

Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Модели приема и обработки опорных сигналов LTE¹

Г. А. Фокин, Д. Б. Волгушев

Анализ состояния проблемы позиционирования пользовательских устройств UE с использованием инфраструктуры базовых станций eNB сетей подвижной радиосвязи LTE по открытым зарубежным источникам показывает высокую актуальность и востребованность данного направления исследований. В настоящей работе приводится анализ состояния проблемы, а также формализация моделей приема и обработки опорных сигналов LTE для макета пользовательского устройства, построенного с использованием технологии программно-конфигурируемого радио.

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

1. Введение

Анализ состояния проблемы позиционирования пользовательских устройств UE (User Equipment) с использованием инфраструктуры базовых станций eNB (eNodeB) сотовых сетей подвижной радиосвязи LTE (Long-Term Evolution) показал высокую актуальность и востребованность данного направления исследований в последние годы и нашел отражение в ряде работ отечественных [1–3] и зарубежных [4–6] авторов. Обзор открытых зарубежных источников последних лет по данной тематике [7–40] позволяет выделить отдельное направление исследований в области технологий определения местоположения (ОМП), а именно – использование технологий программно-конфигурируемого радио SDR (Software-defined radio) для задач сетевого позиционирования [41–43]. Интерес к технологиям сетевого ОМП обусловлен, с одной стороны, невозможностью надежного приема сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС, GNSS – Global Navigation Satellite System) UE в плотной городской застройке в условиях отсутствия прямой видимости NLOS (Non-Line of Sight) [44–46], а с другой стороны, востребованностью сервисов ОМП в различных сценариях [47–50].

Альтернативой ГНСС в условиях городской застройки являются сигналы SOP (Signal of Opportunity), принимаемые из радиоэфира по возможности, например, опорные сигналы сетей радиодоступа LTE. При этом с точки зрения архитектуры системы сетевого позиционирования и степени вовлечения пользовательского устройства и сетевой инфраструктуры (опорных базовых станций и сервера геолокации) в процесс ОМП в настоящей работе рассматривается позиционирование на основе пользовательского устройства (UE-based) без участия сетевой инфраструктуры с обработкой принимаемых от eNB радиосигналов исключительно в устройстве UE. Для решения навигационной задачи пользовательскому устройству необходимы первичные измерения времени прихода сигналов TOA (Time of Arrival), излучаемых базовыми станциями eNB, а для их вторичной обработки UE нужно знать координаты eNB. Координаты

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-29-00528). <https://rscf.ru/project/22-29-00528/>

eNB можно получить, воспользовавшись открытой базой данных, например, OpenCellid [51]; рис. 1 в качестве примера иллюстрирует экранную форму сервиса OpenCellid с местоположениями базовых станций в геоцентрической системе координат (СК) в формате широты и долготы в районе расположения СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича [52].

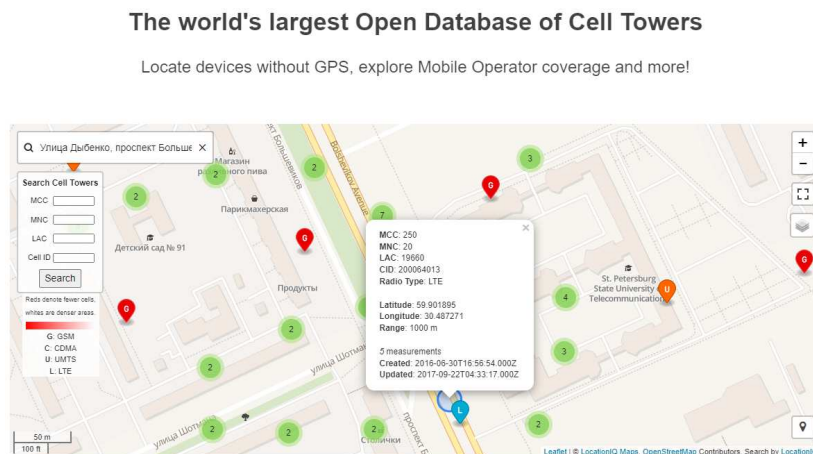


Рис. 1. Экранная форма сервиса OpenCellid

Для оценки координат пользовательского устройства разностно-дальномерным методом [53] в прямоугольной СК относительно базовых станций с известным местоположением в геоцентрической СК выполняется соответствующее преобразование форматов координат [54].

С точки зрения решения задачи ОМП радиотехническими методами сигналы SOP обладают рядом объективных конкурентных преимуществ по сравнению с ГНСС.

Основными преимуществами опорных радиосигналов LTE как частного примера сигналов SOP являются следующие. Во-первых, их изобилие в радиоэфире вследствие широкого радиопокрытия территории сетями LTE [55]. Во-вторых, возможность получения оптимистического геометрического фактора снижения точности GDOP (Geometric Dilution of Precision) вследствие достаточного количества базовых станций eNB, из которых можно выбрать наиболее удачную для ОМП топологию [56, 57]. В-третьих, достаточно высокая, по сравнению с ГНСС, мощность принимаемых сигналов [53]. В-четвертых, достаточно широкая, по сравнению с ГНСС, ширина полосы частот используемых сигналов, что теоретически повышает точность первичных дальномерных измерений по параметру времени прихода сигнала TOA [58]. В-пятых, позиционирование по доступным в радиоэфире сигналам SOP освобождает пользовательское устройство от необходимости быть абонентом сети, по сигналам которой решается навигационная задача, и, соответственно, вносить абонентскую плату; так, опорные сигналы сети LTE могут приниматься всеми устройствами [59]. В-шестых, позиционирование по сигналам SOP может считаться устойчивым к преднамеренному воздействию, так как, например, опорные сигналы LTE излучаются различными операторами в различных диапазонах частот, и, следовательно, подавить их все одновременно достаточно затруднительно [60]. Для верификации решения перечисленных задач широкое распространение в исследовательской среде получил подход программно-конфигурируемого радио SDR [41–43].

Несмотря на перечисленные преимущества, сигналы сотовых сетей радиодоступа LTE изначально разрабатывались не для навигации, а для радиосвязи. Для использования в задачах позиционирования опорных сигналов LTE, излучаемых базовыми станциями eNB, с точки зрения пользовательского устройства UE, являющегося приемником SOP и реализованного средствами SDR, необходимо предварительно решить следующие частные задачи. Во-первых, для пользовательского SDR-устройства UE необходимо разработать и программно реализовать специализированные функции приема и обработки SOP для извлечения первичных измерений из наблюдаемых в радиоэфире радиосигналов. Во-вторых, пользовательскому SDR-устройству необходимо заблаговременно «узнать» координаты базовых станций eNB, по опорным сигналам которых производятся первичные измерения TOA; однако с учетом

наличия открытых баз данных с известными координатами eNB, например, OpenCellid [51], данная частная задача решается на уровне приложения UE. В-третьих, для пользовательского устройства следует реализовать процедуры вторичной обработки собранных по сигналам SOP первичных измерений с результирующей оценкой координат (ОК) UE при известных координатах eNB. В-четвертых, пользовательскому устройству UE необходимо оценить и компенсировать рассинхронизацию излучаемых базовыми станциями eNB сигналов SOP.

В сетях подвижной связи LTE [61, 62] и NR (New Radio) [63] на радиоинтерфейсе используется мультиплексирование с ортогональным частотным разделением OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), а также технологии пространственного мультиплексирования MIMO (Multiple Input Multiple Output) [64, 65]. Для радиоинтерфейса OFDM прием и обработка радиосигналов SOP пользовательским SDR-устройством UE имеет определенную специфику и включает следующие частные подзадачи: а) извлечение из наблюдаемых в радиоэфире OFDM-сигналов SOP-параметров, необходимых для последующего приема и обработки первичных измерений; б) захват и подстройка к OFDM-радиосигналам SOP, излучаемым несколькими базовыми станциями eNB; в) извлечение навигационных параметров – первичных измерений кода, фазы и доплеровского сдвига частоты – из принимаемых OFDM-радиосигналов SOP. Для сбора и обработки первичных навигационных измерений в сетях радиодоступа LTE вместе с сигналами первичной синхронизации PSS (Primary Synchronization Signal) и вторичной синхронизации SSS (Secondary Synchronization Signal) используются специальные опорные сигналы соты CRS (Cell Specific Reference Signal) и специальные опорные сигналы позиционирования PRS (Positioning Reference Signal).

Материал настоящей работы организован далее следующим образом. В разделе 2 приводится анализ состояния проблемы использования SDR-технологии для задач сетевого позиционирования по открытым зарубежным источникам последних лет [7–40]. В разделе 3 рассмотрены проблемы приема сигналов SOP стандарта LTE устройством SDR. В разделе 4 формализованы модели опорных OFDM-сигналов стандарта LTE с целью последующего анализа соответствующих процедур. Раздел 5 содержит выводы и направления дальнейших исследований.

2. Анализ состояния проблемы использования SDR-технологии для задач сетевого позиционирования

На сегодняшний день из анализа открытых зарубежных источников [7–37] можно выделить ряд исследовательских групп, занимающихся вопросами использования SDR-технологии для задач сетевого позиционирования – это группы под руководством J.A. del Peral-Rosado [7–18], K. Shamaei [22–26] и M. Driusso [37–37]. Проведем обзор их основных результатов.

Диссертация J.A. del Peral-Rosado [7] посвящена разработке и экспериментальной апробации алгоритма оценки задержки и характеристики канала применительно к OFDM-сигналам в задачах позиционирования устройств UE сетей LTE в условиях многолучевого распространения радиоволн (РРВ). Одна из первых методологий по оценке точности позиционирования пользовательских устройств в сетях LTE на основе опорных сигналов позиционирования PRS предложена в [8]. Оценка потенциальной точности позиционирования пользовательских устройств UE в сетях LTE посредством обработки сигналов PRS в зависимости от ширины полосы частот и отношения сигнал/шум SNR (Signal to Noise Ratio) и сигнал/(шум+помеха) SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) выполнена в [9]; в частности, средствами имитационного моделирования (ИМ) продемонстрировано, что потенциальная точность первичных дальномерных (ДМ) измерений времени прихода сигнала TOA в терминах нижней границы Крамера–Рао (НГКР) достигает единиц метров в полосе 1.4 МГц при $\text{SNR} > 10$ дБ, а точность оценок координат (ОК) в результате вторичной обработки для сценария из 7 трехсекторных базовых станций зависит от уровня внутрисистемных помех, лежит в пределах от единиц до десятков метров и снижается на границе сот вследствие снижения SINR. Механизм учета погрешности первичных ДМ-измерений при вторичной обработке с оценкой координат в комплексной ИМ описан в [10]. В работе [11] посредством ИМ выполнена оценка влияния

ширины полосы сигнала LTE на точность первичных ДМ-измерений при определении местоположения UE в условиях многолучевого РРВ (МРРВ); в частности, показано, что ошибка ДМ-измерений при корреляционной обработке в целом снижается с увеличением ширины полосы частот сигнала LTE с 1.4 до 20 МГц. В работе [12] предложен алгоритм совместной максимально правдоподобной оценки JML (Joint Maximum Likelihood) задержки времени прихода и характеристики канала для первичных ДМ-измерений по сигналам PRS. Результаты исследования и разработки этого алгоритма для первичных ДМ-измерений по сигналам PRS описаны в [13], где, в частности, установлено, что он позволяет эффективно разрешать многолучевые компоненты в канале LTE даже с минимальной полосой 1.4 МГц. Одной из первых работ группы под руководством J.A. del Peral-Rosado с экспериментальной апробацией SDR-технологии для задач сетевого позиционирования на базе приемопередающей платы USRP (Universal Software Radio Peripheral) в 2013 году стала публикация [14], в которой рассмотрена архитектура устройства приема и обработки опорных сигналов LTE для определения местоположения UE методом наблюдаемой разности времен прихода сигналов OTDOA (Observed Time Difference of Arrival). Продолжение эксперимента с приемной платой RTL-SDR подтвердило возможность использования доступных SDR-устройств для захвата опорных сигналов LTE с шириной полосы 1.4 МГц в 2014 году [15]. Продолжение экспериментальной апробации SDR-технологии для задач сетевого позиционирования в 2015 году связано с проверкой синхронизации излучающих базовых станций eNB сети LTE макетом пользовательского SDR-устройства UE при условии известного местоположения eNB и UE [16]. В 2016 году предложен механизм синхронизации доступных SDR-плат HackRF по метке времени ГНСС [17]. Лабораторный стенд для эмуляции процедур формирования, передачи, приема и обработки первичных ДМ-измерений по сигналам PRS в сценариях трилатерации в сетях LTE представлен в [18]. Эмуляция сценария первичной и вторичной обработки сигналов PRS в лабораторных условиях подтвердила работоспособность алгоритма совместной максимально правдоподобной оценки JML задержки времени прихода и характеристики канала при работе в полосе 10 МГц для позиционирования устройства LTE с точностью порядка 10 м [19]. В одной из последних работ коллектив авторов под руководством J.A. del Peral-Rosado [20] исследует вопросы позиционирования транспортных средств (ТС) с использованием дорожной инфраструктуры сверхплотных сетей 5G; в частности, средствами ИМ показано достижение точности позиционирования менее одного метра при комплексировании дальномерных TOA и угломерных AOA (Angle of Arrival) измерений с восьмиэлементной антенной решеткой в канале с шириной полосы 10 МГц и расстоянием между соседними базовыми станциями от 40 до 230 м в условиях городской застройки. При использовании ДМ-измерений в канале с шириной полосы 50 МГц достигается точность позиционирования ТС до 30 см [21].

Диссертация К. Shamaei [22] посвящена разработке и экспериментальной апробации алгоритмов приема и обработки опорных радиосигналов SOP стандартов LTE и 5G NR для сетевого позиционирования пользовательских устройств в условиях отсутствия сигналов ГНСС. Комплексное устройство приема и обработки опорных радиосигналов LTE для сетевого позиционирования запатентовано в 2021 году [23]. Одной из первых работ К. Shamaei по оценке точности сетевого позиционирования на основе SDR-устройства приема и обработки сигналов LTE является исследование [24]; результаты эксперимента с использованием SDR-макета UE, расположенного на борту ТС, показали среднее смещение первичных ДМ-измерений ~12 м со среднеквадратическим отклонением (СКО) ~7 м на интервале движения ТС в ~1.5 км. Сравнение точности первичных измерений в сетях LTE на основе сигналов SSS и CRS выполнено в [25]; в частности, представлены архитектуры устройства приема и обработки сигналов SSS и CRS; прием сигналов CRS служит для уточнения грубой оценки TOA, полученной по сигналам SSS; оценка времени прихода по сигналам CRS осуществляется по характеристике канала в частотной области; СКО OK UE составило ~50 м по сигналам SSS и ~9 м по сигналам CRS. В работе [26] представлен экспериментальный анализ точности ДМ-измерений по сигналам SSS в условиях отсутствия прямой видимости NLOS, построенный на основе приемопередающей платы USRP и алгоритмов обработки, программно реализованных в Matlab; показано

различие влияния многолучевости на результаты обработки радиотехнических сигналов спутниковых GPS и наземных LTE-систем позиционирования. Эффективное с вычислительной точки зрения устройство приема и обработки опорных сигналов LTE в условиях MPPB описано в [27]; в частности, предложенный контур подстройки по задержке DLL (Delay-Locked Loop) показал устойчивость к MPPB и СКО ОК UE ~ 5 м на интервале движения ТС в ~ 1.5 км. Процедуры сбора первичных ДМ-измерений посредством обработки сигналов SSS с помощью дискриминатора для условий LOS и NLOS формализованы и экспериментально апробированы в [28]. В [29] предложено устройство приема и обработки опорных сигналов LTE на основе контура DLL с поддержкой фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ, PLL – Phased Lock Loop); экспериментальная апробация показала СКО ОК UE ~ 3 м на интервале движения ТС в ~ 1.5 км. Теоретические основы и практические результаты использования опорных сигналов LTE в задачах сетевого позиционирования систематизированы в [30]; экспериментальная апробация показала СКО ОК UE ~ 5 м в условиях NLOS. Комплексирование первичных ДМ-измерений по параметрам кода и фазы несущей опорных радиосигналов LTE вместе с инерциальными измерениями в расширенном фильтре Калмана (РФК, EKF – Extended Kalman Filter) для сценария внутри помещений показало СКО ОК UE ~ 3 м [31]. В [32] обоснован выигрыш в точности ОК при сборе и обработке первичных ДМ-измерений по опорным сигналам в сетях LTE за счет калмановской фильтрации коррелированных ошибок, образованных в условиях MPPB. Исследование [33] посвящено комплексированию радиотехнических (GNSS+SOP LTE) и инерциальных (IMU – Inertial Measurement Unit) первичных измерений, а также их сопоставлению с данными видеоаналитики на основе цифровых карт; для комплексирования используется РФК; результаты эксперимента показали СКО ОК UE в 2.8 м с приемом сигнала ГНСС и 3.1 м без ГНСС на интервале движения ТС в ~ 1.4 км. Работы последних лет [34, 35] посвящены вопросам приема и обработки сигналов стандарта 5G NR для задач позиционирования. Так, в [34] формализована структура сигналов 5G NR, после чего представлено SDR-устройство их приема и обработки на базе платы USRP; СКО ОК UE составило ~ 15 м на интервале движения ТС в ~ 1 км. В [35] после исключения рассинхронизации базовых станций gNB (gNodeB) сети 5G результаты эксперимента показали уже СКО ОК UE ~ 1 м. В одной из последних работ коллектив авторов под руководством К. Shamaei [36] экспериментально апробирует структуру устройства приема, обработки и комплексирования дальномерных (TOA) и угломерных (AOA) измерений для позиционирования.

Работы авторов под руководством М. Driusso [37–39] посвящены экспериментальной апробации процедур приема и обработки опорных сигналов CRS SDR-устройством USRP для позиционирования в сетях LTE. В [37] обосновывается возможность приема сигналов CRS различных операторов «на лету» без регистрации в сети соответствующего оператора; СКО ОК UE составила ~ 43 м. Использование алгоритма ESPRIT (Estimating Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques) для оценки времени прихода TOA по сигналам CRS позволило получить СКО ОК UE от 9 до 123 м в [38] и до ~ 31 м в [39].

К сожалению, на сегодняшний день в открытых отечественных источниках отсутствуют исследования, подобные проанализированным выше. Настоящая работа является продолжением исследования [41], открывает цикл из трех публикаций, посвященных подсистеме приема и обработки опорных сигналов LTE в задачах ОМП UE, и имеет своей конечной целью разработку и экспериментальную апробацию отечественной SDR-технологии сетевого позиционирования. Целью настоящего цикла является разработка подсистемы приема и обработки опорных сигналов LTE для сбора первичных измерений времени прихода сигнала TOA. Частной задачей настоящей публикации является формализация моделей приема и обработки опорных сигналов LTE с целью последующего анализа соответствующих процедур, их программной реализации и экспериментальной апробации на SDR-макете.

3. Проблемы приема опорных сигналов стандарта LTE устройством SDR

При реализации SDR-устройства приема и обработки OFDM-радиосигналов SOP стандарта LTE для решения задач сетевого позиционирования встают следующие проблемы [22]. *Первая проблема* заключается в одновременном приеме сигналов первичной синхронизации PSS от нескольких базовых станций eNB. Коэффициент повторного использования частот в сетях LTE равен единице и OFDM-сигналы PSS, излучаемые разными eNB, занимают в частотно-временной структуре кадра одинаковые ресурсные элементы. Поэтому при одновременном приеме нескольких опорных OFDM-сигналов PSS от разных eNB в тракте приема UE будут наблюдаться внутрисистемные помехи. Вследствие внутрисистемных помех SDR-приемник UE сможет достоверно обнаружить и принять только самый сильный OFDM-сигнал PSS, излучаемый той eNB, которая расположена наиболее близко к UE. Это обстоятельство объясняется затуханием сигнала при распространении радиоволн и известным эффектом «ближе-дальше», когда OFDM-сигналы PSS от удаленных базовых станций будут подавлены сигналом от близко расположенной eNB. Если для радиосвязи данное обстоятельство не является критичным, то для позиционирования UE на плоскости или в пространстве с использованием метода наблюдаемой разности времен прихода сигналов OTDOA пользовательскому устройству необходимо одновременно вести прием не менее трех или четырех опорных OFDM-сигналов PSS соответственно. За счет корреляционных свойств сигналов первичной синхронизации практически реализуемым оказывается одновременный прием порядка трех наиболее сильных сигналов PSS. Что касается одновременного приема более трех сигналов PSS, что крайне желательно в задачах позиционирования, то это представляет определенную техническую сложность. Таким образом, *вторая проблема* заключается в ограниченном числе одновременно принимаемых сигналов, по которым могут осуществляться первичные навигационные измерения. Для исключения этой проблемы при сборе первичных измерений пользовательским устройством UE могут использоваться другие опорные сигналы, например, CRS или PRS, однако для их приема и обработки UE должно по протоколам верхних уровней заблаговременно получить следующие параметры: идентификатор соты Cell ID, ширину полосы частот и число антенн на передающей стороне базовой станции eNB. Если прием опорных сигналов LTE ведет пользовательское устройство UE, являющееся абонентом данной сети LTE, тогда ему данные параметры известны. Однако для приема сигналов SOP SDR-устройству UE по возможности необходимо самостоятельно «на лету» определять данные параметры из принимаемых в радиоэфире опорных сигналов. Таким образом, *третья проблема* заключается в необходимости извлечения «на лету» параметров Cell ID, ширины полосы частот и числа антенн eNB. После приема опорных сигналов, например, CRS, SDR-устройству UE необходимо оценить их время прихода TOA. Известны различные алгоритмы и методики оценки параметра времени прихода TOA по принимаемым OFDM-сигналам LTE: совместная оценка канала и задержки [12], алгоритмы сверхразрешения [37, 37] и пороговые алгоритмы [37, 40]. Данные подходы характеризуются либо высокой вычислительной сложностью реализации, либо низкой точностью оценки TOA. Таким образом, *четвертая проблема* заключается в реализации алгоритма измерения времени прихода по принимаемым OFDM-сигналам LTE с требуемой точностью оценки TOA и допустимой вычислительной сложностью. Одним из основных источников погрешностей при решении навигационной задачи SDR-устройством UE является временная рассинхронизация излучаемых базовыми станциями eNB OFDM-радиосигналов. Исключить эффект рассинхронизации eNB можно в лабораторных условиях путем эмуляции синхронного излучения OFDM-радиосигналов LTE [14], однако на практике базовые станции не могут быть синхронизированы идеально. Другим подходом к решению проблемы рассинхронизации базовых станций является оценка и компенсация временной расстройки моментов излучения радиосигналов eNB посредством постобработки с использованием известных дальномерных измерений TOA, полученных по сигналам ГНСС [37], однако данный подход непрактичен в системах позиционирования подвижных устройств в режиме

реального времени. Таким образом, *пятая проблема* заключается в необходимости реализации алгоритма оценки и компенсации рассинхронизации eNB «на лету».

Далее рассмотрим модель опорных OFDM-сигналов LTE согласно 3GPP TS 36.211 [61] и 3GPP TS 36.212 [62].

4. Модели опорных сигналов стандарта LTE

Для использования опорных сигналов SOP стандарта LTE в задачах позиционирования SDR-устройством «на лету» следует формализовать модель этих OFDM-сигналов на физическом уровне. В контексте решения навигационной задачи по сигналам SOP SDR-устройство UE, которое не является абонентом сети LTE, должно «на лету» принимать опорные сигналы сети LTE из радиоэфира и извлекать из них первичные измерения времени прихода сигнала TOA. Формат опорных сигналов стандарта LTE известен и определен в спецификации 3GPP TS 36.211 [61]. Зная формат опорных сигналов, можно обосновать выбор структуры SDR-приемника, который будет решать задачу сбора первичных измерений TOA по сигналам SOP с необходимыми показателями по точности и реализуемыми требованиями по вычислительной сложности. В разделе 4.1 рассмотрена структура формируемого OFDM-сигнала LTE на физическом уровне. В разделе 4.2 представлен анализ применимости опорных сигналов LTE для сбора первичных измерений «на лету» по сигналам SOP. В разделе 4.3. формализованы модели опорных сигналов SSS и CRS для сбора первичных измерений в сетях стандарта LTE.

4.1. Структура OFDM-кадра LTE на физическом уровне

При OFDM-модуляции в стандарте LTE передаваемые символы отображаются на поднесущие с разном $\Delta f = 15 \text{ кГц}$. Если предположить, что все N_r поднесущих при OFDM-модуляции выделяются для передачи данных, то последовательный поток символов данных на входе OFDM-модулятора должен быть предварительно разделен на группы по N_r символов для их последующего отображения на N_r поднесущих. Отображение символов на поднесущие зависит от структуры кадра LTE. Для снижения внутрисистемных помех по соседнему частотному каналу в сигналах OFDM используются защитные полосы, образованные поднесущими, на которых полезные символы данных не передаются. Данные защитные полосы образованы неиспользуемыми защитными поднесущими по обеим сторонам спектра относительно используемых N_r поднесущих, на которых передаются полезные символы данных. Из общего числа N_c поднесущих N_r используются для передачи символов данных, а $N_c - N_r$ заполняются нулями. В радиointерфейсе LTE нулевая DC (Direct Current) поднесущая также не используется для передачи данных. После отображения N_r символов данных и дополнения их нулями до N_c полученная в частотном домене группа из N_c поднесущих поступает на блок обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ, IFFT – Inverse Fast Fourier Transform). На выходе блока ОБПФ получается последовательный поток OFDM-символов во временном домене; длительность OFDM-символа равна $T_{\text{ymb}} = 1/\Delta f$. Последние L_{CP} элементов каждого OFDM-символа повторяются в его начале и образуют так называемый циклический префикс (ЦП, CP – Cyclic Prefix), который служит для компенсации межсимвольной интерференции (МСИ, ISI – Intersymbol Interference), являющейся результатом многолучевого распространения радиоволн (РРВ). Рис. 2. иллюстрирует обобщенную структурную схему формирования OFDM-сигнала стандарта LTE на передающей стороне. Для восстановления переданных символов на приемной стороне описанные выше процедуры следует выполнить в обратном порядке. Так как коэффициент повторного использования частот в сетях радиодоступа LTE равен единице, все базовые станции eNB данного оператора используют единственную выделенную ему полосу частот. Для снижения внутрисистемных помех при работе базовых

станций с разными Cell ID в общей полосе частот их сигналы ортогонализируются посредством кодового разделения. При использовании отдельного частотного канала базовые станции другого оператора могут использовать те же Cell ID. Общее число поднесущих N_c в кадре LTE и число используемых поднесущих N_r однозначно определяются оператором в зависимости от ширины частотного канала. Таблица 1 содержит параметры общего N_c и используемого N_r числа поднесущих для каждого значения ширины полосы выделенного частотного канала стандарта LTE. Занимаемая ширина полосы частотного канала определяется как $W = N_r \cdot \Delta f$ и оказывается меньше выделенной полосы частотного канала стандарта LTE.

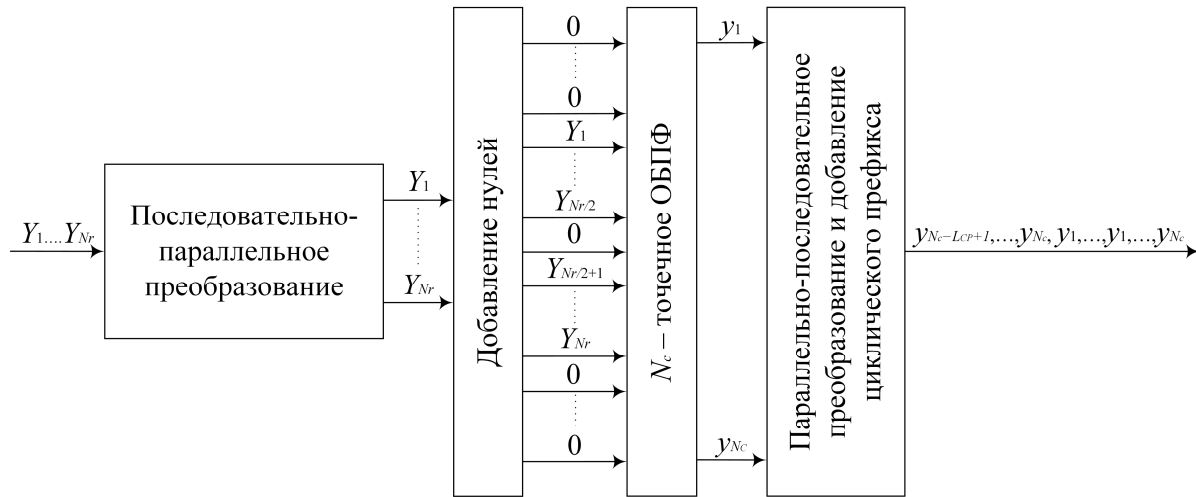


Рис. 2. Структурная схема формирования OFDM-сигнала

OFDM-символы на выходе схемы формирования группируются в кадры длительностью $T_f = 10$ мс. В стандарте LTE структура кадра зависит от режима дуплексирования; различают частотный FDD (Frequency Division Duplexing) и временной TDD (Time Division Duplexing) дуплекс. По ряду причин, в числе которых меньшая задержка и большая дальность радиосвязи, наибольшее распространение в сетях LTE получил частотный дуплекс, поэтому далее рассматривается структура кадра для режима FDD [22].

Таблица 1. Параметры физических ресурсных блоков

Выделенная / занимаемая полоса, МГц	Число ресурсных блоков	Общее число поднесущих N_c	Используемые поднесущие N_r	Частота дискретизации, МГц	Размерность БПФ
1.4 / 1.08	6	128	72	1.92	128
3 / 2.7	15	256	180	3.84	256
5 / 4.5	25	512	300	7.68	512
10 / 9.0	50	1024	600	15.36	1024
15 / 13.5	75	1536	900	30.72	2048
20 / 18.0	100	2048	1200	30.72	2048

Кадр длительностью 10 мс состоит из 10 субкадров длительностью 1 мс или 20 слотов длительностью 0.5 мс. Слот, в свою очередь, в частотно-временном домене можно рассмотреть в терминах ресурсной сетки RG (Resource Grid), которая образована несколькими ресурсными блоками RB (Resource Block). Ресурсные блоки RB, в свою очередь, состоят из простейших единиц ресурсной сетки – ресурсных элементов RE (Resource Element). Каждый ресурсный элемент RE характеризуется своим индексом поднесущей k в частотной области и номером OFDM-символа i во временной области.

Рис. 3. иллюстрирует структуру кадра стандарта LTE в режиме FDD. Рис. 4. иллюстрирует развернутую структуру кадра стандарта LTE в режиме FDD для полосы 1.4 МГц: число поднесущих $N_p = 72$. В частотном домене опорные сигналы PSS и SSS передаются на 62 центральных поднесущих; во временном домене для передачи опорных сигналов PSS выделяется седьмой (последний) OFDM-символ слотов 0 и 10; во временном домене для передачи опорных сигналов SSS выделяется шестой (предпоследний) OFDM-символ слотов 0 и 10. Опорные сигналы соты CRS распределены по поднесущим и слотам в пределах всей частотно-временной структуры кадра; распределение опорных сигналов CRS зависит от идентификатора соты Cell ID и номера OFDM-символа.

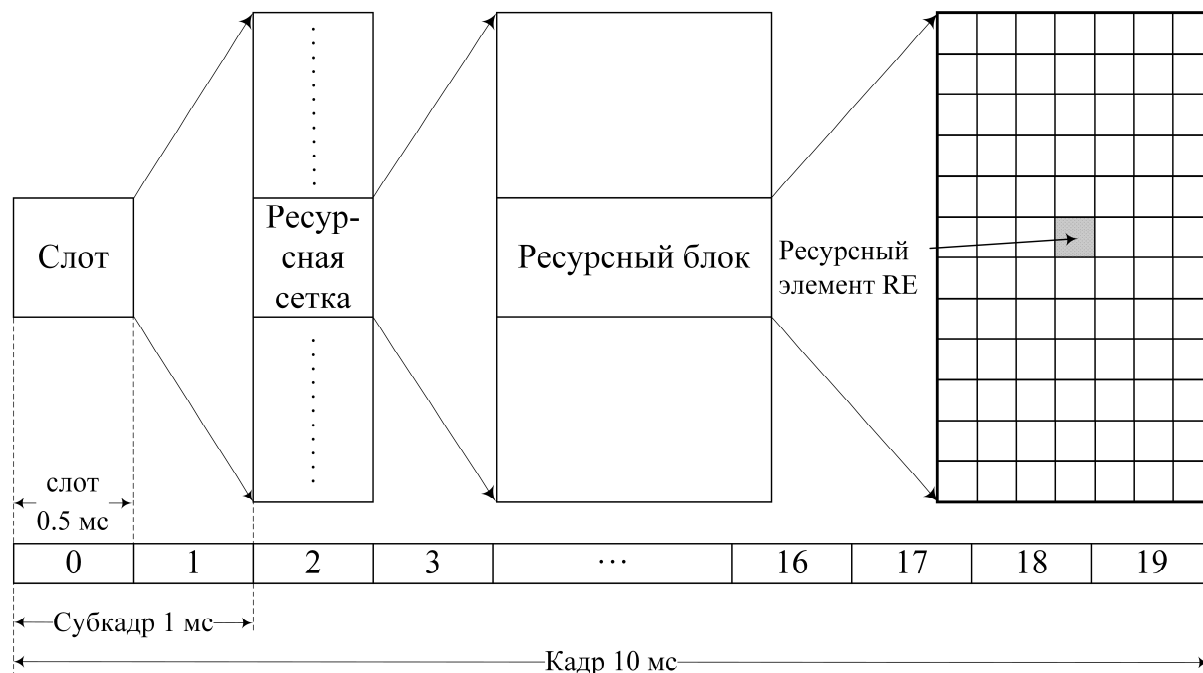


Рис. 3. Структура кадра стандарта LTE в режиме FDD

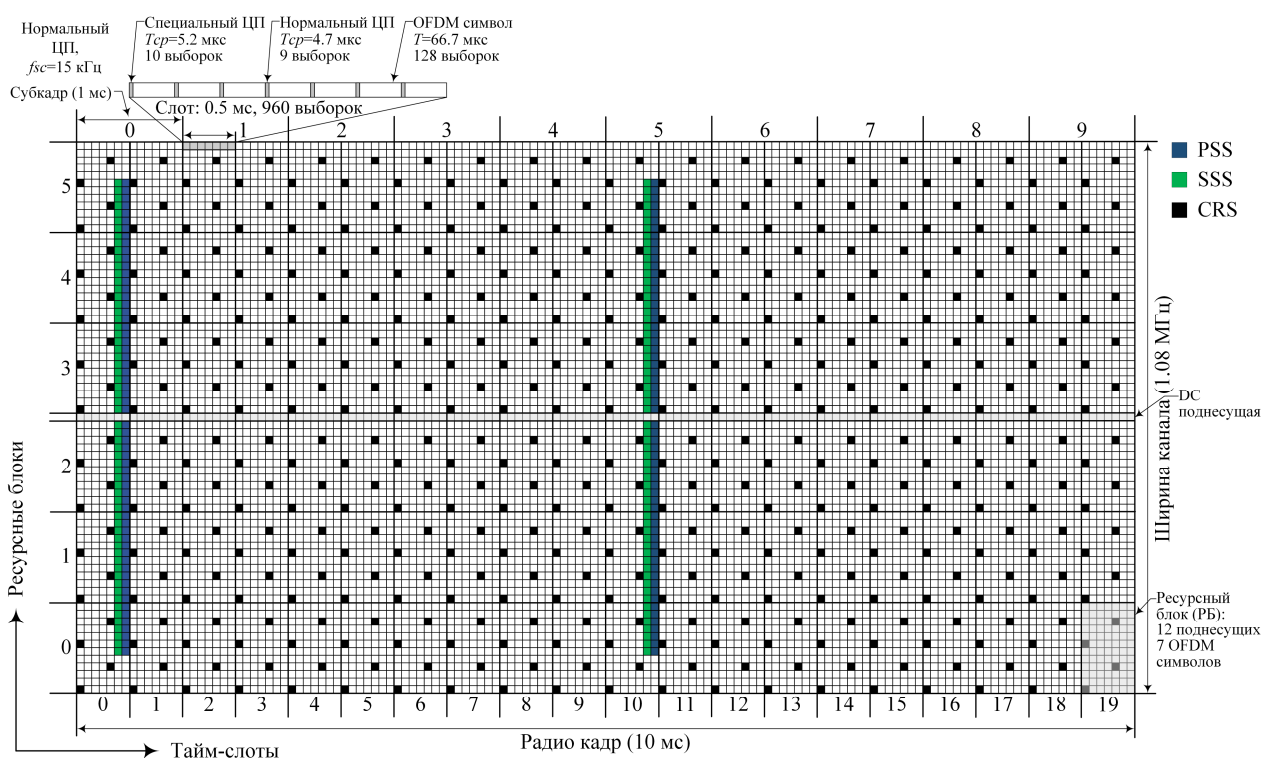


Рис. 4. Развернутая структура кадра стандарта LTE в режиме FDD для полосы 1.4 МГц

Так как каждый сигнал данных стандарта LTE отображается на строго определенный частотно-временной ресурс внутри кадра, пользовательское устройство UE для извлечения интересующих его данных должно предварительно преобразовать принимаемый OFDM-сигнал в структуру кадра. Для этого необходимо сначала определить время начала кадра. Начало кадра определяется пользовательским устройством UE по опорным первичным PSS и вторичным SSS сигналам синхронизации, передаваемым в каждом кадре LTE. UE определяет начало кадра LTE путем нахождения пика корреляционной функции (КФ) принимаемого сигнала с локально генерируемой копией сигналов PSS и SSS. Зная начало кадра LTE, приемник UE может далее исключить циклический префикс CP и взять быстрое преобразование Фурье (БПФ, FFT – Fast Fourier Transform) каждого из N_c символов: длительность нормального ЦП равна 5.21 мкс в первом OFDM-символе каждого слота и 4.69 мкс в остальных OFDM-символах слота (рис. 4.).

4.2. Анализ применимости опорных сигналов LTE для сбора первичных измерений

Для сбора первичных дальномерных измерений времени прихода сигнала TOA путем корреляционной обработки могут использоваться следующие последовательности опорных сигналов физического уровня стандарта LTE.

CP. Циклический префикс служит для компенсации МСИ, являющейся результатом многолучевого РРВ. Последовательность ЦП длиной L_{CP} повторяет последние L_{CP} выборки каждого OFDM-символа в начале этого OFDM-символа. Таким образом, при вычислении КФ принятых L_{CP} выборок ЦП в начале OFDM-символа с L_{CP} выборками ЦП в конце OFDM-символа можно оценить частотно-временную расстройку принятого сигнала [66].

PSS. Для обеспечения символьной синхронизации опорные сигналы PSS передаются в последнем (седьмом) символе слота 0 и повторяются в последнем символе слота 10. Сигнал PSS представляет собой последовательность Задова–Чу длиной 62, символы которой располагаются в 62 центральных поднесущих выделенной полосы пропускания, исключая нулевую поднесущую DC. Опорные сигналы PSS передают только три возможных кодовых последовательности, которые соответствуют целочисленному значению идентификатора соты в пределах группы $N_{ID}^{(2)}$; $N_{ID}^{(2)}$ определяет сектор соты eNB и может принимать три значения: $N_{ID}^{(2)} \in \{0, 1, 2\}$.

SSS. Опорный сигнал SSS представляет собой ортогональную последовательность длиной 62, которая передается в предпоследнем символе слотов 0 и 10 и располагается в тех же поднесущих, что и PSS. Последовательность SSS получается объединением двух последовательностей максимальной длины 31 с последующим скремблированием третьей ортогональной последовательностью, которая формируется на основе идентификатора соты в пределах группы $N_{ID}^{(2)}$. Существует 168 различных последовательностей SSS, которые соответствуют целочисленному значению идентификатора группы $N_{ID}^{(1)}$; $N_{ID}^{(1)}$ определяет группу сот и может принимать 168 значений: $N_{ID}^{(2)} \in \{0, \dots, 167\}$. После оценки $N_{ID}^{(1)}$ и $N_{ID}^{(2)}$ можно определить уникальный идентификатор соты Cell ID N_{ID}^{Cell} базовой станции eNB:

$$N_{ID}^{Cell} = 3N_{ID}^{(1)} + N_{ID}^{(2)}. \quad (1)$$

CRS. Сигнал CRS служит для оценки характеристики канала и передается в ресурсных элементах, которые распределены в пределах всего частотно-временного домена кадра. Последовательность опорного сигнала CRS формируется на основе идентификатора соты

N_{ID}^{Cell} , номера выделенного OFDM-символа, слота и антенного порта таким образом, что последовательности опорных сигналов CRS разных базовых станций eNB ортогональны друг другу. Идентификатор соты N_{ID}^{Cell} определяет выделенные поднесущие для опорного сигнала CRS данной базовой станции. Обозначим через $S_i(k)$ сигнал CRS, передаваемый на k -й поднесущей в i -м OFDM-символе, где $k = m\Delta_{CRS} + \kappa$, $m = 0, \dots, M-1$, $M = \lfloor N_r / \Delta_{CRS} \rfloor$, $\Delta_{CRS} = 6$ и κ – это постоянный сдвиг, определяемый идентификатором соты N_{ID}^{Cell} и номером символа i ; далее в тех случаях, когда результат не зависит от индекса i , номер символа i будем опускать.

PRS. Сигнал PRS был предложен в 9-м релизе LTE, служит для сбора первичных измерений при позиционировании разностно-дальномерным методом (РДМ) OTDOA и передается в ресурсных элементах, которые распределены в пределах всего частотно-временного домена кадра. Централизованное распределение ортогональных в частотно-временном домене ресурсных элементов RE сигналам PRS, передаваемых одновременно соседними базовыми станциями eNB, обеспечивает отсутствие внутрисистемных помех при сборе первичных ДМ-измерений пользовательским устройством UE. Точность позиционирования по сигналам PRS составляет порядка 50 м [67].

Все перечисленные выше последовательности опорных сигналов, за исключением PRS, транслируются базовыми станциями eNB в каждом кадре в режиме широковещания независимо от наличия в зоне обслуживания eNB пользовательских устройств UE, являющихся абонентами сети LTE данного оператора. Поэтому широковещательные опорные сигналы CP, PSS, SSS и CRS сетей LTE разных операторов можно использовать для целей позиционирования «на лету» пользовательскими устройствами UE, не являющимися абонентами сети LTE какого-либо отдельного оператора. Несмотря на применимость в задачах сетевого позиционирования всех перечисленных сигналов, наиболее подходящими для сбора первичных ДМ-измерений являются опорные сигналы SSS и CRS. Сформулируем основные проблемы использования опорных сигналов CP, PSS и PRS в задачах сетевого позиционирования «на лету».

Проблема использования CP для оценки времени прихода сигнала TOA заключается в большой ошибке ДМ-измерений в условиях многолучевого PPB; также циклические префиксы CP различных eNB неортогональны, что препятствует одновременному сбору первичных ДМ-измерений от нескольких базовых станций.

Проблема использования PSS для задач позиционирования заключается в том, что число первичных ДМ-измерений при работе устройства UE в одном диапазоне частот ограничено тремя допустимыми последовательностями опорных сигналов первичной синхронизации PSS.

Проблема использования PRS заключается в следующем. Во-первых, при выделении в кадре LTE специальных сигналов позиционирования нарушается конфиденциальность пользователя, так как при использовании UE сигналов PRS оценка его местоположения становится известна оператору [68]. Во-вторых, ОМП по сигналам PRS доступно исключительно абонентам сети LTE данного оператора. В-третьих, при сетевом позиционировании по сигналам PRS другие доступные опорные сигналы других операторов оказываются недоиспользованными. В-четвертых, выделение ресурсных элементов в частотно-временном домене под передачу специальных опорных сигналов позиционирования PRS приводит к уменьшению полезной нагрузки кадра, которая могла бы использоваться для передачи полезных данных трафика. Для исключения перечисленных недостатков большой интерес в задачах сетевого позиционирования представляют подходы, основанные на использовании сигналов CRS. Далее рассматриваются модели приема сигналов SSS и CRS для сбора первичных ДМ-измерений.

4.3. Модели опорных сигналов LTE для сбора первичных измерений

4.3.1. Модель приема опорных сигналов SSS для сбора первичных измерений

Обозначим через $S_{SSS}(f)$ последовательность переданного опорного вторичного сигнала синхронизации SSS в частотном домене. Допустим, опорный сигнал SSS передается один раз (в 0-м или 10-м слоте) за время передачи кадра. Тогда, взяв обратное преобразование Фурье IFT (Inverse Fourier Transform) от $S_{SSS}(f)$, получим последовательность переданного опорного сигнала SSS $s_{SSS}(t)$ во временном домене:

$$s_{SSS}(t) = \begin{cases} \text{IFT}\{S_{SSS}(f)\}, & t \in (0, T_{\text{symb}}) \\ 0, & t \in (T_{\text{symb}}, T_f) \end{cases}, \quad (2)$$

где $T_{\text{symb}} = 1/\Delta f$ – длительность одного OFDM-символа, а $T_f = 10$ мс – длительность кадра.

Принятый опорный сигнал SSS обрабатывается блоками, каждый из которых занимает длительность кадра. Допустим, опорный сигнал SSS передается в модели радиоканала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ, AWGN – Additive White Gaussian Noise), тогда принятый опорный сигнал SSS во временном домене можно представить выражением [22]:

$$r_{SSS}(t) = \sqrt{C} e^{j(2\pi f_D t + \phi)} \cdot \left[s_{\text{code}}(t - t_{\text{TOA}_k} - kT_f) + d(t - t_{\text{TOA}_k} - kT_f) \right] + n(t), \quad (3)$$

при $kT_f \leq t \leq (k+1)T_f$, $k = 0, 1, 2, \dots$,

где k – номер кадра; C – мощность принятого сигнала, включая коэффициенты усиления (КУ) антенн и потери в антенно-фидерном тракте (АФТ); t_{TOA} – время прихода опорного сигнала SSS; ϕ – фаза несущей опорного сигнала SSS; f_D – сдвиг несущей частоты вследствие эффекта Доплера, рассинхронизации опорных генераторов передатчика и приемника по частоте и фазе; $n(t)$ – выборка АБГШ с постоянной спектральной плотностью мощности (СПМ) $N_0/2$ Вт/Гц; $d(t)$ – данные, передаваемые eNB в канале вниз, отличные от опорного сигнала SSS; при этом с точки зрения первичных ДМ-измерений времени прихода сигнала TOA на интервале длительности OFDM-символа T_{symb} для данных, отличных от опорного сигнала SSS, справедливо:

$$d(t) = 0 \text{ при } t \notin (t_{\text{TOA}}, t_{\text{TOA}} + T_{\text{symb}}). \quad (4)$$

Последовательность опорного сигнала SSS определяется выражением:

$$s_{\text{code}}(t) = \sqrt{\frac{T_f}{W_{SSS}}} s_{SSS}(t), \quad (5)$$

где $W_{SSS} = 945$ кГц – ширина полосы опорного сигнала SSS [22].

4.3.2. Модель приема опорных сигналов CRS для сбора первичных измерений

Обозначим через $Y_i(k)$ сигнал, переданный на k -й поднесущей в i -м OFDM-символе, тогда условие наличия опорного сигнала CRS в $Y_i(k)$ можно представить выражением:

$$Y_i(k) = \begin{cases} S_i(k), & k \in N_{CRS} \\ D_i(k), & \text{при остальных } k \end{cases}, \quad (6)$$

где N_{CRS} обозначает набор поднесущих, содержащих опорные сигналы CRS, а $D_i(k)$ обозначает другие, отличные от опорных сигналов CRS, передаваемые данные.

Допустим, опорный сигнал CRS передается в модели многолучевого радиоканала с замираниями, который на интервале передачи одного OFDM-символа характеризуется импульсной характеристикой канала CIR (Channel Impulse Response):

$$h_i(\tau) = \sum_{l=0}^{L-1} \alpha_{i,l} \delta(\tau - \tau_{i,l}), \quad (7)$$

где i – номер OFDM-символа; L – число многолучевых компонент (МЛК); $\alpha_{i,l}$ и $\tau_{i,l}$ – ослабление и задержка l -й МЛК относительно первой МЛК; $\delta(\cdot)$ – дельта-функция Дирака. Будем считать, что первая МЛК с индексом $l = 0$ является компонентой LOS и характеризуется параметрами $\alpha_{i,0} = 1$ и $\tau_{i,0} = 0$. Тогда принятый опорный сигнал CRS после исключения циклического префикса и взятия БПФ в условиях идеальной синхронизации можно представить в частотном домене следующим выражением [22]:

$$R_i(k) = \sqrt{C} Y_i(k) H_i(k) + W_i(k), \quad k = 0, \dots, N_c - 1, \quad (8)$$

где $W_i(k) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$; выражение $\mathcal{CN}(a, b)$ обозначает комплексное нормальное распределение с математическим ожиданием a и дисперсией b . Частотная характеристика канала CFR (Channel Frequency Response) $H_i(k)$, полученная на основе опорных сигналов CRS, в частотном домене определяется следующим выражением [22]:

$$H_i(k) = \sum_{l=0}^{L-1} \alpha_{i,l} e^{-j2\pi\tau_{i,l}k/T_{\text{symp}}}. \quad (9)$$

Как правило, существует несоответствие между оценкой начала времени приема символов и фактическим началом символа, что может быть связано с неидеальной синхронизацией по времени и частоте вследствие временных и частотных рассогласований в приемопередающем тракте, а также доплеровским сдвигом несущей частоты вследствие движения UE. Допустим, рассогласование по времени не превышает длительности циклического префикса, тогда модель принятого сигнала CRS в i -м OFDM-символе можно представить выражением [69–71]:

$$R_i(k) = e^{j\pi e_f} e^{j2\pi(iN_t + L_{CP})e_f/N_c} e^{j2\pi e_\tau k/N_c} \sqrt{C} Y_i(k) H_i(k) + W_i(k), \quad k = 0, \dots, N_c - 1, \quad (10)$$

где $N_t = N_c + L_{CP}$, $e_f = f_D / \Delta f$ и $e_\tau = (\hat{t}_{TOA} - t_{TOA}) / T_s$ – ошибка символьной синхронизации, нормированная периодом дискретизации $T_s = T_{\text{symp}} / N_c$. Первые две экспоненты в представленном выше выражении $e^{j\pi e_f} e^{j2\pi(iN_t + L_{CP})e_f/N_c}$ моделируют эффект частотной рассинхронизации, а третья экспонента $e^{j2\pi e_\tau k/N_c}$ моделирует эффект символьной/временной рассинхронизации. Строго говоря, для каждой поднесущей OFDM-сигнала значение доплеровского сдвига отличается вследствие различных номиналов поднесущих частот, однако для простоты

будем считать, что доплеровский сдвиг определяется относительно номинала центральной несущей радиочастоты f_c .

5. Заключение

В настоящей работе выполнен анализ состояния проблемы использования SDR-технологии для задач сетевого позиционирования, проанализированы проблемы приема опорных сигналов стандарта LTE устройством SDR, а также формализованы модели опорных сигналов стандарта LTE с целью последующего анализа соответствующих процедур, их программной реализации и экспериментальной апробации на SDR-макете. Далее планируется рассмотреть структуру устройства приема и обработки опорных OFDM-сигналов SOP стандарта LTE для сбора первичных измерений ТОА, специфика процедур выполнения которых заключается в необходимости извлечения первичных разностно-дальномерных измерений для последующего их использования в задачах сетевого позиционирования.

Литература

1. Фокин Г. А. Технологии сетевого позиционирования. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2020. 558 с.
2. Фокин Г. А. Технологии сетевого позиционирования 5G. М.: Горячая Линия – Телеком, 2021. 456 с.
3. Фокин Г. А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.12.13. Санкт-Петербург. 2021. 499 с.
4. Zekavat R., Buehrer R. M. Handbook of position location: Theory, practice and advances. John Wiley & Sons, 2019. 1376 p.
5. Campos R. S., Lovisolo L. RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Artech House, 2015. 369 p.
6. Sand S., Dammann A., Mensing C. Positioning in Wireless Communications Systems. Wiley, 2014. 276 p.
7. del Peral-Rosado J. A. Evaluation of the LTE positioning capabilities in realistic navigation channels. Universitat Autònoma de Barcelona, 2014.
8. del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Preliminary analysis of the positioning capabilities of the positioning reference signal of 3GPP LTE // Proc. European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, 2011.
9. del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Achievable localization accuracy of the positioning reference signal of 3GPP LTE // Proc. International Conference on Localization and GNSS, 2012. P. 1–6.
10. del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Analysis of positioning capabilities of 3GPP LTE // Proc. 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012), 2012. P. 650–659.
11. del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Evaluation of the LTE positioning capabilities under typical multipath channels // Proc. 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), 2012. P. 139–146.
12. del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Joint channel and time delay estimation for LTE positioning reference signals // Proc. 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, 2012. P. 1–8.

13. *del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M.* Joint maximum likelihood time-delay estimation for LTE positioning in multipath channels // EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. 2014. № 1. P. 1–13.
14. *del Peral-Rosado J. A. et al.* Software-defined radio LTE positioning receiver towards future hybrid localization systems // Proc. 31st AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 2013. P. 14–17.
15. *del Peral-Rosado J.A. et al.* Comparative results analysis on positioning with real LTE signals and low-cost hardware platforms // Proc. 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (Navitec), 2014. P. 1–8.
16. *del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Seco-Granados G., Crosta P., Zanier F., Crisci M.* Downlink synchronization of LTE base stations for opportunistic ToA positioning // Proc. International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), 2015. P. 1–6.
17. *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 // Proc. 8th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (Navitec), 2016. P. 1–7.
18. *Müller P., del Peral-Rosado J. A., Piché R., Seco-Granados G.* Statistical Trilateration with Skew-t Distributed Errors in LTE Networks // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2016. V. 15, № 10. P. 7114–7127.
19. *del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Zanier F., Seco-Granados G.* Position Accuracy of Joint Time-Delay and Channel Estimators in LTE Networks // IEEE Access. 2018. V. 6. P. 25185–25199.
20. *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. V. 68, № 5. P. 4316–4327.
21. *del Peral-Rosado J. A., López-Salcedo J. A., Kim S., Seco-Granados G.* Feasibility study of 5G-based localization for assisted driving // Proc. International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS), 2016. P. 1–6.
22. *Shamaei K.* Exploiting Cellular Signals for Navigation: 4G to 5G. University of California, Irvine, 2020.
23. *Kassas Z. M., Shamaei K., Khalife J.* SDR for navigation with LTE signals. Patent US11187774B2. United States. University of California. Publication 30.11.2021.
24. *Shamaei K., Khalife J., Kassas Z.* Performance characterization of positioning in LTE systems // Proc. 29th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS+), 2016. P. 2262–2270.
25. *Shamaei K., Khalife J., Kassas Z. M.* Comparative results for positioning with secondary synchronization signal versus cell specific reference signal in LTE systems // Proc. International Technical Meeting of the Institute of Navigation, 2017. P. 1256–1268.
26. *Shamaei K., Khalife J., Kassas Z. M.* Ranging precision analysis of LTE signals // Proc. 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2017. P. 2719–2723.
27. *Shamaei K., Khalife J., Souradeep B., Kassas Z. M.* Computationally efficient receiver design for mitigating multipath for positioning with LTE signals // Proc. 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+), 2017. P. 3751–3760.
28. *Shamaei K., Khalife J., Kassas Z. M.* Pseudorange and multipath analysis of positioning with LTE secondary synchronization signals // Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2018. P. 1–6.
29. *Shamaei K., Kassas Z.* LTE receiver design and multipath analysis for navigation in urban environments // NAVIGATION Journal of the Institute of Navigation. 2018. V. 65, № 4. P. 655–675.
30. *Shamaei K., Khalife J., Kassas Z. M.* Exploiting LTE Signals for Navigation: Theory to Implementation // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2018. V. 17, № 4. P. 2173–2189.

31. *Abdallah A. A., Shamaei K., Kassas Z. M.* Performance characterization of an indoor localization system with LTE code and carrier phase measurements and an IMU // Proc. International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2019. P. 1–8.
32. *Shamaei K., Morales J. J., Kassas Z. M.* A framework for navigation with LTE time-correlated pseudorange errors in multipath environments // Proc. IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring), 2019. P. 1–6.
33. *Kassas Z. M., Maaref M., Morales J. J., Khalife J. J., Shamei K.* Robust Vehicular Localization and Map Matching in Urban Environments Through IMU, GNSS, and Cellular Signals // IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine. 2020. V. 12, № 3. P. 36–52.
34. *Abdallah A. A., Shamaei K., Kassas Z. M.* Assessing real 5G signals for opportunistic navigation // Proc. 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+), 2020. P. 2548–2559.
35. *Shamaei K., Kassas Z. M.* Receiver Design and Time of Arrival Estimation for Opportunistic Localization With 5G Signals // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2021. V. 20, № 7. P. 4716–4731.
36. *Shamaei K., Kassas Z. M.* A joint TOA and DOA acquisition and tracking approach for positioning with LTE signals // IEEE Transactions on Signal Processing. 2021. V. 69. P. 2689–2705.
37. *Knutti F., Sabathy M., Driusso M., Mathis H., Marshall C.* Positioning using LTE signals // Proc. of Navigation Conference in Europe, 2015. P. 1–8.
38. *Driusso M., Babich F., Knutti F., Sabathy M., Marshall C.* Estimation and tracking of LTE signals time of arrival in a mobile multipath environment // Proc. 9th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA), 2015. P. 276–281.
39. *Driusso M., Marshall C., Sabathy M., Knutti F., Mathis H., Babich F.* Vehicular Position Tracking Using LTE Signals // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. V. 66, № 4. P. 3376–3391.
40. *Xu W., Huang M., Zhu C., Dammann A.* Maximum likelihood TOA and OTDOA estimation with first arriving path detection for 3GPP LTE system // Transactions on Emerging Telecommunications Technologies. 2016. V. 27, № 3. P. 339–356.
41. *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. Т. 16, № 5. С. 28–47.
42. *Фокин Г. А., Лаврухин В. А., Волгушев Д. А., Куреев А. В.* Модельно-ориентированное проектирование на основе SDR // Системы управления и информационные технологии. 2015. № 2 (60). С. 94–99.
43. *Фокин Г. А.* Технологии программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая Линия – Телеком, 2019. 316 с.
44. *Фокин Г. А.* Методика идентификации прямой видимости в радиолиниях сетей мобильной связи 4-го поколения с пространственной обработкой сигналов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 3. С. 78–82.
45. *Фокин Г. А.* Имитационное моделирование процесса распространения радиоволн в радиолиниях сетей мобильной связи 4-го поколения с пространственной обработкой сигналов // Труды Научно-исследовательского института радио. 2013. № 3. С. 83–89.
46. *Фокин Г. А.* Комплексная имитационная модель для позиционирования источников радиоизлучения в условиях отсутствия прямой видимости // Труды учебных заведений связи. 2018. Т. 4, № 1. С. 85–101.
47. *Фокин Г. А.* Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 2. С. 3–9.
48. *Фокин Г. А.* Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 3. С. 13–21.
49. *Фокин Г. А., Кучерявый А. Е.* Сетевое позиционирование в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 9. С. 51–58.
50. *Фокин Г. А.* Использование методов сетевого позиционирования в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 11. С. 29–37.

51. OpenCellid. [Электронный ресурс]. URL: <https://opencellid.org/> (дата обращения: 29.09.2022).
52. Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sut.ru/> (дата обращения: 29.09.2022).
53. 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.
54. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022617912, 26.04.2022. Программный модуль комплекса функций представления и преобразования форматов оценок координат при позиционировании в сетях мобильного широкополосного беспроводного доступа (МШБД) / В. О. Аксенов, Г. А. Фокин. Правообладатель ООО «Лаборатория инфокоммуникационных сетей». Заявка № 2022616360 от 11.04.2022.
55. 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.
56. Дворников С. В., Фокин Г. А., Аль-Одхари А. Х., Федоренко И. В. Исследование зависимости геометрического фактора топологии для разностно-дальномерного метода позиционирования // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2017. № 2. С. 86–93.
57. Дворников С. В., Фокин Г. А., Аль-Одхари А. Х., Федоренко И. В. Исследование зависимости значения геометрического фактора снижения точности от топологии пунктов приема // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. № 2. С. 99–104.
58. Гельгор А. Л., Павленко И. И., Горлов А. И., Фокин Г. А., Попов Е. А., Лаврухин В. А., Сиверс М. А. Первичная синхронизация с базовыми станциями LTE // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19, № 7. С. 54–62.
59. 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.
60. Борисов Е. Г., Машков Г. М., Фокин Г. А. Экспериментальный стенд оценки точности позиционирования на основе программно-конфигурируемого радио // Сборник научных статей V международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», 2016. С. 120–125.
61. 3GPP TS 36.211 V16.7.0 (2021-12). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 17).
62. 3GPP TS 36.212 V17.1.0 (2022-03). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (Release 17).
63. Drozdova V. G., Kalachikov A. A. SDR Based Evaluation of the Initial Cell Search In 5G NR OpenAirInterface Implementation // Proc. XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), 2021. P. 248–251.
64. Петров В. П., Якушев И. Ю. Современные технологии в системе MIMO // Вестник СибГУТИ. 2019. № 2. С. 94–108.
65. Калачиков А. А., Безгодкин Р. О., Петров И. А., Винников А. А. Исследование модели канала связи MIMO на основе открытого пакета моделирования // Вестник СибГУТИ. 2021. № 4 (56). С. 43–55.
66. van de Beek J. J., Sandell M., Borjesson P. O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems // IEEE Transactions on Signal Processing. 1997. V. 45, № 7. P. 1800–1805.
67. Fischer S. Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE. Qualcomm White Pap. July. 2014. P. 1–62.
68. Hofer M., McEachen J., Tummala M. Vulnerability Analysis of LTE Location Services // Proc. 47th Hawaii International Conference on System Sciences. 2014. P. 5162–5166.
69. Speth M., Fechtel S. A., Fock G., Meyr H. Optimum receiver design for wireless broad-band systems using OFDM. I // IEEE Transactions on Communications. 1999. V. 47, № 11. P. 1668–1677.

70. *Speth M., Fechtel S. A., Fock G., Meyr H.* Optimum receiver design for OFDM-based broadband transmission. II. A case study // *IEEE Transactions on Communications*. 2001. V. 49, № 4. P. 571–578.
71. *Yang B., Letaief K. B., Cheng R. S., Cao Z.* Timing recovery for OFDM transmission // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2000. V. 18, № 11. P. 2278–2291.

*Статья поступила в редакцию 20.07.2022;
переработанный вариант – 15.08.2022.*

Фокин Григорий Алексеевич

д.т.н., доцент, профессор кафедры радиосвязи и вещания СПбГУТ (193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1, а. 407/2), e-mail: grihafokin@gmail.com.

Волгушев Дмитрий Борисович

научный сотрудник СПбГУТ (193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1, а. 407/2), e-mail: d.volgushev@yandex.ru.

Development of SDR-based network positioning technology. LTE reference signals reception and processing models

Grigoriy A. Fokin

Doctor of technical sciences, docent, professor, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT, Saint Petersburg, Russia), grihafokin@gmail.com.

Dmitry B. Volgushev

Research assistant, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT, Saint Petersburg, Russia), d.volgushev@yandex.ru.

The analysis of the problem status of positioning user UE devices using the infrastructure of the eNB base stations of LTE mobile radio networks according to open foreign sources shows the high actuality and relevance of this research area. This paper provides an analysis of the problem status, as well as, formalization of models for receiving and processing LTE reference signals for the layout of a user device built using software-configurable radio technology.

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

References

1. Fokin G.A. *Tekhnologii setevogo pozitsionirovaniya* [Network positioning technologies]. St. Petersburg, SPbGUT, 2020, 558 p.
2. Fokin G.A. *Tekhnologii setevogo pozitsionirovaniya 5G* [5G network positioning technologies]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom, 2021, 456 p.
3. Fokin G.A. *Kompleks modeley i metodov pozitsionirovaniya ustroystv v setyakh pyatogo pokoleniya. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk* [A set of models and methods for positioning devices in fifth-generation networks]. Doctor's degree dissertation 05.12.13, St. Petersburg, 2021, 499 p.
4. Zekavat R., Buehrer R. M. *Handbook of position location: Theory, practice and advances*. John Wiley & Sons, 2019, 1376 p.

5. Campos R. S., Lovisolo L. *RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools*. Artech House, 2015, 369 p.
6. Sand S., Dammann A., Mensing C. *Positioning in Wireless Communications Systems*. Wiley, 2014, 276 p.
7. del Peral-Rosado J.A. *Evaluation of the LTE positioning capabilities in realistic navigation channels*. Universitat Autònoma de Barcelona, 2014.
8. del Peral-Rosado J.A., López-Salcedo J.A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Preliminary analysis of the positioning capabilities of the positioning reference signal of 3GPP LTE. *Proceedings of European Workshop on GNSS signals and Signal Processing*, 2011.
9. del Peral-Rosado J.A., López-Salcedo J.A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Achievable localization accuracy of the positioning reference signal of 3GPP LTE. *2012 International Conference on Localization and GNSS*, 2012, pp. 1-6.
10. del Peral-Rosado J.A., López-Salcedo J.A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Analysis of positioning capabilities of 3GPP LTE. *Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2012)*, 2012, pp. 650-659.
11. del Peral-Rosado J.A., López-Salcedo J.A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Evaluation of the LTE positioning capabilities under typical multipath channels. *2012 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC)*, 2012, p. 139-146.
12. del Peral-Rosado J.A., López-Salcedo J.A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Joint channel and time delay estimation for LTE positioning reference signals. *2012 6th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies (Navitec 2012) & European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing*, 2012, pp. 1-8.
13. del Peral-Rosado J.A., López-Salcedo J.A., Seco-Granados G., Zanier F., Crisci M. Joint maximum likelihood time-delay estimation for LTE positioning in multipath channels. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014, № 1, pp. 1-13.
14. 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, pp. 14-17.
15. del Peral-Rosado J.A. et al. Comparative results analysis on positioning with real LTE signals and low-cost hardware platforms. *2014 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (Navitec)*, 2014, pp. 1-8.
16. del Peral-Rosado J.A., López-Salcedo J.A., Seco-Granados G., Crosta P., Zanier F., Crisci M. Downlink synchronization of LTE base stations for opportunistic ToA positioning. *2015 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, 2015, pp. 1-6.
17. Bartolucci M., Del Peral-Rosado J.A., Estuuet-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, pp. 1-7.
18. Müller P., del Peral-Rosado J.A., Piché R., Seco-Granados G. Statistical Trilateration with Skew-t Distributed Errors in LTE Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, vol. 15, no. 10, pp. 7114-7127.
19. del Peral-Rosado J.A., López-Salcedo J.A., Zanier F., Seco-Granados G. Position Accuracy of Joint Time-Delay and Channel Estimators in LTE Networks. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 25185-25199.
20. 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, no. 5, pp. 4316-4327.
21. del Peral-Rosado J.A., López-Salcedo J.A., Kim S., Seco-Granados G. Feasibility study of 5G-based localization for assisted driving. *2016 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, 2016, pp. 1-6.
22. Shamaei K. *Exploiting Cellular Signals for Navigation: 4G to 5G*. University of California, Irvine, 2020.
23. Kassas Z.M., Shamaei K., Khalife J. SDR for navigation with LTE signals. Patent US11187774B2. United States. University of California. Publication 30.11.2021.
24. Shamaei K., Khalife J., Kassas Z. Performance characterization of positioning in LTE systems. *Proceedings of the 29th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS+ 2016)*, 2016, pp. 2262-2270.
25. Shamaei K., Khalife J., Kassas Z.M. Comparative results for positioning with secondary synchronization signal versus cell specific reference signal in LTE systems. *Proceedings of the 2017 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2017, pp. 1256-1268.

26. Shamaei K., Khalife J., Kassas Z.M. Ranging precision analysis of LTE signals. *2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2017, pp. 2719-2723.
27. Shamaei K., Khalife J., Souradeep B., Kassas Z.M. Computationally efficient receiver design for mitigating multipath for positioning with LTE signals. *Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017)*, 2017, pp. 3751-3760.
28. 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, pp. 1-6.
29. Shamaei K., Kassas Z. LTE receiver design and multipath analysis for navigation in urban environments. *NAVIGATION Journal of the Institute of Navigation*, 2018, vol. 65, no. 4, pp. 655-675.
30. Shamaei K., Khalife J., Kassas Z.M. Exploiting LTE Signals for Navigation: Theory to Implementation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, vol. 17, no. 4, pp. 2173-2189.
31. Abdallah A.A., Shamaei K., Kassas Z.M. Performance characterization of an indoor localization system with LTE code and carrier phase measurements and an IMU. *2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 2019, pp. 1-8.
32. Shamaei K., Morales J.J., Kassas Z.M. A framework for navigation with LTE time-correlated pseudorange errors in multipath environments. *2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*, 2019, pp. 1-6.
33. Kassas Z.M., Maaref M., Morales J.J., Khalife J.J., Shamei K. Robust Vehicular Localization and Map Matching in Urban Environments Through IMU, GNSS, and Cellular Signals. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2020, vol. 12, no. 3, pp. 36-52.
34. Abdallah A.A., Shamaei K., Kassas Z.M. Assessing real 5G signals for opportunistic navigation. *In Proceedings of the 33rd International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2020)*, 2020, pp. 2548-2559.
35. Shamaei K., Kassas Z.M. Receiver Design and Time of Arrival Estimation for Opportunistic Localization With 5G Signals. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, vol. 20, no 7, pp. 4716-4731.
36. Shamaei K., Kassas Z.M. A joint TOA and DOA acquisition and tracking approach for positioning with LTE signals. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2021, vol. 69, pp. 2689-2705.
37. Knutti F., Sabathy M., Driusso M., Mathis H., Marshall C. Positioning using LTE signals. *Proceedings of Navigation Conference in Europe*, 2015, pp. 1-8.
38. Driusso M., Babich F., Knutti F., Sabathy M., Marshall C. Estimation and tracking of LTE signals time of arrival in a mobile multipath environment. *2015 9th International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA)*, 2015, pp. 276-281.
39. Driusso M., Marshall C., Sabathy M., Knutti F., Mathis H., Babich F. Vehicular Position Tracking Using LTE Signals. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, vol. 66, no 4, pp. 3376-3391.
40. Xu W., Huang M., Zhu C., Dammann A. Maximum likelihood TOA and OTDOA estimation with first arriving path detection for 3GPP LTE system. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 2016, vol. 27, no 3, pp. 339-356.
41. Fokin G.A., Volgushev D.B., Kharin V.N. Ispol'zovaniye SDR tekhnologii dlya zadach setevo-go pozitsionirovaniya. Formirovaniye opornykh signalov LTE [Using SDR technology for network positioning tasks. Formation of LTE reference signals]. *T-Comm: Telecommunications and transport*, 2022. vol. 16, no. 5, pp. 28-47.
42. Fokin G.A., Lavrukhin V.A., Volgushev D.A., Kireev A.V. Model'no-oriyentirovannoye pro-yektirovaniye na osnove SDR [Model-Based Design Based on SDR]. *Control Systems and Information Technologies*, 2015, no. 2 (60), pp. 94-99.
43. Fokin G.A. *Tekhnologii programmno-konfiguriruyemogo radio* [Software Defined Radio Technologies]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom, 2019, 316 p.
44. Fokin G.A. Metodika identifikatsii pryamoy vidimosti v radioliniyakh setey mobil'-noy svyazi 4-go pokoleniya s prostranstvennoy obrabotkoy signalov [Line-of-sight identification technique in radio links of 4th generation mobile communication networks with spatial signal processing]. *Proceedings of the Scientific Research Institute of Radio*, 2013, no. 3, pp. 78-82.
45. Fokin G.A. Imitatsionnoye modelirovaniye protsessa rasprostraneniya radiovoln v ra-dioliniyakh setey mobil'-noy svyazi 4-go pokoleniya s prostranstvennoy obrabotkoy signalov [Simulation modeling of the process of propagation of radio waves in radio links of 4th generation mobile communication networks with spatial processing of signals]. *Proceedings of the Scientific Research Institute of Radio*, 2013, no. 3, pp. 83-89.

46. Fokin G.A. Kompleksnaya imitatsionnaya model' dlya pozitsionirovaniya istochnikov ra-dioizlucheniya v usloviyakh otsutstviya pryamoy vidimosti [Complex simulation model for positioning radio sources in the absence of line of sight]. *Proceedings of educational institutions of communication*, 2018, vol. 4, no. 1, pp. 85-101.
47. Fokin G.A. Stsenarii pozitsionirovaniya v setyakh 5G [Positioning scenarios in 5G networks]. *Vestnik svyazi*, 2020, no. 2, pp. 3-9.
48. Fokin G.A. Stsenarii pozitsionirovaniya v setyakh 5G [Positioning scenarios in 5G networks]. *Vestnik svyazi*, 2020, no. 3, pp. 13-21.
49. Fokin G.A., Kucheryavy A.E. Setevoye pozitsionirovaniye v ekosisteme 5G [Network positioning in the 5G ecosystem]. *Electrosvyaz*, 2020, no. 9, pp. 51-58.
50. Fokin G.A. Ispol'zovaniye metodov setevogo pozitsionirovaniya v ekosisteme 5G [Using network positioning methods in the 5G ecosystem], *Elektrosvyaz*, 2020, no. 11, pp. 29-37.
51. OpenCellid, available at: <https://opencellid.org/> (accessed 29.09.2022).
52. The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications, available at: <https://www.sut.ru/> (accessed 29.09.2022).
53. Sivers M.A., Fokin G.A., Dukhovnitsky O.G. Pozitsionirovaniye abonentskikh stantsiy v setyakh mobil'noy svyazi LTE raznostno-dal'nomernym metodom [Positioning of subscriber stations in LTE mobile communication networks by difference-range method]. *Control systems and information technologies*, 2015, vol. 59, no. 1, pp. 55-61.
54. Aksenov V.O., Fokin G.A. *Programmnyy modul' kompleksa funktsiy predstavleniya i preobrazovaniya formatov otsenok koordinat pri pozitsionirovanii v setyakh mobil'nogo shirokopolosnogo bes-provodnogo dostupa (MSHBD)* [Software module for a set of functions for representing and converting formats of coordinate estimates for positioning in mobile broadband wireless access networks (MBBA)]. Certificate of state registration of the computer program No. 2022617912, 04/26/2022. Copyright holder LLC "Laboratory of infocommunication networks". Application No. 2022616360 dated 04/11/2022.
55. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Al-Odkhari A.Kh., Fedorenko I.V. Otsenka vliyaniya svoystv signala PRS LTE na tochnost' pozitsionirovaniya [Evaluation of the influence of the properties of the PRS LTE signal on positioning accuracy]. *Problems of radio electronics. Series: TV Technique*, 2017, no. 4, pp. 94-103.
56. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Al-Odkhari A.Kh., Fedorenko I.V. Issledovaniye zavisimo-sti geometricheskogo faktora topologii dlya raznostno-dal'nomernogo metoda pozitsionirovaniya [Investigation of the dependence of the geometric factor of topology for the difference-range method of positioning]. *Problems of radio electronics. Series: TV Technique*, 2017, no. 2, pp. 86-93.
57. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Al-Odkhari A.Kh., Fedorenko I.V. Issledovaniye zavisimosti znacheniya geometricheskogo faktora snizheniya tochnosti ot topologii punktov priyema [Investigation of the dependence of the value of the geometric factor of accuracy reduction on the topology of reception points]. *Problems of radio electronics. Series: TV Technique*, 2018, no. 2, pp. 99-104.
58. Gelgor A.L., Pavlenko I.I., Gorlov A.I., Fokin G.A., Popov E.A., Lavrukhin V.A., Sivers M.A. Pervichnaya sinkhronizatsiya s bazovymi stantsiyami LTE [Primary synchronization with LTE base stations]. *Electromagnetic waves and electronic systems*, 2014, vol. 19, no. 7, pp. 54-62.
59. Gelgor A.L., Pavlenko I.I., Fokin G.A., Gorlov A.I., Popov E.A., Lavrukhin V.A., Sivers M.A. Pelengatsiya bazovykh stantsiy v setyakh LTE [Direction finding of base stations in LTE networks]. *Electrosvyaz*, 2014, no. 9, pp. 34-39.
60. Borisov E.G., Mashkov G.M., Fokin G.A. Eksperimental'nyy stend otsenki tochnosti po-zitsionirovaniya na osnove programmno-konfiguriruyemogo radio [Experimental stand for assessing positioning accuracy based on software-defined radio]. *Actual problems of infotelecommunications in science and education. collection of scientific articles of the V international scientific-technical and scientific-methodical conference*, 2016, pp. 120-125.
61. 3GPP TS 36.211 V16.7.0 (2021-12). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 17).
62. 3GPP TS 36.212 V17.1.0 (2022-03). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (Release 17).
63. Drozdova V. G., Kalachikov A. A. SDR Based Evaluation of the Initial Cell Search In 5G NR OpenAir-Interface Implementation. *2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE)*, 2021, pp. 248-251.
64. Petrov V.P., Yakushev I.Yu. Sovremennyye tekhnologii v sisteme MIMO [Modern technologies in the MIMO system]. *Vestnik SibGUTI*, 2019, no. 2, pp. 94-108.

65. Kalachikov A.A., Bezgodkin R.O., Petrov I.A., Vinnikov A.A. Issledovaniye modeli kanala svyazi MIMO na osnove otkrytogo paketa modelirovaniya [Investigation of the MIMO channel model based on an open modeling package]. *Vestnik SibGUTI*, 2021, no. 4 (56), pp. 43-55.
66. van de Beek J.J., Sandell M., Borjesson P.O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1997, vol. 45, no. 7, pp. 1800-1805.
67. Fischer S. Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE. Qualcomm White Pap. July, 2014, pp.1-62.
68. Hofer M., McEachen J., Tummala M. Vulnerability Analysis of LTE Location Services. *2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences*, 2014, pp. 5162-5166.
69. Speth M., Fechtel S.A., Fock G., Meyr H. Optimum receiver design for wireless broad-band systems using OFDM. I. *IEEE Transactions on Communications*, 1999, vol. 47, no. 11, pp. 1668-1677.
70. Speth M., Fechtel S.A., Fock G., Meyr H. Optimum receiver design for OFDM-based broadband transmission. II. A case study. *IEEE Transactions on Communications*, 2001, vol. 49, no 4, pp. 571-578.
71. Yang B., Letaief K.B., Cheng R.S., Cao Z. Timing recovery for OFDM transmission. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, vol. 18, no. 11, pp. 2278-2291.