154	14	20
19	19	20	53	23	25	87	0	4	121	7	12	155	15	21
20	20	21	54	24	26	88	1	5	122	8	13	156	16	22
21	21	22	55	25	27	89	2	6	123	9	14	157	17	23
22	22	23	56	26	28	90	3	7	124	10	15	158	18	24
23	23	24	57	27	29	91	4	8	125	11	16	159	19	25
24	24	25	58	28	30	92	5	9	126	12	17	160	20	26
25	25	26	59	0	3	93	6	10	127	13	18	161	21	27
26	26	27	60	1	4	94	7	11	128	14	19	162	22	28
27	27	28	61	2	5	95	8	12	129	15	20	163	23	29
28	28	29	62	3	6	96	9	13	130	16	21	164	24	30
29	29	30	63	4	7	97	10	14	131	17	22	165	0	7
30	0	2	64	5	8	98	11	15	132	18	23	166	1	8
31	1	3	65	6	9	99	12	16	133	19	24	167	2	9
32	2	4	66	7	10	100	13	17	134	20	25	-	-	-
33	3	5	67	8	11	101	14	18	135	21	26	-	-	-

Отображение сигналов SSS на ресурсные элементы ресурсной сетки реализуется двумя функциями. Первая функция (скрипт 8) вычисляет индексы расположения сигналов SSS в ресурсных элементах ресурсной сетки, аргументом

функции является параметр `enbParam`, содержащий идентификатор соты. Вторая функция (скрипт 9) выполняет формирование и отображение сигналов SSS на ресурсные элементы ресурсной сетки; аргументом функции является `cellID`.

Скрипт 8. Функция вычисления индексов расположения сигналов SSS

```
function ind = get_sss_indices(enbParam)
Nrbdl = enbParam.NRBDL; % число RB (resource block)
в полосе downlink
Nrbsc = enbParam.NRBCS; % число поднесущих в одном RB
Nsybdl = enbParam.NSYBDL; % число символов в слоте
L_sss = Nsybdl - 2;
m_sss = 0:61;
k_sss_s0_s10 = m_sss - 31 + Nrbdl*Nrbsc/2 + 1;
ind = k_sss_s0_s10 + L_sss*Nrbdl*Nrbsc;
end
```

Скрипт 9. Функция отображения сигналов SSS на ресурсные элементы

```
function [sss_s0, sss_s10] = get_sss(cellID)
[Nid_1, Nid_2] = get_group_ids(cellID);
m_sss = 0:30;
q_ = floor(Nid_1/30);
q = floor((Nid_1 + q_*(q_ + 1)/2)/30);
m_ = Nid_1 + q_*(q_ + 1)/2;
m0 = mod(m_, 31);
m1 = mod(m0 + floor(m_/31) + 1, 31);
x = zeros(1, 31);
x(5) = 1;
for i=1:26
    x(i+5) = mod(x(i+2) + x(i), 2);
end
s = 1 - 2*x;
s0 = s(mod(m_sss + m0, 31) + 1);
s1 = s(mod(m_sss + m1, 31) + 1);
x = zeros(1, 31);
x(5) = 1;
for i=1:26
    x(i+5) = mod(x(i+3) + x(i), 2);
end
c = 1 - 2*x;
c0 = c(mod(m_sss + Nid_2, 31) + 1);
c1 = c(mod(m_sss + Nid_2 + 3, 31) + 1);
x = zeros(1, 31);
x(5) = 1;
for i=1:26
    x(i+5) = mod(x(i+4) + x(i+2) + x(i+1) + x(i), 2);
end
z = 1 - 2*x;
z0 = z(mod(m_sss + mod(m0, 8), 31) + 1);
z1 = z(mod(m_sss + mod(m1, 8), 31) + 1);
sss_s0 = zeros(1, 62);
sss_s0(1:2:end) = s0.*c0;
sss_s0(2:2:end) = s1.*c1.*z0;
sss_s10 = zeros(1, 62);
sss_s10(1:2:end) = s1.*c0;
sss_s10(2:2:end) = s0.*c1.*z1;
end
```

Формирование ресурсной сетки с опорными сигналами

Рисунок 10 иллюстрирует частотно-временную ресурсную сетку с рассмотренными выше опорными сигналами LTE для сигнала с полосой 1,4 МГц.

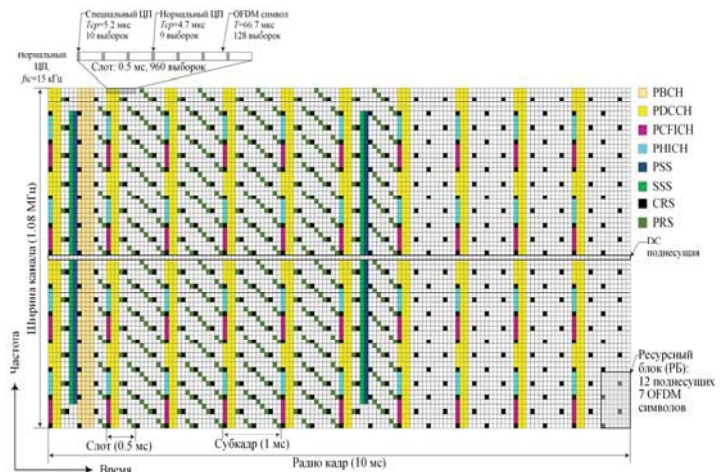


Рис. 10. Частотно-временная ресурсная сетка для сигнала с полосой 1,4 МГц

Скрипт 10 содержит функцию формирования частотно-временной ресурсной сетки с рассмотренными выше опорными сигналами стандарта LTE.

Скрипт 10. Функция формирования частотно-временной ресурсной сетки

```
function frame_grid = generate_LTE_PRS_frame(enbParam)
% функция формирует ресурсную сетку одного фрейма LTE
для передачи PRS
Nidcell = enbParam.CellID; % ID соты (Cell ID)
Nrbdl = enbParam.NRBDL; % число RB (resource block)
в полосе downlink
Nrbsc = enbParam.NRBCS; % число поднесущих в одном
RB
Nsybdl = enbParam.NSYBDL; % число символов в слоте
% ресурсная сетка сабфрейма (Subframe Resource Grid -
SRG)
sbframe_grid = zeros(Nrbdl*Nrbsc, Nsybdl*2);
% ресурсная сетка фрейма (Frame Resource Grid - RG)
frame_grid = repmat({sbframe_grid}, 1, 10);
% Формирование PSS (TS 36.211 6.11.1)
% вычисление индексов ресурсных элементов RE в пределах
сабфрейма для PSS (6.11.1.2)
ind_pss_s0_s10 = get_pss_indices(enbParam);
% формирование последовательности PSS (6.11.1.1)
d_pss = get_pss(Nidcell);
ap_pss = d_pss;
% размещение сигнала PSS в RG
sbframe_grid_0 = frame_grid{1};
sbframe_grid_0(ind_pss_s0_s10) = ap_pss;
sbframe_grid_5 = frame_grid{6};
sbframe_grid_5(ind_pss_s0_s10) = ap_pss;
frame_grid{1} = sbframe_grid_0;
frame_grid{6} = sbframe_grid_5;
% Формирование SSS (TS 36.211 6.11.2)
% вычисление индексов RE в пределах сабфрейма для сиг-
нала SSS (6.11.2.2)
ind_sss_s0_s10 = get_sss_indices(enbParam);
% формирование последовательности SSS (6.11.2.1)
[d_sss_s0, d_sss_s10] = get_sss(Nidcell);
ap_sss_s0 = d_sss_s0; ap_sss_s10 = d_sss_s10;
% размещение сигнала SSS в RG
sbframe_grid_0 = frame_grid{1};
sbframe_grid_0(ind_sss_s0_s10) = ap_sss_s0;
sbframe_grid_5 = frame_grid{6};
sbframe_grid_5(ind_sss_s0_s10) = ap_sss_s10;
frame_grid{1} = sbframe_grid_0;
frame_grid{6} = sbframe_grid_5;
% Формирование CRS (TS 36.211 6.10.1)
```

```

% вычисление индексов RE в пределах сабфрейма для сигнала CRS (6.10.1.2)
[ind_crs_s0, ind_crs_s1] = get_crs_indices(enbParam);
% формирование последовательности CRS (6.10.1.1)
for nSfrm=1:10
    ap_crs = get_crs(enbParam, nSfrm-1);
    % размещение сигнала CRS в RG
    sbframe_grid_n = frame_grid{nSfrm};
    sbframe_grid_n([ind_crs_s0; ind_crs_s1]) = ap_crs;
    frame_grid{nSfrm} = sbframe_grid_n;
end
% Формирование PRS (TS 36.211 6.10.4)
% вычисление индексов RE в пределах сабфрейма для сигнала PRS (6.10.4.2)
[ind_prs_s0, ind_prs_s1, sbfrm0_ind, sbfrm5_ind] =
get_prs_indices(enbParam);
% формирование последовательности PRS (6.10.4.1)
for nSfrm=1:10
    ap_prs = get_prs(enbParam, nSfrm-1);
    % размещение сигнала PRS в RG (используются только те RE,
    % которые не заняты другими сигналами)
    ind_prs = [ind_prs_s0; ind_prs_s1];
    if (nSfrm == 1)
        ap_prs = ap_prs(sbfrm0_ind);
        ind_prs = ind_prs(sbfrm0_ind);
    elseif (nSfrm == 6)
        ap_prs = ap_prs(sbfrm5_ind);
        ind_prs = ind_prs(sbfrm5_ind);
    end
    sbframe_grid_n = frame_grid{nSfrm};
    sbframe_grid_n(ind_prs) = ap_prs; frame_grid{nSfrm} =
sbframe_grid_n;
end
frame_grid = [frame_grid{:}];
end

```

Рисунок 11 иллюстрирует структуру программных модулей формирования частотно-временной ресурсной сетки с рассмотренными опорными сигналами.

Формирование сигнала OFDM на нулевой частоте

Непрерывный во времени сигнал $s_l^{(p)}(t)$ на антенном порте p в OFDM символе l в слоте канала «вниз» определяется выражением

$$s_l^{(p)}(t) = \sum_{k=-\lfloor N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} / 2 \rfloor}^{-1} a_{k^{(-)}, l}^{(p)} \cdot e^{j2\pi k \Delta f (t - N_{CP, l} T_s)} + \sum_{k=1}^{\lfloor N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} / 2 \rfloor} a_{k^{(+)}, l}^{(p)} \cdot e^{j2\pi k \Delta f (t - N_{CP, l} T_s)}; \quad (65)$$

для $0 \leq t \leq (N_{CP, l} + N) T_s$, $k^{(-)} = k + \lfloor N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} / 2 \rfloor$, $k^{(+)} = k + \lfloor N_{RB}^{DL} N_{sc}^{RB} / 2 \rfloor - 1$. Переменная $N = 2048$ для разноса поднесущих $\Delta f = 15$ кГц, $N = 4096$ для $\Delta f = 7.5$ кГц, $N = 12288$ для $\Delta f = 2.5$ кГц, $N = 24576$ для $\Delta f = 1.25$ кГц и $N = 82944$ для $\Delta f = 1 / (82944 T_s) \approx 0.37$ кГц.

Для структуры кадра типа 3, если канал PDCCH передается в субкадре, начиная с OFDM символа $s_0^{(p)}(t)$ на основе принятой из канала «вверх» информации, которая содержит индикатор занятости канала '1', OFDM символ $s_l^{(p)}(t)$, $l = 13$ в предыдущем субкадре может быть сформирован согласно

$$s_{13}^{(p)}(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t < 768 T_s; \\ s_0^{(p)}(t - N_{CP, 13} T_s) & 768 T_s \leq t < (N_{CP, 13} + N) T_s. \end{cases} \quad (66)$$

OFDM символы в слоте передаются в порядке увеличения индекса l , начиная с $l = 0$, где OFDM символ $l > 0$ начинается в момент времени $\sum_{l'}^{l-1} (N_{CP, l'} + N) T_s$ в пределах слота. В том случае, если первый OFDM символ использует нормальный циклический префикс, а остальные OFDM символы используют расширенный циклический префикс, начальное положение OFDM символов с расширенным циклическим префиксом будет идентично положению символов в слоте, где все OFDM символы используют расширенный циклический префикс. Таким образом, получится часть слота между двумя областями циклического префикса, где переданный сигнал не специфицирован. Для разноса поднесущих $\Delta f = 1.25$ кГц используется один OFDM символ на слот и один слот на субкадр. Для разноса поднесущих $\Delta f \approx 0.37$ кГц используется один OFDM символ на слот и один слот на 3 мс.

Таблица 5

Параметры OFDM символов

Конфигурация	Длина циклического префикса $N_{CP, l}$
Нормальный циклический префикс	$\Delta f = 15$ кГц
	160 для $l = 0$ 144 для $l = 1, 2, \dots, 6$
Расширенный циклический префикс	$\Delta f = 15$ кГц
	$\Delta f = 7.5$ кГц
	$\Delta f = 2.5$ кГц
	$\Delta f = 1.25$ кГц
	$\Delta f \approx 0.37$ кГц

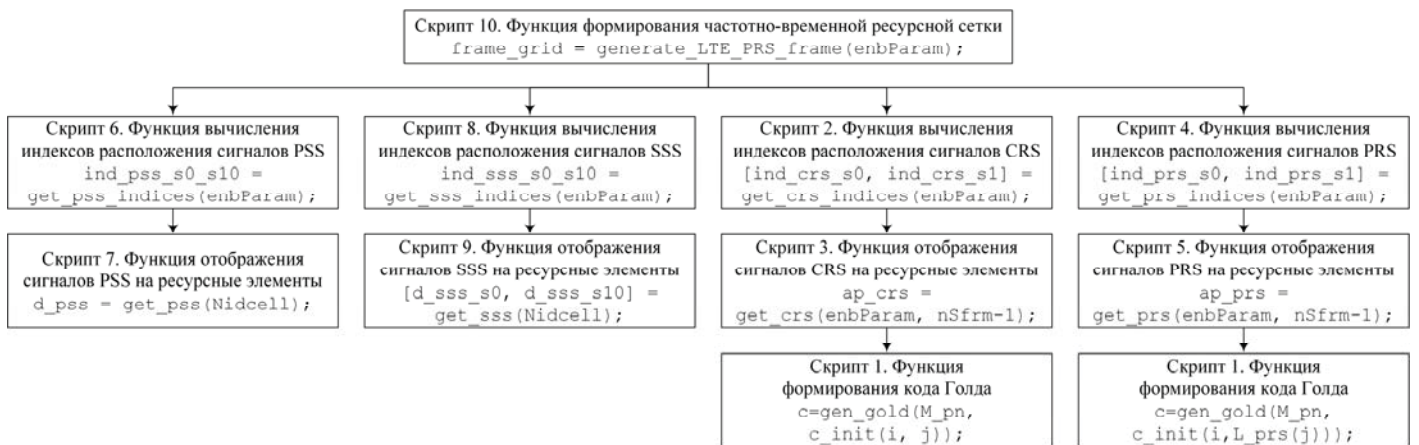


Рис. 11. Структура программных модулей формирования частотно-временной ресурсной сетки

Скрипт 11 содержит функцию формирования сигнала OFDM на нулевой частоте для канала шириной 1,4 МГц.

Скрипт 11. Функция формирования сигнала OFDM на нулевой частоте

```
function ofdmFrmSig = modulate_LTE_ofdm(frame_grid,
enbParam)
% функция формирования OFDM сигнала одного кадра LTE (TS
36.211 6.12)
% параметры OFDM для полосы 1.4 МГц
cpLen0 = 10;
cpLen = 9;
Nfft = 128;
Nrbdl = enbParam.NRBDL;
Nrbsc = enbParam.NRBSC;
Nsymbdl = enbParam.NSYMBDL;
Nsubfrm = size(frame_grid, 2)/Nsymbdl/2;
Nsc = Nrbsc*Nrbdl;
firstSC = (Nfft - Nsc)/2 + 1;
samplesPerSubframe = 2*(cpLen0 + cpLen*6 +
Nfft*Nsymbdl);
ofdmFrmSig = zeros(Nsubfrm*samplesPerSubframe, 1);
pos = 0;
for i = 1:Nsubfrm*Nsymbdl*2
    ifftin = zeros(Nfft, 1);
    ifftin(firstSC+(0:Nsc/2-1)) = frame_grid(1:Nsc/2, i);
    ifftin(firstSC+Nsc/2+1+(0:Nsc/2-1)) =
frame_grid(Nsc/2+1:end, i);
    ifftout = ifft(fftshift(ifftin, 1));
    if (mod(i - 1, Nsymbdl) == 0)
        ifftoutCP = [ifftout(end-cpLen0+1:end,:); ifftout];
        L = cpLen0 + Nfft;
        ofdmFrmSig(pos+(1:L),:) = ifftoutCP;
        pos = pos + cpLen0 + Nfft;
    else
        ifftoutCP = [ifftout(end-cpLen+1:end,:); ifftout];
        L = cpLen + Nfft;
        ofdmFrmSig(pos+(1:L),:) = ifftoutCP;
        pos = pos + cpLen + Nfft;
    end
end
end
```

Перенос сигнала OFDM на несущую частоту и передача в радиоэфир

Скрипт 12 содержит программный модуль с последовательностью процедур формирования и передачи на заданной несущей частоте в радиоэфир рассмотренных выше опорных сигналов LTE в полосе 1,4 МГц.

Скрипт 12. Программный модуль передачи опорных сигналов платой SDR

```
enbParam.CellID = 241; % ID соты (Cell ID) от
0 до 503
enbParam.PrsID = enbParam.CellID; % ID PRS сигнала
(совпадает с CellID)
enbParam.NRBDL = 6; % число RB (resource
block) в полосе downlink
enbParam.NRBPRS = 3; % число RB для пере-
дачи PRS
enbParam.NRBSC = 12; % число поднесущих в
одном RB
enbParam.NSYMBDL = 7; % число символов в слоте
enbParam.Nfft = 128; % число точек FFT
enbParam.Position = 1.2e3; % расстояние от eNB до UE
enbParam.SamplingRate = 1.92e6; % частота дискретизации
enbParam.SampPerSymb = 4;
usrpCenterFreq = 2.44e9; % несущая частота, Гц
usrpGain = 50; % усиление передающего тракта, дБ
% Формирование фрейма lte с PRS
```

```
frame_grid = generate_LTE_PRS_frame(enbParam);
ssInd = [enbParam.NRBDL*enbParam.NRBSC*5 + (1:72*2), ...
enbParam.NRBDL*enbParam.NRBSC*75 + (1:72*2)].';
% Заполнение пустых поднесущих, кроме поднесущих принад-
лежащих PSS и SSS
emptySubcarrier = (frame_grid == 0);
emptySubcarrier(ssInd) = 0;
data = 0.5/sqrt(2)*(2*(rand(size(emptySubcarrier)) >
0.5) - 1 + ...
1i*(2*(rand(size(emptySubcarrier)) >
0.5) - 1));
frame_grid(emptySubcarrier) = data(emptySubcarrier);
% Размещение RE в OFDM символе, выполнение iFFT
prs_frame_sig = modulate_LTE_ofdm(frame_grid, enbParam);

connectedRadios = findsdr;
radio = comm.SDRuTransmitter();
switch (connectedRadios.Platform)
case 'B210'
    radio.Platform = connectedRadios.Platform;
    radio.SerialNum = connectedRadios.SerialNum;
case 'N200/N210/USRP2'
    % частота дискретизации для работы с N210
    enbParam.SamplingRate = 2e6;
    % коэфф. интерполяции для работы с N210
    enbParam.SampPerSymb = 50;
    radio.IPAddress = connectedRadios.IPAddress;
case 'X310'
    % коэфф. интерполяции для работы с X310
    enbParam.SampPerSymb = 96;
    radio.IPAddress = connectedRadios.IPAddress;
otherwise
    error('Ошибка: Не обнаружена плата USRP');
end
fprintf('Обнаружена плата %s\n', connectedRadios.Platform);
radio.Platform = connectedRadios.Platform;
radio.MasterClockRate = enbParam.Sam-
plingRate*enbParam.SampPerSymb;
radio.InterpolationFactor = enbParam.SampPerSymb;
radio.CenterFrequency = usrpCenterFreq;
radio.Gain = usrpGain;
prs_frame_sig =
prs_frame_sig/max(abs(prs_frame_sig(:)));
disp('Начало передачи'); tic;
numFrmTx = 4000;
currentFrm = 0;
while currentFrm < numFrmTx % секунд
    bufferUnderflow = step(radio, prs_frame_sig);
    if bufferUnderflow~=0
        warning('Отброшенные выборки')
    end
    currentFrm = currentFrm + 1;
    fprintf('Кадр #i/%i передан...\n', currentFrm, numFrmTx)
end
release(radio);
disp('Передача завершена'); toc;
```

Далее приведем описание программы и методик лабораторных испытаний процедур формирования опорных сигналов стандарта LTE.

Лабораторные испытания SDR передатчика сигналов LTE

Рисунок 12 иллюстрирует схему лабораторных испытаний макета формирования и передачи опорных сигналов стандарта LTE.

В состав схемы лабораторных испытаний входит макет передатчика eNB и приемника UE на SDR плате USRP B210 [36]. SDR плата USRP B210 соединяется с АРМ по интерфейсу USB 3.0. АРМ с СПО Matlab поддерживает интерфейс с SDR платой USRP [38] посредством предварительно установленного драйвера UHD (USRP Hardware Driver) [39].



Рис. 12. Схема лабораторных испытаний передатчика опорных сигналов LTE

Передача опорных сигналов от SDR макета передатчика eNB к SDR макету приемника UE осуществляется посредством коаксиального кабеля через направленный ответвитель, к которому подключены средства объективного контроля: универсальный анализатор спектра R&S FSH8 [44] и универсальный анализатор сигналов R&S TSMW [45].

Проверка формирования опорных сигналов стандарта LTE производится следующим образом. В СПО Matlab формируется комплексный сигнал, содержащий сигнал первичной синхронизации PSS, сигнал вторичной синхронизации SSS, специальный опорный сигнал соты CRS и опорный сигнал позиционирования PRS. Методика формирования данных сигналов, отображение на модуляционные символы и частотно-временную сетку OFDM сигнала на нулевой частоте с последующим переносом на несущую частоту и передачу в радиоэфир представлена в разделе 0. Лабораторный макет представлен на рисунке 13.

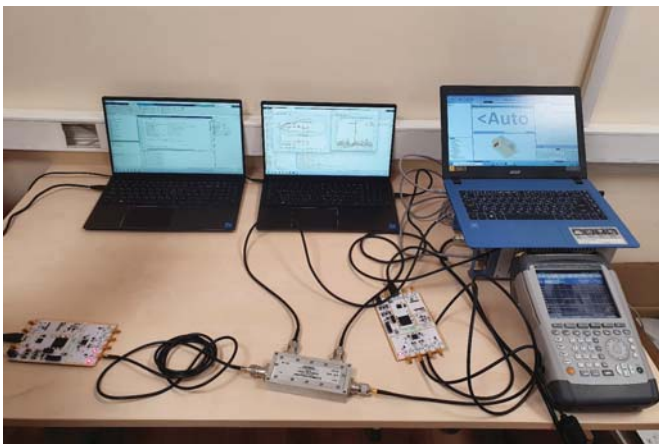


Рис. 13. Лабораторные испытания передатчика опорных сигналов LTE

Сформированный в СПО Matlab комплексный OFDM сигнал на нулевой частоте, содержащий опорные сигналы PSS, SSS, CRS и PRS, посредством драйвера UHD подается на плату программно-конфигурируемого радио SDR USRP B210 макета передатчика eNB и излучается по кабелю на направленный ответвитель. Автоматизированное рабочее место макета eNB представлено ноутбуком с предустановленным СПО Matlab и драйвером UHD. Макет UE также представлен платой SDR USRP B210 и APM с СПО Matlab. Направленный ответвитель содержит один вход и три выхода. Один из выходов ответвителя служит для подключения SDR макета приемника UE. Остальные два выхода ответвителя служат для подключения измерительных средств контроля: анализатора спектра R&S FSH8 [44] и анализатора сигналов физического уровня R&S TSMW [45].

Рисунок 14 иллюстрирует пример инициализации параметров SDR макета eNB для работы в полосе 1,4 МГц и включает следующие параметры: идентификатор соты `enbParam.CellID`; идентификатор опорного сигнала позиционирования `enbParam.PrsID` (совпадает с `enbParam.CellID`); число ресурсных блоков `enbParam.NRBBDL`; число ресурсных блоков `enbParam.NRBPRS`, используемых для передачи сигналов PRS; число поднесущих в одном ресурсном блоке `enbParam.NRBSC`; число OFDM символов в слоте `enbParam.NSYMBOL`; число точек быстрого преобразования Фурье `enbParam.Nfft`; частота дискретизации `enbParam.SamplingRate`; число выборок на символ `enbParam.SampPerSymb`. Помимо параметров физического уровня инициализируется идентификатор соты `enbParam.CellID`, который однозначно определяет форму опорных сигналов стандарта LTE PSS, SSS, CRS и PRS, используемых для формирования радионавигационного поля в составе сети с другими базовыми станциями eNB.

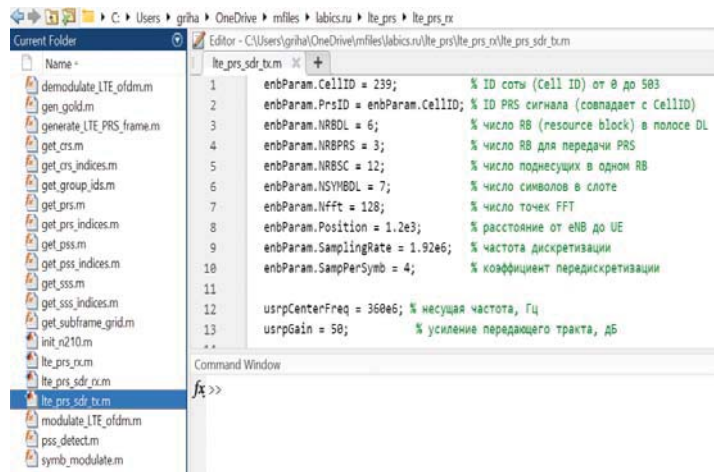


Рис. 14. Инициализация модуля передачи опорных сигналов LTE в Matlab

Для проверки признака формирования локального радионавигационного поля SDR макетом eNB в составе сети с другими eNB служит анализ спектра на заданной несущей частоте в заданной ширине полосы частот (рис. 15).

Для проверки корректности формирования локального радионавигационного поля SDR макетом eNB в составе сети с другими eNB служит анализ формы сигнала анализатором физического уровня (рис. 16). Критерием корректности формирования сигналов локального радионавигационного поля в составе сети с другими POC-C служит признак идентификатора соты CellID (рис. 17).

Предустановленный идентификатор соты $N_{ID}^{cell} = 239$ SDR макета eNB в СПО Matlab (рис. 14) однозначно определяется анализатором сигналов физического уровня через идентификатор группы $N_{ID}^{(1)} = 79$ и идентификатор соты в пределах группы $N_{ID}^{(2)} = 2$ (рис. 17). Результирующий идентификатор соты на физическом уровне, определяемый выражением (36), соответствует предварительно заданному $N_{ID}^{cell} = 239$ SDR макета eNB в СПО Matlab (рис. 14).

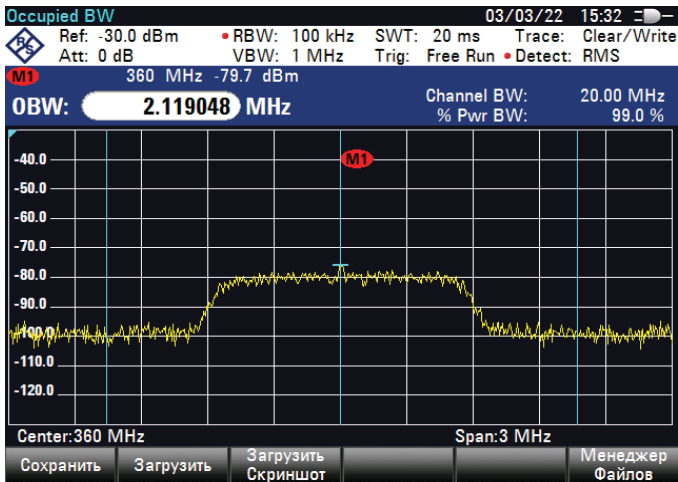


Рис. 15. Наблюдаемый спектр сигнала с шириной 1,4 МГц на несущей 360 МГц

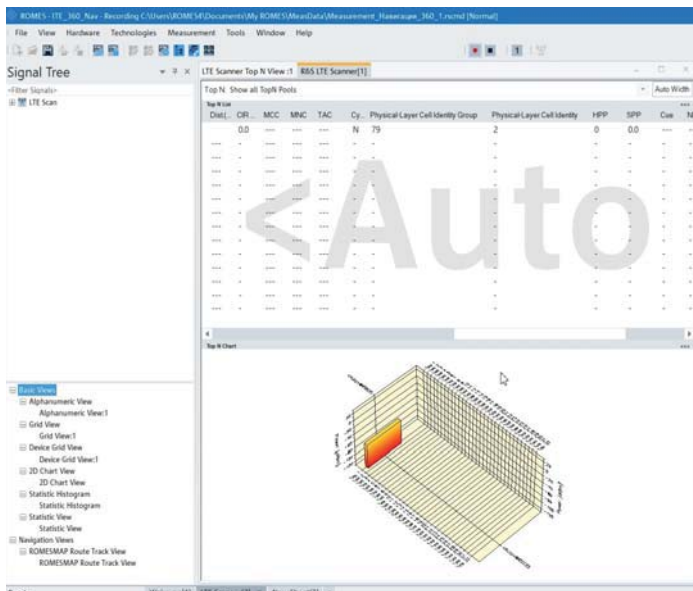


Рис. 16. Анализ формируемого сигнала LTE в R&S TSMW

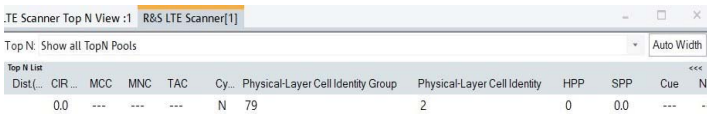


Рис. 17. Анализ CellID формируемого сигнала LTE в R&S TSMW

Заключение

В настоящей работе предложен облик разрабатываемого SDR демонстратора технологии сетевого позиционирования, а также представлен опыт программно-аппаратной реализации формирователя опорных сигналов стандарта LTE, как составной части предлагаемого SDR демонстратора. Совокупность сформированных опорных сигналов макетов базовых станций eNB стандарта LTE, однозначно определяемых уникальным идентификатором соты, образует локальное радионавигационное поле разрабатываемого демонстратора технологии сетевого позиционирования. Программная реализация макетов базовых станций eNB представлена в виде последовательного формализованного описания процедур

формирования опорных сигналов стандарта LTE согласно спецификации 3GPP TS 36.211 с приведением соответствующих скриптов Matlab. Аппаратная реализация макетов базовых станций eNB представлена в виде SDR плат USRP B210. Корректность программно-аппаратной реализации процедур формирования опорных сигналов макетов базовых станций eNB стандарта LTE подтверждена проведенными лабораторными испытаниям с использованием средств объективного контроля. В ходе лабораторных испытаний показано, что предварительно заданный при инициализации SDR макета eNB идентификатор соты корректно определяется анализатором сигналов физического уровня.

Таким образом, в настоящей статье представлен первый этап разработки SDR демонстратора технологии сетевого позиционирования, а именно, подсистема SDR макетов базовых станций eNB, которая реализует формирование и передачу опорных сигналов стандарта LTE, образующих локальное радионавигационное поле. Направлением второго этапа исследований является разработка SDR макета пользовательского устройства UE, реализующего прием и обработку опорных сигналов стандарта LTE. Реализация SDR демонстратора технологии сетевого позиционирования позволит проводить обоснование технических решений по повышению точности определения местоположения устройств как на эксплуатируемых, так и на проектируемых сетях радиосвязи.

Литература

1. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Высочин В.П. Сети мобильной связи LTE/LTE Advanced: технологии 4G, приложения и архитектура. М.: Издательский дом Медиа Паблишер, 2014. 384 с.
2. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А. Сети мобильной связи 5G: технологии, архитектура и услуги. М.: Издательский дом Медиа Паблишер, 2019. 376 с.
3. Тихвинский В., Девяткин Е., Белявский В. Особенности построения сетей синхронизации 5G: архитектура, протоколы и алгоритмы // Первая миля. 2022. № 1 (101). С. 52-61.
4. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2020. 558 с.
5. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования 5G. Москва: Горячая Линия – Телеком, 2021. 456 с.
6. Zekavat R., Buehrer R. M. Handbook of position location: Theory, practice and advances. John Wiley & Sons, 2019. 1376 P.
7. Campos R. S., Lovisolo L. RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Artech House, 2015. 369 p.
8. Sand S., Dammann A., Mensing C. Positioning in Wireless Communications Systems. Wiley, 2014. 276 p.
9. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е. Сетевое позиционирование в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 9. С. 51-58.
10. Фокин Г.А. Использование методов сетевого позиционирования в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 11. С. 29-37.
11. Фокин Г.А. Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 2. С. 3-9.
12. Фокин Г.А. Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 3. С. 13-21.
13. Киреев А.В., Фокин Г.А. Позиционирование объектов в сетях LTE посредством измерения времени прохождения сигналов // Труды учебных заведений связи. 2016. Т. 2. № 1. С. 68-72.
14. Фокин Г.А. Оценка точности позиционирования абонентских станций в сетях LTE разностно-дальномерным методом // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 2 томах: сборник научных статей в 2 томах. СПб.: СПбГУТ, 2015. Т. 1. С. 170-173.

15. *Сиверс М.А., Фокин Г.А., Духовницкий О.Г.* Позиционирование абонентских станций в сетях мобильной связи LTE разностно-дальномерным методом // Системы управления и информационные технологии. 2015. Т. 59. № 1. С. 55-61.

16. *Сиверс М.А., Фокин Г.А., Духовницкий О.Г.* Оценка возможностей метода разностно-дальномерного метода позиционирования абонентских станций в системах мобильной связи LTE средствами имитационного моделирования // Информационные технологии моделирования и управления. 2016. Т. 98. № 2. С. 149-160.

17. *Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х.* Позиционирование подвижных источников радионизлучений разностно-дальномерным методом // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2017. Т. 11. № 4. С. 41-46.

18. *Киреев А.В., Фокин Г.А.* Позиционирование базовой станции в сетях LTE средствами пространственной обработки сигналов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. III Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей. СПб.: СПбГУТ, 2014. С. 124-128.

19. *Гельгор А.Л., Павленко И.И., Фокин Г.А., Горлов А.И., Попов Е.А., Лаврухин В.А., Сиверс М.А.* Пеленгация базовых станций в сетях LTE // Электросвязь. 2014. № 9. С. 34-39.

20. *Киреев А.В., Фокин Г.А.* Пеленгация источников радионизлучения LTE мобильным пунктом радиоконтроля с круговой антенной решеткой // Труды Научно-исследовательского института радио. 2015. № 2. С. 68-71.

21. *Киреев А.В., Фокин Г.А.* Позиционирование источников радионизлучения в сетях LTE с использованием круговой антенной решетки // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. IV Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 2 томах: сборник научных статей в 2 томах. СПб.: СПбГУТ, 2015. Т. 1. С. 122-126.

22. *Fischer S.* Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE. Qualcomm White Pap. July. 2014. P.1-62.

23. *Киреев А.В., Федоренко И.В., Фокин Г.А.* Оценка точности позиционирования объекта с помощью границы Крамера-Рао // Труды учебных заведений связи. 2017. Том 3. № 2. С. 77-83.

24. *Дворников С.В., Фокин Г.А., Аль-Одхари А.Х., Федоренко И.В.* Оценка влияния свойств сигнала PRS LTE на точность позиционирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 4. С. 94-103.

25. *Liu J., Feng S.* Enhanced RSTD for scalable bandwidth of OTDOA positioning in 3GPP LTE // 2013 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS). 2013. P. 1-5.

26. *Knutti F., Sabathy M., Driusso M., Mathis H., Marshall C.* Positioning using LTE signals // Proceedings of Navigation Conference in Europe. 2015. P. 1-8.

27. *Bartolucci M., Del Peral-Rosado J.A., Estatuet-Castillo R., Garcia-Molina J.A., Crisci M., Corazza G.E.* Synchronization of low-cost open source SDRs for navigation applications // 2016 8th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC). 2016. P. 1-7.

28. *Фокин Г.А.* Технологии программно-конфигурируемого радио. Москва: Горячая Линия – Телеком, 2019. 316 с.

29. *del Peral-Rosado J.A.* Evaluation of the LTE positioning capabilities in realistic navigation channels. Universitat Autònoma de Barcelona, 2014.

30. *del Peral-Rosado J.A. et al.* Software-defined radio LTE positioning receiver towards future hybrid localization systems // Proceedings of 31st AIAA International Communications Satellite Systems Conference. 2013. P. 5610.

31. *del Peral-Rosado J.A., Seco-Granados G., Kim S., López-Salcedo J.A.* Network Design for Accurate Vehicle Localization // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. Vol. 68. № 5. P. 4316-4327.

32. *Shamaei K.* Exploiting Cellular Signals for Navigation: 4G to 5G. University of California, Irvine, 2020.

33. *Shamaei K., Khalife J., Kassas Z.M.* Exploiting LTE Signals for Navigation: Theory to Implementation // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2018. Vol. 17. № 4. P. 2173-2189.

34. *Shamaei K., Khalife J., Kassas Z.M.* Pseudorange and multipath analysis of positioning with LTE secondary synchronization signals // 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2018. P. 1-6.

35. 3GPP TS 36.211 V16.7.0 (2021-12). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 17).

36. USRP B210 (Board Only). Ettus Research. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/products/5g.html> (Дата обращения 08.06.2022).

37. USRP N210. Ettus Research. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ettus.com/all-products/un210-kit/> (Дата обращения 08.06.2022).

38. USRP Support from Communications Toolbox. MathWorks. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/hardware-support/usrp.html> (Дата обращения 08.06.2022).

39. UHD (USRP Hardware Driver). Ettus Research. [Электронный ресурс]. URL: Available: <https://www.ettus.com/sdr-software/uhd-usrp-hardware-driver/> (Дата обращения 08.06.2022).

40. OctoClock-G CDA-2990. Ettus Research. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ettus.com/all-products/octoclock-g/> (Дата обращения 08.06.2022).

41. GPSDO Kit for USRP N200/N210. Ettus Research. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ettus.com/all-products/gpsdo-kit/> (Дата обращения 08.06.2022).

42. LTE Toolbox. MathWorks. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/products/lte.html> (Дата обращения 08.06.2022).

43. Time Difference of Arrival Positioning Using PRS. MathWorks. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/lte/ug/time-difference-of-arrival-positioning-using-prs.html> (Дата обращения 08.06.2022).

44. R&S@FSH портативный анализатор спектра. Rohde & Schwarz GmbH & Co. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rohde-schwarz.com/ru/products/test-and-measurement/handheld/rs-fsh-handheld-spectrum-analyzer_63493-8180.html (Дата обращения 08.06.2022).

45. R&S@TSMW Universal Radio Network Analyzer User Manual. Rohde & Schwarz GmbH & Co. [Электронный ресурс]. URL: https://www.rohde-schwarz.com/ph/manual/r-s-tsmw-universal-radio-network-analyzer-user-manual-manuals-gb1_78701-29128.html (Дата обращения 08.06.2022).

USING SDR TECHNOLOGY FOR NETWORK POSITIONING TASKS. LTE REFERENCE SIGNAL GENERATION

Grigoriy A. Fokin, The Bonch-Bruевич SPbSUT, St. Petersburg, Russia, gri-hafokin@gmail.com

Dmitry B. Volgushev, The Bonch-Bruевич SPbSUT, St. Petersburg, Russia, d.volgushev@yandex.ru

Vitaliy N. Kharin, LLC "Laboratory of Infocommunication Networks", St. Petersburg, Russia, kh.vet@labics.ru

Abstract

An analysis of the state of the problem of building prototypes of fourth and fifth generation network positioning technology, using the approach of model-based design and software-defined radio SDR (Software-Defined Radio) according to open foreign sources showed the high actuality and relevance of this direction. At the same time, insufficient attention is paid to this area of research and development in native sources. This paper proposes the layout of the developed SDR demonstrator of network positioning technology. The task of developing the demonstrator is to substantiate technical solutions to improve the accuracy of determining the location of devices in modern and future communication networks in the absence of signals from the global navigation satellite system. The purpose of using SDR technology for network positioning tasks is to get the opportunity to improve the developed technical solutions in the process of their actual operation. Developed demonstrator includes the following subsystems: a subsystem of eNB base station prototype with known coordinates that implements the generation and transmission of reference signals of the LTE standard; prototype of the user equipment UE, which implements the reception and processing of the reference signals of the LTE standard, as well as the primary processing of measurements using the reference signals of the LTE standard; eNB base station prototype synchronization subsystem, which implements the distribution of a timestamp signal; the SDR demonstrator control subsystem, which implements the control of the procedures for collecting primary measurements of network positioning and their secondary processing with the resulting estimate of the coordinates of the user equipment UE. Also, this article describes the results of software-hardware implementation and experimental testing of the LTE reference signal generator on USRP SDR devices in Matlab environment. The procedure for generating reference signals is uniquely determined by the cell identifier, and the generator itself is an integral part of the layout of the SDR network positioning technology being developed. Experimental testing of the reference signal generator in laboratory conditions using objective control tools showed correct determination of the group identifier and cell identifier within group, which uniquely determine initialized cell identifier.

Keywords: 4G, LTE, PSS, SSS, CRS, PRS, SDR, positioning.

References

1. V.O. Tikhvinsky, S.V. Terentiev, V.P. Vysochin (2014). LTE/LTE Advanced mobile networks: 4G technologies, applications and architecture. Moscow: Media Publisher Publishing House. 384 p.
2. V.O. Tikhvinsky, S.V. Terentiev, V.A. Koval (2019). 5G mobile communication networks: technologies, architecture and services. Moscow: Media Publisher Publishing House. 376 p.
3. V. Tikhvinsky, E. Devyatkin, V. Belyavsky (2022). Features of building 5G synchronization networks: architecture, protocols and algorithms. *First Mile*. No. 1 (101), pp. 52-61.
4. G.A. Fokin (2020). Network positioning technologies. St. Petersburg: SPbGUT. 558 p.
5. G.A. Fokin (2021). 5G network positioning technologies. Moscow: Hot Line – Telecom. 456 p.
6. R. Zekavat, R.M. Buehrer (2019). Handbook of position location: Theory, practice and advances. John Wiley & Sons. 1376 p.
7. R.S. Campos, L. Lovisolo (2015). RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Artech House. 369 p.
8. S. Sand, A. Dammann, C. Mensing (2014). Positioning in Wireless Communications Systems. Wiley. 276 p.
9. G.A. Fokin, A.E. Kucheryavy (2020). Network positioning in the 5G ecosystem. *Electrosvyaz*. No. 9, pp. 51-58.
10. G.A. Fokin (2020). Using network positioning methods in the 5G eco-system. *Elektrosvyaz*. No. 11, pp. 29-37.
11. G.A. Fokin (2020). Positioning scenarios in 5G networks. *Vestnik svyazi*. No. 2, pp. 3-9.
12. G.A. Fokin (2020). Positioning scenarios in 5G networks. *Vestnik svyazi*. No. 3, pp. 13-21.
13. A.V. Kireev, G.A. Fokin (2016). Positioning of objects in LTE networks by means of measuring the signal transit time. *Proceedings of educational institutions of communication*. Vol. 2. No. 1, pp. 68-72.
14. G.A. Fokin (2015). Estimation of positioning accuracy of subscriber stations in LTE networks by difference-range method. Actual problems of info telecommunications in science and education. *IV International scientific-technical and scientific-methodical conference: collection of scientific articles in 2 volumes: collection of scientific articles in 2 volumes*. St. Petersburg: SPbGUT. Vol. 1, pp. 170-173.
15. M.A. Sivers, G.A. Fokin, O.G. Dukhovnitsky (2015). Positioning of subscriber stations in LTE mobile communication networks using a difference-range method. *Control systems and information technologies*. Vol. 59. No. 1. P. 55-61.
16. M.A. Sivers, G.A. Fokin, O.G. Dukhovnitsky (2016). Evaluation of the capabilities of the difference-range method for positioning subscriber stations in LTE mobile communication systems by means of simulation. *Information Technologies of Modeling and Control*. Vol. 98. No. 2, pp. 149-160.
17. G.A. Fokin, A. Al-Odhari (2017). Positioning of mobile sources of radio emissions by the difference-range method. *T-Comm*. Vol. 11. No. 4, pp. 41-46.
18. A.V. Kireev, G.A. Fokin (2014). Base station positioning in LTE networks by means of spatial signal processing. Actual problems of info telecommunications in science and education. *III International scientific-technical and scientific-methodical conference: collection of scientific articles*. St. Petersburg: SPbGUT, pp. 124-128.
19. A.L. Gelgor, I.I. Pavlenko, G.A. Fokin, A.I. Gorlov, E.A. Popov, V.A. Lavrukhin, M.A. Sivers (2014). Direction finding of base stations in LTE networks. *Electrosvyaz*. No. 9, pp. 34-39.

20. A.V. Kireev, G.A. Fokin (2015). Direction finding of LTE radio emission sources by a mobile radio monitoring station with a circular antenna array. *Proceedings of the Scientific Research Institute of Radio*. No. 2, pp. 68-71.
21. A.V. Kireev, G.A. Fokin (2015). Positioning of radio emission sources in LTE networks using a circular antenna array. Actual problems of info telecommunications in science and education. *IV International scientific-technical and scientific-methodological conference: collection of scientific articles in 2 volumes*. St. Petersburg: SPbGUT. Vol. 1, pp. 122-126.
22. S. Fischer (2014). Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE. Qualcomm White Pap., pp. 1-62.
23. A.V. Kireev, I.V. Fedorenko, G.A. Fokin (2017). Estimation of object positioning accuracy using the Cramer-Rao boundary. *Proceedings of educational institutions of communication*. Vol. 3. No. 2, pp. 77-83.
24. S.V. Dvornikov, G.A. Fokin, A. Al-Odkhari, I.V. Fedorenko (2017). Evaluation of the influence of the properties of the PRS LTE signal on positioning accuracy. *Problems of radio electronics. Series: TV Technique*. No. 4, pp. 94-103.
25. J. Liu, S. Feng (2013). Enhanced RSTD for scalable bandwidth of OTDOA positioning in 3GPP LTE. *2013 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, pp. 1-5.
26. F. Knutti, M. Sabathy, M. Driusso, H. Mathis, C. Marshall (2015). Positioning using LTE signals. *Proceedings of Navigation Conference in Europe*, pp. 1-8.
27. M. Bartolucci, J.A. Del Peral-Rosado, R. Estatuet-Castillo, J.A. Garcia-Molina, M. Crisci, G.E. Corazza (2016). Synchronization of low-cost open source SDRs for navigation applications. *2016 8th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC)*, pp. 1-7.
28. G.A. Fokin (2019). Software-defined radio technologies. Moscow: Hot Line – Telecom. 316 p.
29. J.A. del Peral-Rosado (2014). Evaluation of the LTE positioning capabilities in realistic navigation channels. Universitat Autònoma de Barcelona.
30. J.A. del Peral-Rosado et al. (2013). Software-defined radio LTE positioning receiver towards future hybrid localization systems. *Proceedings of 31st AIAA International Communications Satellite Systems Conference*. P. 5610.
31. J.A. del Peral-Rosado, G. Seco-Granados, S. Kim, J.A. Lopez-Salcedo (2019). Network Design for Accurate Vehicle Localization. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Vol. 68. No. 5, pp. 4316-4327.
32. K. Shamaei (2020). Exploiting Cellular Signals for Navigation: 4G to 5G. University of California, Irvine.
33. K. Shamaei, J. Khalife, Z.M. Kassas (2018). Exploiting LTE Signals for Navigation: Theory to Implementation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Vol. 17. No. 4, pp. 2173-2189.
34. K. Shamaei, J. Khalife, Z.M. Kassas (2018). Pseudorange and multipath analysis of positioning with LTE secondary synchronization signals. *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, pp. 1-6.
35. 3GPP TS 36.211 V16.7.0 (2021-12). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 17).
36. USRP B210 (Board Only). Ettus Research. [Online]. URL: <https://www.mathworks.com/products/5g.html> (Accessed: 08.06.2022).
37. USRP N210. Ettus Research. [Online]. URL: <https://www.ettus.com/all-products/un210-kit/> (Accessed: 08.06.2022).
38. USRP Support from Communications Toolbox. MathWorks. [Online]. URL: <https://www.mathworks.com/hardware-support/usrp.html> (Accessed: 08.06.2022).
39. UHD (USRP Hardware Driver). Ettus Research. [Online]. URL: <https://www.ettus.com/sdr-software/uhd-usrp-hardware-driver/> (Accessed: 08.06.2022).
40. OctoClock-G CDA-2990. Ettus Research. [Online]. URL: <https://www.ettus.com/all-products/octoclock-g/> (Accessed: 08.06.2022).
41. GPSDO Kit for USRP N200/N210. Ettus Research. [Online]. URL: <https://www.ettus.com/all-products/gpsdo-kit/> (Accessed: 08.06.2022).
42. LTE Toolbox. MathWorks. [Online]. URL: <https://www.mathworks.com/products/lte.html> (Accessed: 08.06.2022).
43. Time Difference Of Arrival Positioning Using PRS. MathWorks. [Online]. URL: <https://www.mathworks.com/help/lte/ug/time-difference-of-arrival-positioning-using-prs.html> (Accessed: 08.06.2022).
44. R&S®FSH handheld spectrum analyzer. Rohde & Schwarz GmbH & Co. [Online]. URL: https://www.rohde-schwarz.com/ru/products/test-and-measurement/handheld/rs-fsh-handheld-spectrum-analyzer_63493-8180.html (Accessed: 08.06.2022).
45. R&S®TSMW Universal Radio Network Analyzer User Manual. Rohde & Schwarz GmbH & Co. [Online]. URL: https://www.rohde-schwarz.com/ph/manual/r-s-tsmw-universal-radio-network-analyzer-user-manual-manuals-gb1_78701-29128.html (Accessed: 08.06.2022).

Information about authors:

Grigoriy A. Fokin, doctor of technical sciences, docent, associate professor of the Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications

Dmitry B. Volgushev, researcher of the Bonch-Bruевич St. Petersburg State University of Telecommunications

Vitaliy N. Kharin, candidate of technical sciences, head of control and testing department, LLC "Laboratory of Infocommunication Networks"