

Научная статья

УДК 621.396.969

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-48-63



Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 1. Конфигурация сигналов PRS

Григорий Алексеевич Фокин, grihafokin@gmail.com

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

Аннотация: Эволюция сетей подвижной связи (СПС) 1G–4G показала, что сетевое позиционирование традиционно рассматривалось как одна из дополнительных возможностей в процессе стандартизации, построения и эксплуатации сетей, которая была востребована тогда, когда сигналы глобальных навигационных спутниковых систем оказывались недоступны; определение местоположения устройств в СПС осуществлялось преимущественно в интересах экстренных служб и обеспечения правопорядка. Однако развитая инфраструктура СПС открывала широкие возможности для определения местоположения, поэтому в процессе эволюции, начиная с аналоговых СПС 1G, совершенствовались и методы позиционирования. Цифровые СПС 2G GSM способствовали развитию сетевого позиционирования с точностью до десятков-сотен метров по требованию регулятора. Глобализация СПС связана с образованием партнерского проекта 3GPP для стандартизации сетей 3G UMTS. С поколения 3G в процессе стандартизации СПС в спецификациях 3GPP стали предъявляться требования к сетевому определению местоположения. Данная тенденция получила продолжение в СПС 4G LTE и дальнейшее развитие в сетях 5G. Для сетей 5G в последних спецификациях 3GPP, в отличие от СПС предыдущих поколений, впервые формализованы требования к точности позиционирования до одного метра. При этом, помимо традиционных для 2G–4G случаев экстренного вызова, представлены сценарии позиционирования в сетях связи общего пользования, как для абонентов, так и для устройств: услуги на основе позиционирования LBS, позиционирование в промышленности и здравоохранении, при управлении дорожным движением, для железнодорожных и морских грузоперевозок, а также позиционирование с использованием беспилотных летательных аппаратов. Для решения амбициозной задачи позиционирования с точностью до одного метра, что примерно на порядок меньше, чем в СПС предыдущих поколений, в сетях 5G на уровне радиointерфейса используются специальные опорные сигналы позиционирования PRS (Positioning Reference Signals), впервые предложенные в СПС 4G LTE. Новый радиointерфейс 5G NR, в отличие от СПС предыдущих поколений 4G LTE, допускает использование на порядок более широких полос частот в диапазоне миллиметровых волн, что позволяет достигнуть метровой точности позиционирования. С точки зрения сбора и обработки первичных измерений точность позиционирования определяется, в первую очередь, используемыми сигналами. Обращение к встроенным функциям пакета расширения 5G Toolbox специального программного обеспечения Matlab позволяет визуализировать процедуры конфигурации сигналов PRS в частотно-временном домене радиointерфейса 5G NR. В первой части исследования, посвященного моделированию технологии сетевого позиционирования 5G NR, формализуются процедуры конфигурации сигналов PRS, используемые для сбора первичных измерений. Имитационное моделирование процедур вторичной обработки первичных измерений с результирующей оценкой координат устройств 5G NR является предметом исследования второй части. Результатом настоящей работы является обоснование проблемы достижения метровой точности позиционирования устройств в сетях пятого и последующих поколений, а также постановка задачи на вторичную обработку первичных измерений по сконфигурированным сигналам PRS.

Ключевые слова: 5G NR, PRS, Matlab, позиционирование, метровая точность

Источник финансирования: работа подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту № 22-29-00528.

Ссылка для цитирования: Фокин Г.А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 1. Конфигурация сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 48–63. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-48-63

Simulation Model of 5G NR Network Positioning Technology with Meter Accuracy. Part 1. PRS Signals Configuration

 Grigoriy Fokin, grihafokin@gmail.com

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

Abstract: *The evolution of 1G–4G mobile communication networks (MCNs) has shown that network positioning has traditionally been considered as one of the additional features in the process of standardization, construction, and operation of networks, which was in demand when the signals of global navigation satellite systems were unavailable. MCNs were used to determine location mainly in the interests of emergency services and law enforcement. However, the developed MCN infrastructure opened up wide opportunities for determining the location of devices. Therefore, in the process of evolution, starting with analog 1G MCNs, positioning methods were also improved. Digital 2G GSM MCNs contributed to the development of network positioning with an accuracy of tens or hundreds of meters at the request of the regulator. The globalization of MCNs is associated with the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) for the standardization of 3G universal mobile telecommunications systems. Since the 3G generation, in the process of MCN standardization, the 3GPP specifications began to impose requirements for network location determination. This trend was continued in 4G LTE MCNs and further developed in 5G networks. For 5G networks, in the latest 3GPP specifications, in contrast to MCNs of previous generations, the requirements for positioning accuracy up to one meter are formalized for the first time. At the same time, in addition to the traditional 2G–4G cases of emergency calls, positioning scenarios are presented in public communication networks, both for subscribers and devices: location-based service, positioning in industry and healthcare, traffic control, rail and sea transportation, as well as positioning using unmanned aerial vehicles. To solve the ambitious task of positioning with an accuracy of up to one meter, which is approximately an order of magnitude less than in previous MCN generations, 5G networks at the radio interface level use special positioning reference signals (PRS), first proposed in 4G LTE MCNs. The new 5G NR radio interface, unlike the 4G LTE MCNs of previous generations, allows the use of an order of magnitude wider frequency bands in the millimeter-wave range (mmWave), which allows achieving meter positioning accuracy. From the point of view of collecting and processing primary measurements, the positioning accuracy is determined, first of all, by the signals used. Using the built-in functions of the 5G Toolbox extension package of the special Matlab software allows visualizing the PRS signal configuration procedures in the time-frequency domain of the 5G NR radio interface. The first part of the study considers 5G NR network positioning technology modeling and formalizes the PRS signal configuration procedures used to collect primary measurements. Simulation modeling of procedures for secondary processing of primary measurements with the resulting estimate of the coordinates of 5G NR devices is the subject of research in the second part. The result of this work is the substantiation of the problem of achieving meter accuracy of device positioning in networks of the fifth and subsequent generations, as well as setting the task of the secondary processing of primary measurements using configured PRS signals.*

Keywords: 5G NR, PRS, Matlab, positioning, meter accuracy

Funding: the work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-29-00528.

For citation: Fokin G. Simulation Model of 5G NR PRS Network Positioning Technology with Meter Accuracy. Part 1. PRS Signals Configuration. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(2):48–63. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-48-63

1. Введение

В 2021 г. в зарубежном издании IEEE Communications Magazine было опубликовано достаточно большое число работ, посвященных технологиям позиционирования в сетях пятого 5G NR (аббр. от англ. New Radio) и последующих B5G (Beyond 5G) поколений [1–7]. В работе [1] показано, что переход в диапазон миллиметровых волн (MMB, mmWave) вместе с кратным увеличением ширины полосы и

технологиями формирования узконаправленных лучей открывают новые возможности достижения метровой точности при определении местоположения (ОМП) пользовательских устройств (UE, аббр. от англ. User Equipment). В работе [2] систематизирована архитектура сетевого позиционирования 5G, а также соответствующие процедуры, сигналы и измерения; результаты имитационного моделирования показывают достижение точности до не-

скольких метров в сценариях снаружи помещений и до 1 м в сценариях внутри помещений. В работе [3] предложена архитектура сервисов аналитики на основе местоположения, которая является составной частью экосистемы 5G и может использоваться как для повышения показателей функционирования сети связи, так и для предоставления услуг геолокации третьим сторонам. Широкое распространение услуг позиционирования в сетях пятого и последующих поколений актуализируют, в том числе и вопросы обеспечения их безопасности, которые рассмотрены в [4]; в работе формализованы угрозы спуфинга и фальсификации данных о местоположении пользовательских устройств, а также представлен SDR-демонстратор выявления угроз с использованием технологии программно-конфигурируемого радио (SDR, *аббр. от англ.* Software Defined Radio). Использование технологий сетевого позиционирования 5G для обеспечения безопасности дорожного движения исследуется в [5], в частности, показана разрешающая способность дальномерных первичных измерений до нескольких сантиметров при работе в диапазоне ММВ. Обзор путей использования данных о местоположении устройств сетей пятого и последующих поколений в сценариях 3GPP (*аббр. от англ.* 3rd Generation Partnership Project) для микросот снаружи и внутри помещений представлен в [6]; в частности, средствами имитационного моделирования получена точность ОМП в единицы метров при использовании специальных опорных сигналов позиционирования (PRS, *аббр. от англ.* Positioning Reference Signals) с полосой 100 МГц в диапазоне FR2 (*аббр. от англ.* Frequency Range 2) от 24 ГГц. Позиционирование при экстренном вызове в труднодоступных местах с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), функционирующих в составе воздушного сегмента сетей 5G, проанализировано в [7]; также в работе установлено, что увеличение разноса поднесущих при использовании сигналов с ортогональным частотным мультиплексированием OFDM (*аббр. от англ.* Orthogonal Frequency Division Multiplexing) с 30 до 120 кГц в диапазоне FR1 (до 6 ГГц) приводит к уменьшению ошибок первичных дальномерных измерений. Данный вывод подтверждается результатами имитационного моделирования и в работе [8], где, помимо прочего, сделаны следующие важные выводы. Во-первых, наилучшая точность позиционирования достигается при работе в диапазоне FR2 с использованием наибольшего разноса поднесущих $\Delta f = 240$ кГц. Согласно нумерологии радиointерфейса сети 5G-NR, чем выше Δf , тем больше слотов передается за отдельный период времени, что, в свою очередь, приводит к большему числу символов PRS за этот интервал времени. С точки зрения первичных дальномерных измерений, дан-

ное обстоятельство приводит к увеличению выигрыша от корреляционной обработки на приеме и, следовательно, более точной оценке задержки при распространении радиоволн (РРВ), т. е. более точным дальномерным измерениям. Во-вторых, при использовании ММВ в диапазоне FR2 с разномом поднесущих Δf от 60 до 240 кГц достигается точность позиционирования менее 1 м, а при использовании дециметровых волн в диапазоне FR1 с разномом поднесущих Δf от 15 до 60 кГц достигаемая точность оказывается в пределах от 1 до 6 м. Метровая и даже дециметровая точность при определенных условиях может быть достигнута с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

Современные ГНСС, включая отечественную ГЛОНАСС, американскую GPS (*аббр. от англ.* Global Positioning System), европейскую Galileo и китайскую BeiDou обеспечивают достаточно высокую точность ОМП пользовательских устройств в условиях наличия прямой видимости LOS (*аббр. от англ.* Line of Sight) между спутником и UE [9]. Интерес к технологиям наземного сетевого позиционирования обусловлен тем обстоятельством, что системы ГНСС не обеспечивают требуемой точности позиционирования в условиях отсутствия прямой видимости NLOS (*аббр. от англ.* Non Line Of Sight) между пользовательским устройством и спутником, например, в сценариях плотной городской застройки (рисунок 1).

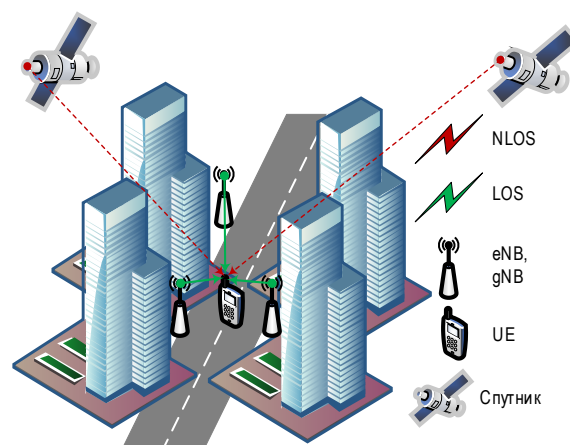


Рис. 1. Отсутствие прямой видимости ГНСС в городской застройке

Fig. 1. GNSS Non-Line-of-Sight GNSS in Urban Areas

В таких сценариях задача позиционирования может быть решена средствами инфраструктуры территориально распределенных стационарных базовых станций с известными координатами eNodeB (eNB) и gNB (gNodeB) сетей LTE и NR соответственно [10, 11].

Анализ эволюции технологий сетевого позиционирования в [12, 13] показал, что в процессе стандартизации, построения и эксплуатации сетей по-

движной радиосвязи возможности ОМП UE с использованием инфраструктуры сетей радиодоступа (СРД) из дополнительных сервисов трансформировались в одну из основных услуг, точность которой увеличивалась с каждым новым поколением. Обзор эволюции процедур сетевого позиционирования в [14, 15] показал, что уплотнение территориального распределения стационарных базовых станций и подвижных пользовательских устройств приводят к необходимости поиска механизмов настраиваемого шаблона радиоресурсов, выделенных для сбора первичных измерений с целью снижения внутрисистемных помех при их повторном использовании. Исследование способов учета данных о местоположении пользовательских устройств, функционирующих в составе экосистемы 5G, представленное в [16, 17], показало, что они способствуют реализации новых механизмов установления и ведения радиосвязи на основе позиционирования. В зарубежной литературе данный подход получил название LAC (*аббр. от англ. Location-Aware Communication*). Примером использования LAC является совместное использование спектра первичными и вторичными источниками радиоизлучения (ИРИ) за счет их предварительного позиционирования для исключения помех при пространственном уплотнении одновременных передач ИРИ. Актуальным направлением для пространственного уплотнения SDMA (*аббр. от англ. Space-Division Multiple Access*) в сверхплотных сетях (UDN, *аббр. от англ. Ultra Dense Network*) при переходе в диапазон ММВ с миниатюризацией многоантенных систем (mMIMO, *аббр. от англ. massive MIMO*) также является диаграммообразование на основе местоположения LAB (*аббр. от англ. Location-Aware Beamforming*).

Таким образом, в сетях пятого и последующих поколений позиционирование становится уже не только одним из новых сервисов, но также и средством достижения качественно нового уровня функционирования сети за счет данных о текущем местоположении подвижных устройств, в том числе с использованием режима непосредственной связи друг с другом D2D (*аббр. от англ. Device-to-Device*) и искусственного интеллекта [18, 19].

На сегодняшний день вопросам технологий наземного сетевого позиционирования посвящено достаточное число фундаментальных работ отечественных [20–22] и зарубежных [23–25] авторов, суть которых сводится к поиску технических решений по достижению требуемой точности ОМП в сценариях, где существующие технологии не обеспечивают требуемой точности: например, внутри помещений, при отсутствии прямой видимости, в условиях плотной застройки, с использованием БПЛА и др.

Широкомасштабная работа по стандартизации технологий наземного сетевого позиционирования 5G NR проводится международным консорциумом 3GPP. Архитектура, процедуры, протоколы, сигналы, измерения и сценарии сетевого позиционирования регламентированы в спецификациях и рекомендациях 3GPP [26–31]. TS 38.211 [26] описывает физические каналы и сигналы стандарта 5G NR, в том числе структуру опорных сигналов позиционирования PRS. TS 38.215 [27] определяет измерения на физическом уровне стандарта 5G NR, в том числе разность времен прихода опорных сигналов (RSTD, *аббр. от англ. Reference Signal Time Difference*). Данный параметр используется как первичное измерение разностно-дальномерного метода в сетях LTE и NR. TR 22.872 [28] систематизирует количественные требования к сценариям сетевого позиционирования снаружи и внутри помещений. TR 38.855 [29] содержит параметры для моделирования и оценки показателей функционирования технологий сетевого позиционирования 5G NR в различных сценариях. TS 38.305 [30] специфицирует архитектуру и процедуры ОМП пользовательского устройства в сети радиодоступа NG-RAN (*аббр. от англ. Next Generation Radio Access Network*). TS 38.455 [31] регламентирует процедуры сигнализации в плоскости управления (CP, *аббр. от англ. Control Plane*) между узлом NG-RAN и функциональным модулем определения местоположения LMF (*аббр. от англ. Location Management Function*), в том числе процедуры сигнализации протокола позиционирования NRPPa (*аббр. от англ. NR Positioning Protocol A*).

Согласно TR 22.872 [28] и формализованным сценариям [10, 11], различают следующие приложения ОМП устройств в сетях 5G NR:

- а) услуги на основе позиционирования LBS (*аббр. от англ. Location-Based Service*), например, ОМП для велопроката и геотаргетинг – показ рекламы, основывающийся на текущем географическом местоположении пользователя;
- б) позиционирование в промышленности, например, приложениях индустрии 4.0, в том числе при управлении отходами;
- в) позиционирование в приложениях электронного здравоохранения eHealth, например, ОМП медицинского оборудования и персонала внутри и за пределами медицинских учреждений;
- г) позиционирование в случаях экстренного вызова и в критически важных ситуациях;
- д) позиционирование транспортных средств при управлении дорожным движением и взимании платы за проезд;
- е) позиционирование для железнодорожных и морских грузоперевозок, например, отслеживание грузоперевозок;
- ж) позиционирование в приложениях с использованием БПЛА.

Основной технологией сетевого позиционирования 5G NR является разностно-дальномерный метод, называемый в зарубежных источниках наблюдаемой разностью времен прихода сигналов (OTDOA, *аббр. от англ. Observed Time Difference of Arrival*). Данный метод был стандартизирован для сетей LTE и основан на использовании специальных опорных сигналов позиционирования PRS [32]. Первичными измерениями в методе OTDOA являются параметры RSTD, собираемые UE по синхронно излучаемым базовыми станциями eNB сигналам PRS [33]. Потенциальная точность позиционирования с использованием специальных опорных сигналов позиционирования PRS в сетях LTE зависит от совокупности факторов, среди которых геометрический фактор снижения точности (GDOP, *аббр. от англ. Geometric Dilution of Precision*), определяемый топологией стационарных опорных базовых станций eNB [34], а также свойства самих сигналов PRS [35].

Результаты имитационного моделирования с использованием пакета расширения LTE Toolbox [36] и примера специального программного обеспечения (СПО) Matlab [37] показывают, что достижимая в сетях LTE точность позиционирования пользовательских устройств находится в пределах десятков метров. По сравнению с технологией OTDOA в LTE, радиointерфейс 5G NR, сохраняя механизм выделения специальных опорных сигналов позиционирования PRS, позволяет использовать для их передачи гораздо более широкие полосы частот, что потенциально повышает точность позиционирования устройств до единиц метров. Если в LTE максимальная ширина полосы частот равна 20 МГц, то в 5G NR она достигает 100 МГц в диапазоне FR1 и 400 МГц в диапазоне FR2.

Целью первой части исследования, посвященного моделированию технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR, является формализация процедур конфигурации опорных сигналов PRS, используемых для сбора первичных измерений в разностно-дальномерном методе OTDOA. В результате проведенного анализа и визуализации процедур конфигурации сигналов PRS выполняется постановка задачи на вторичную обработку первичных измерений по сконфигурированным сигналам PRS, которая является предметом второй части данного исследования.

Материал настоящей работы организован следующим образом. В разделе 2 формализован механизм конфигурации сигналов PRS стандарта 5G NR с использованием вспомогательных команд пакета расширения 5G Toolbox [38] и примера [39] СПО Matlab. В разделе 3 представлена постановка задачи на имитационное моделирование вторичной обработки первичных измерений по сконфигурированным сигналам PRS. Раздел 4 содержит выводы и направления дальнейших исследований.

2. Конфигурация сигналов позиционирования PRS стандарта 5G NR

2.1. Постановка задачи

Для позиционирования UE в сетях 5G NR могут использоваться опорные сигналы, излучаемые базовыми станциями gNB в канале «вниз» DL (DownLink). Сбор и обработка первичных измерений осуществляется пользовательским устройством. Опорные сигналы с информацией о состоянии канала (CSI-RS, *аббр. от англ. Channel State Information Reference Signals*), а также сигналы первичной (PSS, *аббр. от англ. Primary Synchronization Signal*) и вторичной (SSS, *аббр. от англ. Secondary Synchronization Signal*) синхронизации не подходят для сбора первичных измерений при позиционировании UE, так имеют следующие ограничения.

Во-первых, по опорным сигналам CSI-RS, PSS, SSS невозможно надежно осуществить одновременный параллельный прием достаточного числа сигналов от нескольких базовых станций gNB вследствие снижения отношения сигнал/(шум+помехи) (SINR, *аббр. от англ. Signal to Interference & Noise Ratio*). Опорные сигналы, излучаемые gNB соседних сот, вследствие наложения друг на друга в частотно-временном домене, являются источниками внутрисистемных помех по основному каналу приема и приводят к снижению требуемого SINR. В результате внутрисистемных помех пользовательское устройство сможет принять только опорные сигналы от близкорасположенных базовых станций gNB, в то время как сигналы от удаленных gNB будет подавлены в результате снижения SINR. Данное явление в зарубежных источниках применительно к опорным сигналам называют «потерей слышимости» (*от англ. Loss in Hearability*).

Во-вторых, опорные сигналы CSI-RS, PSS, SSS обладают достаточно слабыми корреляционными свойствами вследствие низкой плотности занимаемых ими ресурсных элементов (RE, *аббр. от англ. Resource Elements*) в частотно-временной ресурсной сетке; также шаблон RE сигналов CSI-RS, PSS, SSS не предполагает их распределения по всем поднесущим частотно-временной ресурсной сетки.

Для преодоления данных ограничений консорциумом 3GPP для сетей 5G NR в 16-м релизе были предложены специальные опорные сигналы позиционирования PRS с высокой плотностью ресурсных элементов и улучшенными корреляционными свойствами, которых удалось достичь за счет диагональной структуры расположения RE PRS по всей в частотно-временной ресурсной сетке. Слышимость сигналов PRS, излучаемых различными базовыми станциями gNB, достигается за счет использования так называемой концепции приглушения. Суть данной концепции сводится к тому, что за счет приглушения сеансов излучения PRS отдельных gNB достигается скоординированная передача

опорных сигналов позиционирования несколькими соседними базовыми станциями.

Далее исследуем частотно-временную структуру опорных сигналов позиционирования и проиллюстрируем концепцию приглушения передачи PRS. Для этого сначала рассмотрим основные параметры структуры конфигурации сигналов PRS в разделе 2.2. Затем формализуем процедуры конфигурации слотов для передачи и приглушения сигналов PRS в разделах 2.3 и 2.4, соответственно. В разделе 2.5 опишем особенности конфигурации опорных сигналов позиционирования PRS в частотно-временном домене 5G NR и, используя специальные команды пакета расширения 5G Toolbox, покажем, каким образом конфигурация набора ресурсов PRS влияет на частотно-временную структуру сигнала PRS стандарта 5G NR.

2.2. Основные параметры структуры конфигурации сигналов PRS

Согласно спецификациям 3GPP, сеанс позиционирования подвижного устройства можно сконфигурировать с использованием приема сигналов PRS в одном или нескольких частотных доменах (слоях). Частотный домен сеанса позиционирования PRS определяется как совокупность нескольких наборов ресурсов PRS, где каждый набор задает совокупность отдельных ресурсов PRS. *Наборы ресурсов PRS*, образующих частотный домен сеанса позиционирования PRS, конфигурируются следующими параметрами.

Разнос поднесущих для всех наборов ресурсов PRS частотного домена сеанса позиционирования может принимать значения 15, 30, 60 или 120 кГц. Для конфигурации разнеса поднесущих набора ресурсов PRS используется параметр SubcarrierSpacing структуры nrCarrierConfig.

Циклический префикс (ЦП, от англ. Cyclic Prefix – CP) для всех наборов ресурсов PRS частотного домена сеанса позиционирования может принимать значения normal или extended. Для конфигурации ЦП набора ресурсов PRS используется параметр CyclicPrefix структуры nrCarrierConfig.

Точка А PRS есть абсолютная частота опорного ресурсного блока или общего ресурсного блока. Са-

мая низкая поднесущая данного опорного ресурсного блока называется точкой А PRS. Спецификация стандарта 5G NR определяет частотное распределение ресурсов PRS относительно точки А PRS.

Далее проиллюстрируем конфигурацию начала распределения ресурсов PRS в частотном домене с использованием пакета расширения 5G Toolbox [38]. Данный пакет расширения позволяет формировать символы и индексы PRS посредством объекта конфигурации nrPRSConfig и функций nrPRS and nrPRSIndices. Объект nrPRSConfig содержит в себе все параметры, необходимые для конфигурации набора ресурсов PRS. В следующем разделе рассмотрим конфигурацию слотов для передачи сигналов PRS согласно примеру [39] пакета расширения 5G Toolbox [38].

2.3. Конфигурация слотов для передачи сигналов PRS

Конфигурация слота для передачи сигналов PRS определяется следующими параметрами объекта nrPRSConfig.

Период и нулевой сдвиг набора ресурсов PRS инициализируется параметром PRSResourceSetPeriod.

Сдвиг набора ресурсов PRS определяется относительно нулевого сдвига набора ресурсов PRS и инициализируется параметром PRSResourceOffset.

Коэффициент повтора ресурсов PRS инициализируется параметром PRSResourceRepetition.

Разнос ресурсов PRS по времени между двумя последовательными ресурсами PRS в наборе PRS инициализируется параметром PRSResourceTimeGap.

Рисунок 2 иллюстрирует параметры конфигурации слотов в наборе ресурсов PRS для случая с двумя ресурсами PRS. Период набора ресурсов PRS равен 10 слотам, а сдвиг набора ресурсов PRS относительно нулевого равен 3 слотам. Сдвиг первого ресурса #1 PRS относительно сдвига набора ресурсов PRS равен 1 слоту, а сдвиг второго ресурса #2 PRS относительно сдвига набора ресурсов PRS равен 4 слотам. Коэффициент повтора всех ресурсов PRS равен двум, т. е. каждый ресурс PRS выделяется дважды во всех периодически повторяющихся наборах или сеансах набора ресурсов PRS. Сдвиг ресурса PRS равен 2 слотам.

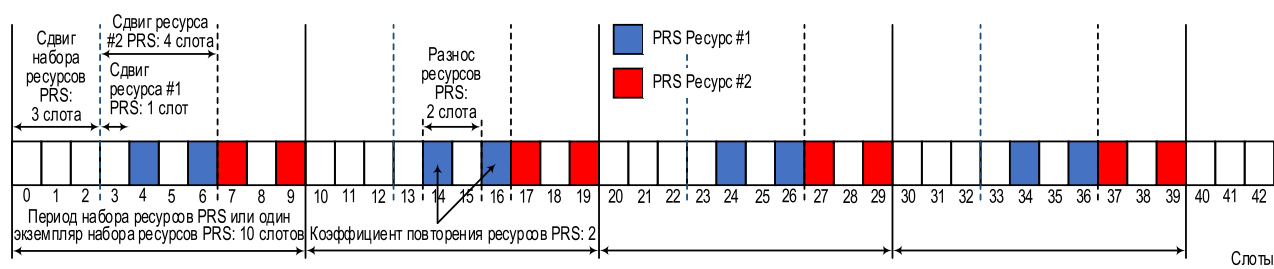


Рис. 2. Параметры конфигурации слотов PRS

Fig. 2. PRS Slot Configuration Parameters

Скрипт 1 показывает порядок инициализации ресурсов PRS для примера, который иллюстрирует рисунок 2. Рисунок 3, полученный с использованием пакета расширения 5G Toolbox [38], иллюстрирует конфигурацию слотов ресурсов PRS для конфигурации, которую содержит скрипт 1.

Скрипт 1. Конфигурация слотов набора ресурсов PRS

```
% конфигурация параметров поднесущих
carrier = nrCarrierConfig;
carrier.SubcarrierSpacing = 15;
carrier.CyclicPrefix = 'Normal';
% конфигурация параметров набора ресурсов PRS
% объект конфигурации набора ресурсов PRS
prs = nrPRSConfig;
% период и нулевой сдвиг набора ресурсов PRS
prs.PRSResourceSetPeriod = [10 3];
% сдвиг ресурсов PRS
prs.PRSResourceOffset = [1 4];
% коэффициент повтора ресурсов PRS
prs.PRSResourceRepetition = 2;
% разнос ресурсов PRS
prs.PRSResourceTimeGap = 2;
% число слотов для примера
numSlots = 43;
```

Далее рассмотрим конфигурацию слотов для приглушения сигналов PRS согласно примеру [39] пакета расширения 5G Toolbox.

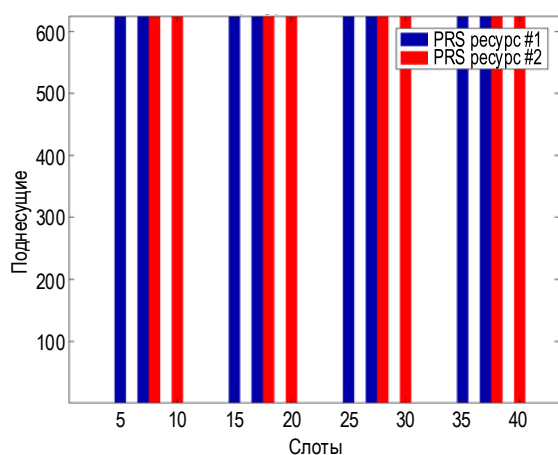


Рис. 3. Конфигурация слотов PRS

Fig. 3. PRS Slot Configuration

2.4. Конфигурация слотов для приглушения сигналов PRS

Приглушение ресурсов сигналов PRS можно осуществить следующими способами. Во-первых, приглушить экземпляр набора ресурсов PRS можно с использованием параметров `MutingPattern1` и `MutingBitRepetition` объекта `nrPRSConfig` конфигурации PRS. Во-вторых, приглушить ресурсы PRS можно по индексам повторения с использованием параметра `MutingPattern2` объекта `nrPRSConfig` конфигурации PRS.

Параметр `MutingPattern1` представляет собой двоичный вектор, который управляет приглушением экземпляров в наборе ресурсов PRS. Каждый элемент двоичного вектора управляет приглушением всех ресурсов PRS в заданном экземпляре

набора ресурсов PRS; один экземпляр набора ресурсов PRS соответствует одному периоду набора ресурсов PRS. Первый элемент в двоичном векторе соответствует первому экземпляру, а второй элемент – второму экземпляру набора ресурсов PRS и т. д. Значение 1 двоичного вектора указывает на то, что все ресурсы PRS в экземпляре набора ресурсов PRS передаются. Значение 0 двоичного вектора указывает на то, что все ресурсы PRS в экземпляре набора ресурсов PRS приглушаются. Рисунок 4 иллюстрирует вариант 1 конфигурации приглушения слотов PRS для рассмотренного ранее примера (см. рисунок 2) с использованием двоичного вектора приглушения `[1 0 1 0 1 0 ...]`, образуемого повтором шаблона `[1 0]` вектора `MutingPattern1` на уровне экземпляра набора ресурсов PRS. Слоты со сплошной заливкой обозначают переданные ресурсы PRS, а слоты с узорной заливкой обозначают приглушенные ресурсы PRS.

Параметр `MutingBitRepetition` представляет собой число N последовательных экземпляров наборов ресурсов PRS, соответствующих одному элементу двоичного вектора `MutingPattern1`. Первый элемент двоичного вектора `MutingPattern1` соответствует N последовательным экземплярам наборов ресурсов PRS, второй элемент соответствует следующим N последовательным экземплярам наборов ресурсов PRS и т. д.

Рисунок 5 иллюстрирует вариант 1 конфигурации приглушения слотов PRS для рассмотренного ранее примера (рисунок 2) с использованием результирующего двоичного вектора приглушения `[1 1 0 0 1 1 0 0 ...]`, образуемого повтором шаблона `[1 0]` вектора `MutingPattern1` на уровне экземпляра набора ресурсов PRS с коэффициентом повтора `PRSResourceRepetition`, равным 2.

Параметр `MutingPattern2` представляет собой двоичный вектор, который управляет приглушением экземпляров во всех активных наборах ресурсов PRS по индексам повтора соответствующих ресурсов PRS. Первый элемент в двоичном векторе соответствует первому индексу повтора ресурса PRS, второй элемент – второму и т. д. Длина двоичного вектора определяется значением параметра `PRSResourceRepetition`, а сам двоичный вектор применяется ко всем ресурсам PRS в заданном наборе ресурсов PRS.

Рисунок 6 иллюстрирует вариант 2 конфигурации приглушения слотов PRS по индексам повтора соответствующих ресурсов PRS для рассмотренного ранее примера (рисунок 2) с использованием результирующего двоичного вектора приглушения `[0 1 0 1 0 1 ...]`, образуемого повтором шаблона `[0 1]` вектора `MutingPattern2` на уровне повтора индексов ресурсов PRS.

При совместной конфигурации обоих параметров `MutingPattern1` и `MutingPattern2` результирующий

двоичный вектор приглушения получается в результате поэлементного выполнения логической операции И (AND) над двоичными векторами приглушения варианта 1 и варианта 2 конфигураций.

Рисунок 7 иллюстрирует конфигурацию приглушения слотов PRS по варианту 1 с использованием повтора шаблона [1 0] с коэффициентом повтора 2, а также по варианту 2 с повтором шаблона [0 1].

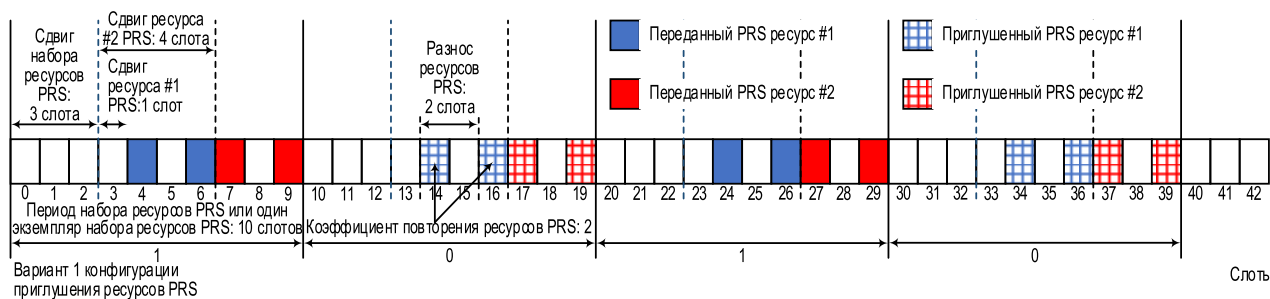


Рис. 4. Конфигурация битов для приглушения слотов PRS по варианту 1

Fig. 4. Muting Bit Pattern Option-1 Configuration

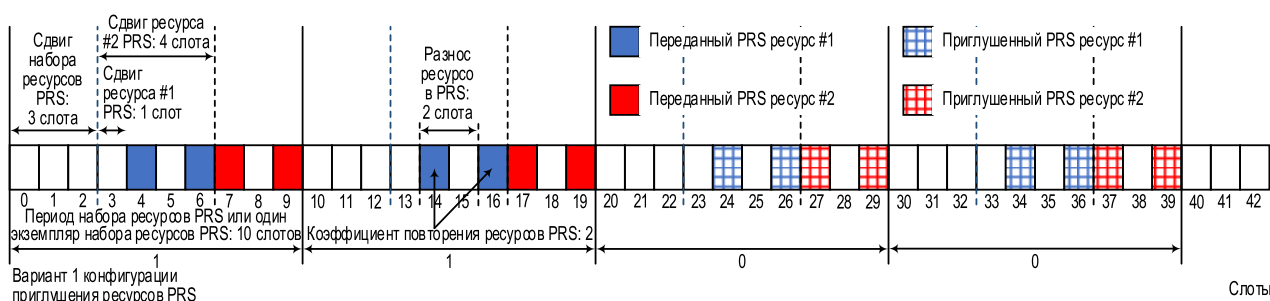


Рис. 5. Конфигурация битов для приглушения слотов PRS по варианту 1 с повтором

Fig. 5. Muting Bit Pattern Option-1 with Muting Bit Repetition Factor Configuration

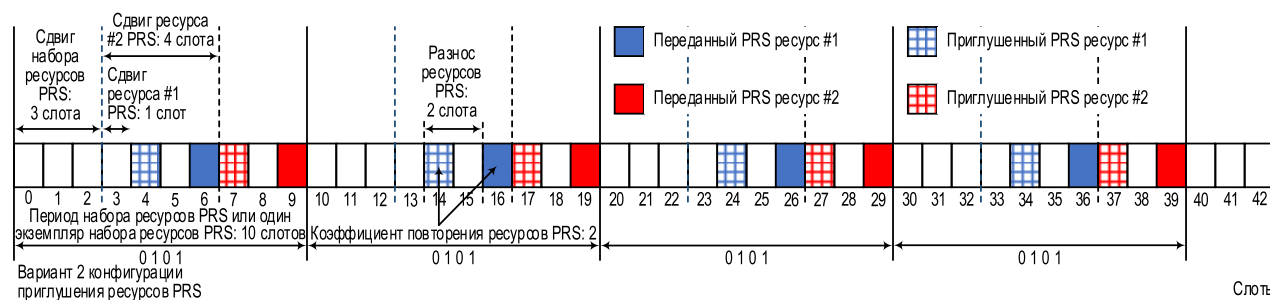


Рис. 6. Конфигурация битов для приглушения слотов PRS по варианту 2

Fig. 6. Muting Bit Pattern Option-2 Configuration

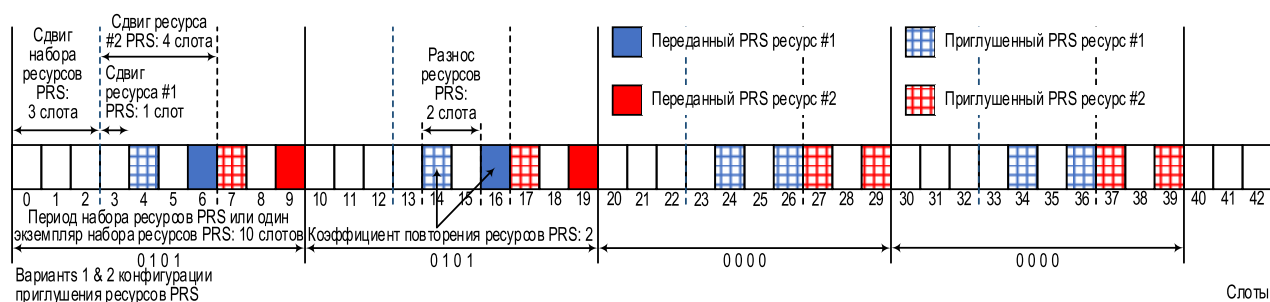


Рис. 7. Конфигурация битов для приглушения слотов PRS по вариантам 1 и 2

Fig. 7. Muting Bit Pattern Option-1 and Option-2 Configuration

Результирующий двоичный вектор приглушения по варианту 1 на уровне экземпляра набора ресурсов PRS равен [1 1 0 0 1 1 ...]. Результирующий двоичный вектор приглушения по варианту 2 на уровне повтора индексов ресурсов PRS равен [0 1 0 1 0 1 ...].

Совместная конфигурация осуществляется для следующих условий: число ресурсов PRS равно двум, коэффициент повтора равен двум, один экземпляр набора ресурсов содержит четыре экземпляра ресурсов. На уровне повтора индексов двоичные вектора, которые управляют приглушением ресурсов PRS, можно представить следующим образом. Двоичный вектор по варианту 1 равен:

$$\begin{aligned} & binaryVec1 = \\ & = [1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1...], \end{aligned} \quad (1)$$

а двоичный вектор по варианту 2 равен:

[illegible]

В результате поэлементного выполнения логической операции И над двоичными векторами (1) и (2) получим следующий результирующий двоичный вектор приглушения на уровне повтора индексов ресурсов PRS:

$$binaryVec = [0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1...]. \quad (3)$$

Рассмотрим далее порядок конфигурации приглушения слотов в наборе ресурсов PRS в дополнение к рассмотренному ранее сценарию (скрипт 1). Скрипт 2 содержит команды формирования пустых ресурсов PRS в приглушенных слотах. Рисунок 8, полученный с использованием пакета расширения 5G Toolbox [38], иллюстрирует конфигурацию слотов ресурсов PRS для параметров, которые содержит скрипт 2; приглушенные слоты отмечены затенением.

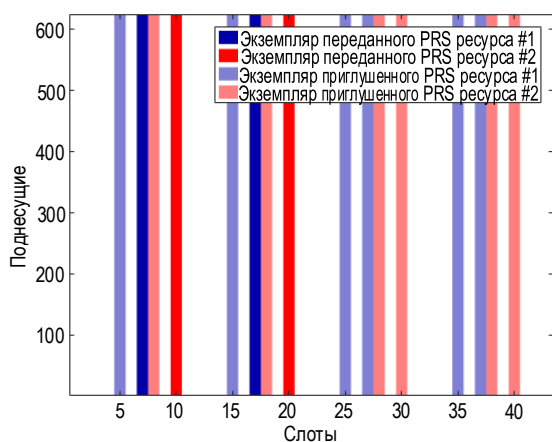


Рис. 8. Конфигурация приглушения слотов набора ресурсов PRS

Fig. 8. PRS Slot Muting Configurations

**Скрипт 2. Конфигурация приглушения слотов
набора ресурсов PRS**

```
% конфигурация приглушения слотов набора ресурсов PRS
% использовать [] для отмены двоичного шаблона
% приглушения по варианту 1
prs.MutingPattern1 = [1 0];
prs.MutingBitRepetition = 2;
% использовать [] для отмены двоичного шаблона
% приглушения по варианту 2
prs.MutingPattern2 = [0 1];
plotTitle = 'Конфигурация приглушения слотов PRS';
plotGrid(carrier, prs, numSlots, 'SlotFill', plotTitle);
```

Далее рассмотрим конфигурацию сигналов PRS в частотно-временной ресурсной сетке согласно примеру [39] пакета расширения 5G Toolbox.

2.5. Конфигурация сигналов PRS в ресурсной сетке

Конфигурация во временном домене

Конфигурация сигналов PRS во временном домене частотно-временной ресурсной сетки на уровне OFDM символов задается следующими параметрами системного объекта `nrPRSConfig`.

Параметр NumPRSSymbols L_{PRS} определяет число последовательных OFDM символов в слоте, которые выделяются для каждого ресурса PRS в наборе.

Параметр SymbolStart l_{start}^{PRS} определяет число начальных OFDM символов (относительно первого OFDM символа #0 в слоте) для каждого ресурса PRS.

OFDM символы, выделенные для ресурсов PRS, определяются как:

$$l = l_{start}^{PRS}, l_{start}^{PRS} + 1, \dots, l_{start}^{PRS} + L_{PRS} - 1. \quad (4)$$

Рисунок 9 иллюстрирует конфигурацию ресурсов PRS во временном домене частотно-временной ресурсной сетки на уровне OFDM символов, когда число последовательных OFDM символов в слоте, выделенных для ресурса PRS равно $L_{PRS} = 6$, а число начальных OFDM символов относительно первого OFDM символа #0 в слоте перед выделенными ресурсами PRS, равно $l_{start}^{PRS} = 3$.

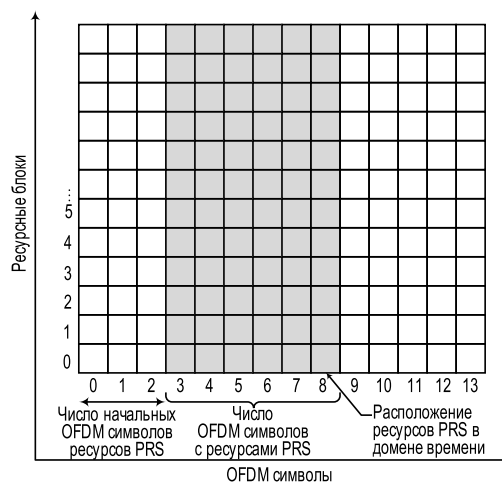


Рис. 9. Конфигурация OFDM символов ресурсов PRS во временном домене

Fig. 9. PRS OFDM Symbols Allocation in Time Domain

Конфигурация в частотном домене

Конфигурация сигналов PRS в частотном домене частотно-временной ресурсной сетки на уровне ресурсных блоков (RB, аббр. от англ. Resource Block) задается следующими параметрами системного объекта nrPRSCfg.

Параметр NumRB определяет число физических ресурсных блоков (PRB, аббр. от англ. Physical Resource Block), которые выделяются для всех ресурсов PRS в наборе.

Параметр RBOffset определяет начальный индекс физического ресурсного блока PRB для всех ресурсов PRS в наборе. Данный параметр определяется в частотно-временной ресурсной сетке относительно нулевого общего ресурсного блока (CRB 0, аббр. от англ. Common Resource Block).

Рисунок 10 иллюстрирует конфигурацию ресурсов PRS в частотном домене частотно-временной ресурсной сетки на уровне ресурсных блоков RB.

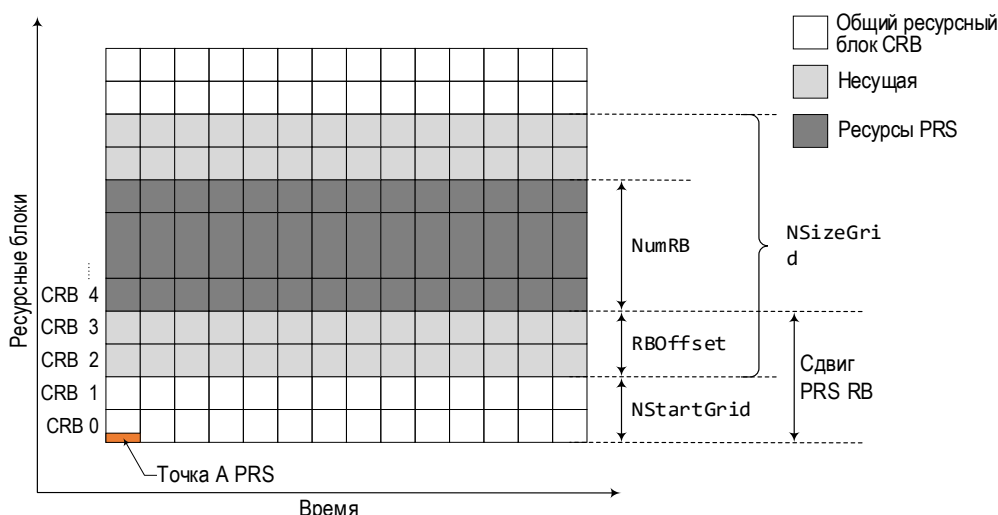


Рис. 9. Конфигурация ресурсов PRS в частотном домене

Fig. 9. PRS Resource Blocks Allocation in Frequency Domain

Конфигурация на уровне ресурсных элементов

Конфигурация сигналов PRS в частотном домене частотно-временной ресурсной сетки на уровне отдельных элементов задается следующими параметрами системного объекта nrPRSCfg.

Параметр CombSize K_{comb}^{PRS} определяет плотность ресурсных элементов всех ресурсов PRS в наборе ресурсов PRS. Например, если параметр принимает значения из набора $i \in \{2, 4, 6, 12\}$, то каждый i -й ресурсный элемент в физическом ресурсном блоке PRB выделяется для передачи сигнала PRS.

Параметр REOffset k_{offset}^{PRS} определяет начальный сдвиг ресурсных элементов в первом OFDM символе каждого ресурса PRS в наборе. Относительные сдвиги RE в следующих PRS OFDM символах определяются по сдвигу REOffset, как показывает таблица 1.

Допустим, число OFDM символов, выделенных для ресурсов PRS, равно NumPRSSymbols = 6; число начальных OFDM символов относительно первого OFDM символа #0 в слоте равно SymbolStart = 3; плотность ресурсных элементов всех ресурсов PRS в наборе ресурсов PRS равна CombSize = 4; начальный сдвиг ресурсных элементов в первом OFDM символе каждого ресурса PRS равен REOffset = 2.

Для заданной плотности ресурсных элементов RE всех ресурсов PRS в наборе $K_{comb}^{PRS} = 4$, относительные сдвиги RE в следующих PRS OFDM символах получим на основе данных второй строки таблицы относительных сдвигов ресурсных элементов с сигналами PRS (таблица 1).

ТАБЛИЦА 1. Относительные сдвиги ресурсных элементов с сигналами PRS

TABLE 1. PRS Resource Element Offsets

K_{comb}^{PRS}	Номера OFDM символов в пределах распределения ресурсов PRS в канале «вниз» DL: ($l - l_{start}^{PRS} = 0, \dots, L_{PRS} - 1$)											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
4	0	2	1	3	0	2	1	3	0	2	1	3
6	0	3	1	4	2	5	0	3	1	4	2	5
12	0	6	3	9	1	7	4	10	2	8	5	11

Для заданной конфигурации номера OFDM символов в пределах распределения ресурсов PRS в канале «вниз» DL определяются как:

$$l - l_{start}^{PRS} = 0 \dots 5 \quad (5)$$

(относительно первого OFDM символа #0).

Анализ относительных сдвигов ресурсных элементов с сигналами PRS в зависимости от параметра K_{comb}^{PRS} (см. таблицу 1) показывает, что для заданных номеров OFDM символов (5) относительные сдвиги RE k' в OFDM символе равны:

$$k' = [0 \ 2 \ 1 \ 3 \ 0 \ 2]. \quad (6)$$

Рисунок 11 иллюстрирует конфигурацию ресурсных элементов сигналов PRS для рассмотренного выше сценария при одном физическом ресурсном блоке PRB в одном слоте; вертикальные стрелки показывают относительные частотные сдвиги ресурсных элементов согласно (6) относительно $REOffset = 2$.

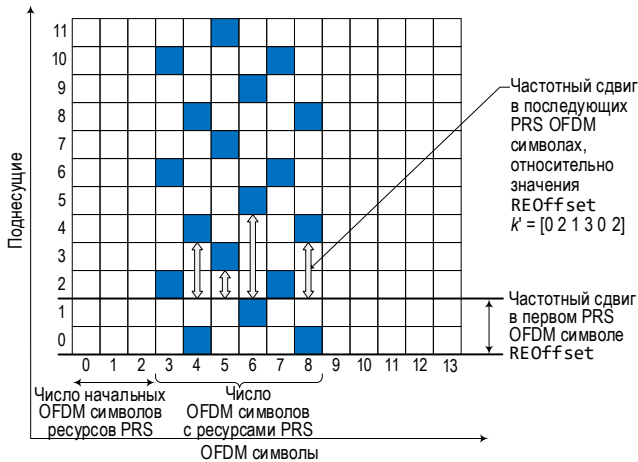


Рис. 11. Параметры конфигурации ресурсных элементов для сигналов PRS

Fig. 11. PRS Resource Element Allocation Parameters

В частотном домене индекс ресурсного элемента k согласно спецификации 3GPP TS 38.211 [26] определяется выражением:

$$k = mK_{comb}^{PRS} + ((k_{offset}^{PRS} + k') \bmod K_{comb}^{PRS}); \quad (7)$$

$$m = 0, 1, \dots$$

Второе слагаемое в (7) относительно первого OFDM символа #0 для рассмотренного сценария равно:

$$\begin{aligned} \bmod(k_{offset}^{PRS} + k', K_{comb}^{PRS}) &= \\ &= \bmod([2 \ 4 \ 3 \ 5 \ 2 \ 4], 4) = [2 \ 0 \ 3 \ 1 \ 2 \ 0]. \end{aligned} \quad (8)$$

Проиллюстрируем далее порядок конфигурации сигналов PRS в частотно-временной ресурсной сетке на уровне отдельных ресурсных элементов. Скрипт 3 содержит команды конфигурации ресурсов PRS на уровне ресурсных элементов в отдельном физическом ресурсном блоке для одного слота. Рисунок 12, полученный с пакетом расширения 5G Toolbox [38], иллюстрирует конфигурацию сигналов PRS в частотно-временной ресурсной сетке на уровне отдельных ресурсных элементов, параметры которой содержит скрипт 3.

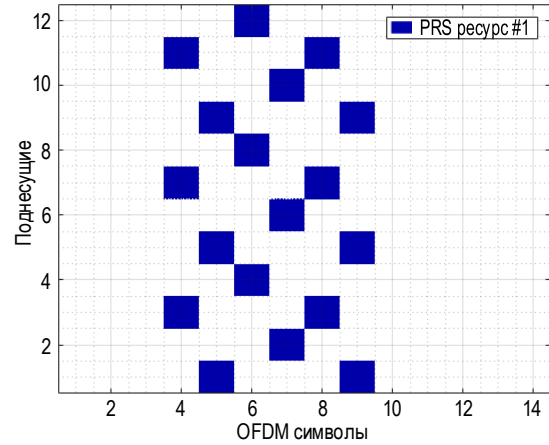


Рис. 12. Конфигурация ресурсных элементов для сигналов PRS

Fig. 12. PRS Resource Element Configuration

Скрипт 3. Конфигурация ресурсов PRS на уровне ресурсных элементов

```
% конфигурация ресурсов PRS на уровне ресурсных элементов RE
carrier.NSizeGrid = 1;
prs = nrPRSConfig;
prs.NumPRSSymbols = 6;
prs.SymbolStart = 3;
prs.NumRB = 1;
prs.RBOffset = 0;
prs.CombSize = 4;
prs.REOffset = 2;
% построение шаблона RE сетки в одном слоте
numSlots = 1;
plotTitle = 'Конфигурация ресурсных элементов PRS';
plotGrid(carrier, prs, numSlots, 'REFill', plotTitle);
grid on; grid minor;
```

Параметр NPRSID системного объекта конфигурации nrPRSConfig служит для инициализации псевдослучайной двоичной последовательности, используемой при формировании символов PRS согласно 3GPP TS 38.211 [26].

Рассмотренные опорные сигналы позиционирования PRS определяют порядок конфигурации частотно-временной сетки ресурсов PRS, в том числе на уровне отдельных RE. Формализованные процедуры используются далее для конфигурации сигналов PRS нескольких базовых станций gNB стандарта 5G NR в имитационной модели.

3. Постановка задачи на имитационное моделирование

Для постановки задачи на имитационное моделирование технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR рассмотрим гиперболический или разностно-дальномерный метод позиционирования, известный в сетях LTE [36, 37] и NR [38–40] как метод наблюдаемой разности времен прихода сигналов OTDOA. Рисунок 13 иллюстрирует сценарий ОМП пользовательского устройства на плоскости в 2D с использованием инфраструктуры трех стационарных базовых станций gNB.

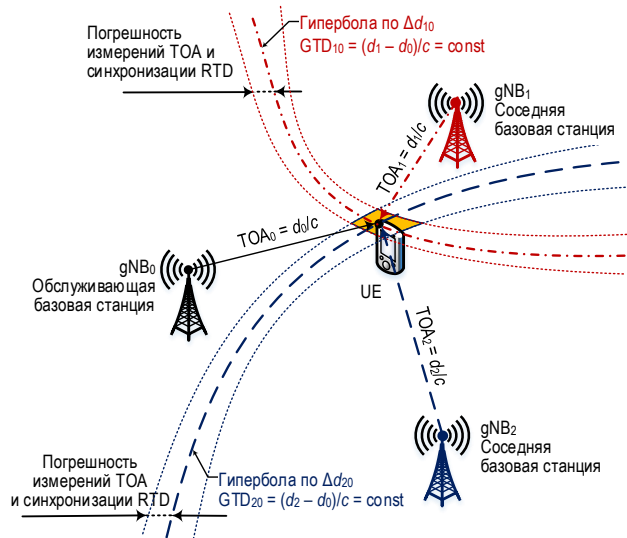


Рис. 13. Сценарий позиционирования в сетях стандарта 5G NR
Fig. 13. Positioning Scenario in 5G NR Networks

Метод OTDOA основан на синхронном излучении территориально распределенными базовыми станциями gNB специальных опорных сигналов позиционирования PRS в канале «вниз» DL. Обработка первичных измерений времени прихода сигнала (TOA, аббр. от англ. Time of Arrival) от разных gNB осуществляется в пользовательском устройстве. Под наблюдаемой разностью времен прихода сигналов OTDOA понимают наблюдаемый UE временной интервал между приемом сигналов PRS в DL от двух территориально-распределенных gNB.

Так, если сигнал от обслуживающей базовой станции gNB₀ принят в момент TOA₀, а сигнал от соседней базовой станции gNB₁ – в момент TOA₁, то OTDOA₁₀ = TOA₁ – TOA₀.

Параметр RTD (аббр. от англ. Real Time Difference) определяет неточность временной синхронизации между двумя территориально-распределенными базовыми станциями gNB; если gNB₀ передает сигнал PRS в момент t_3 , а gNB₁ – в момент t_4 , то RTD = $t_4 - t_3$; если же gNB₀ и gNB₁ точно синхронизированы и осуществляют передачу сигналов PRS одновременно, то RTD = 0.

Параметр GTD (аббр. от англ. Geometric Time Difference) определяет геометрическую разность времен прихода сигналов; если расстояние между обслуживающей базовой станцией gNB₀ и пользовательским устройством равно d_0 , а расстояние между соседней базовой станцией gNB₁ и пользовательским устройством равно d_1 , то геометрическая разность времен прихода сигналов от gNB₀ и gNB₁ на UE определяется как $GTD_{10} = (d_1 - d_0)/c$. Наблюдаемая разность времен прихода OTDOA связана с геометрической разностью GTD и неточностью синхронизации RTD между двумя gNB соотношением:

$$OTDOA = GTD + RTD. \quad (9)$$

В рассматриваемом сценарии (см. рисунок 13) GTD_{10} определяет гиперболу $\Delta d_{10} = d_1 - d_0$, а GTD_{20} определяет гиперболу $\Delta d_{20} = d_2 - d_0$; пересечение гипербол Δd_{10} и Δd_{20} определяет местоположение UE. С точки зрения вторичной обработки первичных измерений разностно-дальномерного метода различают оценку координат устройством и сетью. Если оценка координат выполняется пользовательским устройством, то UE вычисляет свои координаты с использованием принимаемых из сети вспомогательных данных: параметра RTD и известных координат gNB. Если оценка координат выполняется сетью, UE отправляет параметры OTDOA, из которых сеть определяет местоположение пользовательского устройства с использованием RTD и известных координат gNB.

Для разностно-дальномерных измерений OTDOA в сетях 5G NR специфицирован параметр разности времен опорных сигналов RSTD, который определяется как наименьшая разность моментов начала приема подкадров от соседней и опорной (обслуживающей) gNB [27].

Для реализации метода OTDOA в сетях 5G NR опорные сигналы позиционирования передаются набором соседних базовых станций gNB синхронно с излучением сигнала PRS обслуживающей gNB. Обслуживающая gNB₀ выступает в роли опорной базовой станции, относительно которой вычисляются разности времен опорных сигналов:

$$RSTD_{i,0} = TOA_i - TOA_0. \quad (10)$$

Обозначим через $\mathbf{x} = [x \ y]^T$ вектор неизвестных координат пользовательского устройства на плоскости, а через $\mathbf{x}_j = [x_j \ y_j]^T$ вектор известных координат базовой станции gNB_j на плоскости, тогда первичные измерения RSTD можно представить выражением:

$$RSTD_{i,0} = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{c} - \frac{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}}{c} + RTD_{i,0} + \delta_{i,0}, \quad (11)$$

где $RSTD_{i,0}$ – разность времен прихода опорных сигналов PRS, измеренных на UE от gNB_i и опорной gNB₀; $RTD_{i,0}$ – неточность синхронизации между gNB_i и gNB₀; $\delta_{i,0}$ – ошибки измерения TOA от gNB_i и gNB₀; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость света; d_i – расстояние между базовой станцией gNB_i и пользовательским устройством, равное:

$$d_i = \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{c}. \quad (12)$$

Для позиционирования UE на плоскости требуется три gNB: одна опорная и две соседние. Если UE знает координаты опорной gNB₀ и двух соседних gNB_i, а также неточности синхронизации $RTD_{i,0}$,

тогда получим два уравнения (11) с двумя неизвестными $[x \ y]^T$, которое можно решить согласно:

$$\begin{cases} RSTD_{1,0} = d_1 - d_0 + \delta_{1,0}; \\ RSTD_{2,0} = d_2 - d_0 + \delta_{2,0}. \end{cases} \quad (13)$$

Для получения более точной оценки координат желательно иметь измерения от более чем двух gNB. Если бы БС 5G NR были точно синхронизированы, то неточности синхронизации были бы равны нулю, а метод OTDOA свелся бы к методу TDOA. Геометрически, каждое измерение TDOA определяет гиперболу, при этом «ширина» гиперболы определяется ошибками измерений разностно-дальномерного метода δ_i , δ_1 (см. рисунок 13). Каждое измерение RSTD соответствует одной гиперболе в 2D (или гиперboloиду в 3D), на которой располагается пользовательское устройство; фокусы гиперболы соответствуют известным координатам базовых станций gNB. Данный метод сбора первичных измерений и их вторичной обработки с последующей оценкой координат называется мультилатерацией. Для ОМП UE на плоскости достаточно пересечения двух гипербол; при этом задействуется 3 базовых станции: одна опорная gNB и две соседних gNB; данный метод называется трилатерацией.

Таким образом, с технической точки зрения, сетевое позиционирование устройств UE, являющихся ИРИ в сетях 5G NR, можно рассматривать как ОМП в многопозиционных системах пассивной радиолокации, когда множество позиций представлено базовыми станциями gNB, являющимися опорными пунктами приема (ПП) первичных измерений [41]. Позиционирование ИРИ в многопозиционных системах пассивной радиолокации осуществляется по измерениям на пространственно разнесенных ПП времени прихода сигналов, излучаемых ИРИ [42]. Наиболее распространенными являются разностно-дальномерные и угломерные (УМ) пассивные измерения [43].

При разработке комплексной имитационной модели технологии сетевого позиционирования 5G NR PRS метровой точности, учитывающей особенности сбора первичных измерений по сконфигурированным сигналам PRS и их вторичную обработку согласно рассмотренному разностно-дальномерному методу OTDOA, реализуются следующие процедуры. В имитационном моделировании формируется сценарий территориального распределения нескольких базовых станций gNB и одного пользовательского устройства. Формирование и передача опорных сигналов позиционирования PRS от нескольких базовых станций gNB моделируется с учетом их уникальных идентификаторов. Прием опорных сигналов позиционирования PRS пользовательским устройством моделируется с учетом задержек и ослаблений при распространении радиоволн между gNB и UE. Первичная обработка измерений

осуществляется пользовательским устройством путем корреляции принятой смеси сигналов с заданным набором локальных сигналов PRS. В результате первичной обработки измерений по корреляционным пикам устанавливаются задержки времен прихода сигналов TOA, по которым затем согласно (10) вычисляются параметры разности времен опорных сигналов RSTD. Для графической интерпретации первичных измерений RSTD в имитационном моделировании производится вычисление и отображение линий постоянной разности времен прихода сигналов – гипербол с фокусами в известных местоположениях gNB. Вторичная обработка первичных измерений RSTD заключается в решении системы уравнений (13). Графическая интерпретация вторичной обработки включает отображение пересечений гипербол и оценку координат UE.

4. Заключение

Новый радиointерфейс стандарта 5G NR с более широкими полосами частот в диапазоне дециметровых и миллиметровых волн открывает принципиально новые возможности по достижению метровой точности в сетях пятого и последующих поколений. С одной стороны, новый радиointерфейс NR, включая многоантенные системы с диаграммообразованием и непосредственной связью устройств друг с другом D2D в сверхплотных сетях UDN, открывают новые возможности повышения точности определения местоположения. С другой стороны, использование данных о местоположении устройств способствует реализации новых механизмов установления и ведения радиосвязи на основе позиционирования LAC, включая диаграммообразование на основе местоположения LAB. В результате анализа состояния проблемы достижения метровой точности позиционирования по открытым зарубежным источникам было показано, что определение местоположения устройств с использованием инфраструктуры базовых станций подвижной связи 5G становится уже не только одной из дополнительных возможностей, но также и средством достижения качественно нового уровня функционирования сети NR. Данные обстоятельства позволяют рассматривать сетевое позиционирование 5G NR, как предмет исследования с двух сторон: во-первых, как целевую задачу определения местоположения пользовательских устройств в сети подвижной связи; во-вторых, как инструмент повышения эффективности построения и функционирования сети подвижной связи на основе данных о местоположении подвижных устройств. С точки зрения целевой задачи оценки координат пользовательских устройств актуальным и востребованным является направление по исследованию и разработке комплекса имитационных моделей сбора и обработки первичных навигационных измерений для технологии сетевого пози-

ционирования 5G NR при верификации пределов достижимой метровой точности определения местоположения подвижных устройств в различных сценариях их функционирования. В настоящей работе исследованы процедуры конфигурации опорных сигналов позиционирования PRS, которые излучаются базовыми станциями и используются для сбора первичных измерений времени прихода сигналов пользовательскими устройствами. С точки зрения вторичной обработки первичных измерений с результирующей оценкой координат раз-

ностно-дальномерным методом OTDOA в настоящей работе выполнена постановка задачи на разработку комплексной имитационной модели технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR PRS. Результаты представленного исследования позволяют далее обосновать требования к достижению метровой точности сетевого позиционирования подвижных и неподвижных устройств методом OTDOA с использованием сигналов PRS для управления диаграммой направленности в отдельной радиолинии сверхплотной сети радиодоступа миллиметрового диапазона 5G NR.

Список источников

1. Kanhere O., Rappaport T.S. Position Location for Futuristic Cellular Communications: 5G and Beyond // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 1. PP. 70–75. DOI:10.1109/MCOM.001.2000150
2. Dwivedi S., Shreevastav R., Munier F., Nygren J., Siomina I., Lyazidi Y., et al. Positioning in 5G Networks // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 11. PP. 38–44. DOI:10.1109/MCOM.011.2100091
3. Bartoletti S., Chiaraviglio L., Fortes S., Kennouche T.E., Solmaz G., Bernini G., et al. Location-Based Analytics in 5G and Beyond // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 7. PP. 38–43. DOI:10.1109/MCOM.001.2001096
4. Goztepe C., Büyükçorak S., Kurt G.K., Yanikomeroglu H. Localization Threats in Next-Generation Wireless Networks // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 9. PP. 51–57. DOI:10.1109/MCOM.010.2001150
5. Bartoletti S., Wymeersch H., Mach T., Brunnegård O., Giustiniano D., Hammarberg P., et al. Positioning and Sensing for Vehicular Safety Applications in 5G and Beyond // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 11. PP. 15–21. DOI:10.1109/MCOM.011.2100339
6. Conti A., Morselli F., Liu Z., Bartoletti S., Mazuelas S., Lindsey W.C., et al. Location Awareness in Beyond 5G Networks // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 11. PP. 22–27. DOI:10.1109/MCOM.221.2100359
7. Albanese A., Sciancalepore V., Costa-Pérez X. First Responders Got Wings: UAVs to the Rescue of Localization Operations in Beyond 5G Systems // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 11. PP. 28–34. DOI:10.1109/MCOM.101.2100273
8. Ferre R.M., Seco-Granados G., Lohan E.S. Positioning Reference Signal design for positioning via 5G // National Committee for Radiology in Finland. 2019.
9. Grewal M.S., Andrews A.P., Barton C.G. Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. Wiley, 2020. 608 p.
10. Фокин Г.А. Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 2. С. 3–9.
11. Фокин Г.А. Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 3. С. 13–21.
12. Фокин Г. Эволюция технологий позиционирования в сетях 2G-4G. Часть 1 // Первая миля. 2020. № 2(87). С. 32–39. DOI:10.22184/2070-8963.2020.87.2.32.38
13. Фокин Г. Эволюция технологий позиционирования в сетях 2G-4G. Часть 2 // Первая миля. 2020. № 3(88). С. 30–35. DOI:10.22184/2070-8963.2020.88.3.30.35
14. Фокин Г.А. Эволюция процедур позиционирования в сетях подвижной радиосвязи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 1. С. 76–89. DOI:10.31854/2307-1303-2020-8-1-74-86
15. Фокин Г.А. Процедуры позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2021. № 11. С. 2–8.
16. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е. Сетевое позиционирование в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 9. С. 51–58. DOI:10.34832/ELSV.2020.10.9.006
17. Фокин Г.А. Использование методов сетевого позиционирования в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 11. С. 29–37. DOI:10.34832/ELSV.2020.12.11.002
18. Кучерявый А.Е., Бородин А.С., Мутханна А.С.А., Абделлах А.Р., Волков А.Н. Искусственный интеллект в сетях связи // X Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании»: сборник научных статей в 4 томах (Санкт-Петербург, Россия, 24–25 февраля 2021). СПб: СПбГУТ, 2021. С. 8–18.
19. Бородин А.С., Волков А.Н., Мутханна А.С.А., Кучерявый А.Е. Искусственный интеллект в сетях связи пятого и последующих поколений // Электросвязь. 2021. № 1. С. 17–22. DOI:10.34832/ELSV.2021.14.1.001
20. Фокин Г.А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. Дис. ... докт. техн. наук. СПб: СПбГУТ, 2021. 499 с.
21. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования. СПб.: СПбГУТ, 2020. 558 с.
22. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования 5G. М.: Горячая Линия – Телеком, 2021. 456 с.
23. Zekavat R., Buehrer R.M. Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances. Hoboken: John Wiley & Sons, 2019. 1376 p.
24. Campos R.S., Lovisolo L. RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools. Artech House, 2015. 369 p.
25. Sand S., Dammann A., Mensing C. Positioning in Wireless Communications Systems. Wiley, 2014. 276 p.
26. 3GPP TS 38.211 V17.1.0 (2022-03). NR; Physical channels and modulation (Release 17).
27. 3GPP TS 38.215 V17.1.0 (2022-03). NR; Physical layer measurements (Release 17).

28. 3GPP TR 22.872 V16.1.0 (2018-09). Study on positioning use cases; Stage 1 (Release 16).
29. 3GPP TR 38.855 V16.0.0 (2019-03). Study on NR positioning support (Release 16).
30. 3GPP TS 38.305 V17.0.0 (2022-03). NG-RAN; Radio Access Network (NG-RAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in NG-RAN (Release 17).
31. 3GPP TS 38.455 V17.0.0 (2022-04). NG-RAN; NR Positioning Protocol A (NRPPa) (Release 17).
32. Fischer S. Observed Time Difference of Arrival (OTDOA) Positioning in 3GPP LTE. Qualcomm White Pap. 2014. 62 p.
33. 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.
34. 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.
35. 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.
36. LTE Toolbox. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/lte.html> (дата обращения 04.07.2022)
37. Time Difference of Arrival Positioning Using PRS. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/lte/ug/time-difference-of-arrival-positioning-using-prs.html> (дата обращения 04.07.2022)
38. 5G Toolbox. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/5g.html> (дата обращения 04.07.2022)
39. NR Positioning Reference Signal. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ug/5g-new-radio-prs.html> (дата обращения 04.07.2022)
40. NR Positioning Using PRS. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ug/nr-prs-positioning.html> (дата обращения 04.07.2022)
41. Черняк В.С., Заславский Л.П., Осипов Л.В. Многопозиционные радиолокационные станции и системы // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. Т. 1. С. 9–69.
42. Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993. 416 с.
43. Черняк В.С. Многопозиционные радиолокационные системы на основе ММО РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2012. № 8. С. 29–47.

References

1. Kanhere O., Rappaport T.S. Position Location for Futuristic Cellular Communications: 5G and Beyond. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(1):70–75. DOI:10.1109/MCOM.001.2000150
2. Dwivedi S., Shreevastav R., Munier F., Nygren J., Siomina I., Lyazidi Y., et al. Positioning in 5G Networks. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(11):38–44. DOI:10.1109/MCOM.011.2100091
3. Bartoletti S., Chiaraviglio L., Fortes S., Kennouche T.E., Solmaz G., Bernini G., et al. Location-Based Analytics in 5G and Beyond. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(7):38–43. DOI:10.1109/MCOM.001.2001096
4. Goztepe C., Büyükçorak S., Kurt G.K., Yanikomeroglu H. Localization Threats in Next-Generation Wireless Networks. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(9):51–57. DOI:10.1109/MCOM.010.2001150
5. Bartoletti S., Wymeersch H., Mach T., Brunnegård O., Giustiniano D., Hammarberg P., et al. Positioning and Sensing for Vehicular Safety Applications in 5G and Beyond. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(11):15–21. DOI:10.1109/MCOM.011.2100339
6. Conti A., Morselli F., Liu Z., Bartoletti S., Mazuelas S., Lindsey W.C., et al. Location Awareness in Beyond 5G Networks. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(11):22–27. DOI:10.1109/MCOM.221.2100359
7. Albanese A., Sciancalepore V., Costa-Pérez X. First Responders Got Wings: UAVs to the Rescue of Localization Operations in Beyond 5G Systems. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(11):28–34. DOI:10.1109/MCOM.101.2100273
8. Ferre R.M., Seco-Granados G., Lohan E.S. Positioning Reference Signal design for positioning via 5G. *National Committee for Radiology in Finland*. 2019.
9. Grewal M.S., Andrews A.P., Barton C.G. *Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Wiley, 2020. 608 p.
10. Fokin G.A. Scenarios for Positioning in 5G Networks. *Vestnik svyazi*. 2020;2:3–9. (in Russ.)
11. Fokin G.A. Scenarios for Positioning in 5G Networks. *Vestnik Svyaz*. 2020;3:13–21. (in Russ.)
12. Fokin G. Evolution of Positioning Technologies in Cellular Mobile Radio Networks. Part 1. *Last Mile*. 2020;2(87):32–39. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2020.87.2.32.38
13. Fokin G. Evolution of Positioning Technologies in Cellular Mobile Radio Networks. Part 2. *Last mile*. 2020;3(88):30–35. (in Russ.) DOI:10.22184/2070-8963.2020.88.3.30.35
14. Fokin G.A. Evolution of positioning procedures in mobile radio networks. *Telecom IT*. 2020;8(1):76–89. (in Russ.) DOI:10.31854/2307-1303-2020-8-1-74-86
15. Fokin G.A. Procedures for Positioning in 5G Networks. *Vestnik svyazi*. 2021;11:2–8. (in Russ.)
16. Fokin G.A., Koucheryavy A.E. Network positioning in the 5G ecosystem. *Elektrosvyaz*. 2020;9:51–58. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2020.10.9.006
17. Fokin G.A. Utilization of Network Positioning Methods in the 5G Ecosystem. *Elektrosvyaz*. 2020;11:29–37. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2020.12.11.002
18. Koucheryavy A.E., Borodin A., Mutkhanna A., Abdellah A.R., Volkov A.N. Artificial Intelligence for Telecommunication Networks. *Proceedings of the Xth International Conference on Infotelecommunications in Science and Education, 24–25 February 2021, St. Petersburg, Russian Federation*. St. Petersburg: Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2021. p.8–18. (in Russ.) (in Russ.)


19. Borodin A.S., Volkov A.N., Mutkhanna A.S.A., Kucheryavyy A.E. Artificial Intelligence for Telecommunication Networks. *Elektrosvyaz*. 2021;1:17–22. (in Russ.) DOI:10.34832/ELSV.2021.14.1.001
20. Fokin G.A. *A Set of Models and Methods for Positioning Devices in Fifth-Generation Networks*. D.Sc Thesis. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2021. 499 p. (in Russ.)
21. Fokin G.A. *Technologies of Network Positioning*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич State University of Telecommunications Publ.; 2020. 558 p. (in Russ.)
22. Fokin G.A. *5G Network Positioning Technologies*. Moscow: Hot Line - Telecom Publ.; 2021. 456 p. (in Russ.)
23. Zekavat R., Buehrer R.M. *Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances*. Hoboken: John Wiley & Sons; 2019. 1376 p.
24. Campos R.S., Lovisolio L. *RF Positioning: Fundamentals, Applications, and Tools*. Artech House; 2015. 369 p.
25. Sand S., Dammann A., Mensing C. *Positioning in Wireless Communications Systems*. Wiley; 2014. 276 p.
26. 3GPP TS 38.211 V17.1.0 (2022-03). NR; Physical channels and modulation (Release 17).
27. 3GPP TS 38.215 V17.1.0 (2022-03). NR; Physical layer measurements (Re-lease 17).
28. 3GPP TR 22.872 V16.1.0 (2018-09). Study on positioning use cases; Stage 1 (Release 16).
29. 3GPP TR 38.855 V16.0.0 (2019-03). Study on NR positioning support (Re-lease 16).
30. 3GPP TS 38.305 V17.0.0 (2022-03). NG; Radio Access Network (NG-RAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in NG-RAN (Release 17).
31. 3GPP TS 38.455 V17.0.0 (2022-04). NG-RAN; NR Positioning Protocol A (NRPPa) (Release 17).
32. Fischer S. *Observed Time Difference of Arrival (OTDOA) Positioning in 3GPP LTE*. Qualcomm White Pap. 2014. 62 p.
33. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Alodkhari A.H., Fedorenko I.V. Synthesis of Multi-Position Signals for Space Television. *Voprosy radioelektroniki Seriya Tekhnika teledeniia*. 2017;2:86–93. (in Russ.)
34. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Alodkhari A.H., Fedorenko I.V. Investigation of the Dependence of the Value of the Geometric Factor of Reduction of Accuracy from the Topology of Reception Points. *Voprosy radioelektroniki Seriya Tekhnika teledeniia*. 2018;2:99–104. (in Russ.)
35. Dvornikov S.V., Fokin G.A., Alodkhari A.H., Fedorenko I.V. Positioning of Mobile TV Systems on Reference Signals in LTE Networks. *Problems of radio electronics. Series: TV Technique*. 2017;4:94–103.
36. *LTE Toolbox. MathWorks*. URL: <https://www.mathworks.com/products/lte.html> [Accessed 17th June 2022]
37. *Time Difference of Arrival Positioning Using PRS. MathWorks*. URL: <https://www.mathworks.com/help/lte/ug/time-difference-of-arrival-positioning-using-prs.html> [Accessed 17th June 2022]
38. *5G Toolbox. MathWorks*. URL: <https://www.mathworks.com/products/5g.html> [Accessed 17th June 2022]
39. *NR Positioning Reference Signal. MathWorks*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ug/5g-new-radio-prs.html> [Accessed 17th June 2022]
40. *NR Positioning Using PRS. MathWorks*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ug/nr-prs-positioning.html> [Accessed 17th June 2022]
41. Chernyak V.S., Zaslavsky L.P., Osipov L.V. Multi-Position Radar Stations and Systems. *Foreign radioelectronics*. 1987;1: 9–69. (in Russ.)
42. Chernyak V.S. *Multi-Position Radar*. M.: Radio i sviaz Publ.; 1993. 416 p. (in Russ.)
43. Chernyak V.S. Multi-Position Radar Systems Based on MIMO Radar. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*. 2012;8: 29–47. (in Russ.)

Статья поступила в редакцию 21.05.2022; одобрена после рецензирования 17.06.2022; принята к публикации 20.06.2022.

The article was submitted 21.05.2022; approved after reviewing 17.06.2022; accepted for publication 20.06.2022.

Информация об авторе:

ФОКИН
Григорий Алексеевич

доктор технических наук, доцент, доцент кафедры радиосвязи и вещания
Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0002-5358-1895>