

ЭВОЛЮЦИЯ РАДИОИНТЕРФЕЙСОВ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В СЕТЯХ ПОДВИЖНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Г. А. Фокин*

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

*Адрес для переписки: grihafokin@gmail.com

Аннотация—В настоящей работе анализируются особенности эволюции радиоинтерфейсов сотовых систем подвижной радиосвязи 2G–4G с точки зрения решения задач сетевого позиционирования. Анализ показывает, что вместе с совершенствованием параметров сигналов позиционирования, появлялись и специальные механизмы их формирования, обработки и повторного использования в разных сотах, что способствовало повышению точности сбора первичных измерений. **Предмет исследования.** Статья посвящена обзору эволюционного развития технологий физического уровня сетей подвижной радиосвязи второго, третьего и четвертого поколений для решения задач определения местоположения средствами сетевой инфраструктуры. **Метод.** Сопоставительный анализ методов и средств сетевого позиционирования, проведенный в ходе обзора эволюции радиоинтерфейсов 2G–4G, позволил выявить тенденции совершенствования технологий определения местоположения. **Основные результаты.** Результатом анализа является обоснование необходимости совершенствования механизмов повторного использования специальных сигналов позиционирования. **Практическая значимость.** Проиллюстрирована необходимость адаптации механизмов формирования, приема и обработки специальных сигналов позиционирования для сценариев сверхплотного территориального распределения радиостанций при планировании сетей радиодоступа 5G.

Ключевые слова—Позиционирование, сеть радиодоступа, базовая станция, абонентский терминал, 1G, 2G, 3G, 4G, PRS, GSM, UMTS, LTE.

Информация о статье

УДК 621.396.969.36

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 05.04.20, принята к печати 15.06.20.

Ссылка для цитирования: Фокин Г. А. Эволюция радиоинтерфейсов позиционирования в сетях подвижной радиосвязи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 2. С. 77–91. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-77-91.

EVOLUTION OF POSITIONING RADIO INTERFACES IN MOBILE RADIO NETWORKS

G. Fokin*

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

*Corresponding author: grihafokin@gmail.com

Abstract—In this paper, we analyze the evolutionary features of the radio interfaces of cellular 2G–4G mobile radio systems from the point of view of solving network positioning problems. The analysis shows that along with the improvement of the parameters of positioning signals, special mechanisms appeared for their formation, processing and reuse in different cells, which contributed to increasing the accuracy of the collection of primary measurements.

Keywords—Positioning, radio access network, base station, subscriber terminal, 1G, 2G, 3G, 4G, PRS, GSM, UMTS, LTE.

Article info

Article in Russian.

Received 05.04.20, accepted 15.06.20.

For citation: Fokin G.: Evolution of Positioning Radio Interfaces in Mobile Radio Networks // Telecom IT. 2020. Vol. 8. Iss. 2. pp. 77–91 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-2-77-91.

Введение

На протяжении последних сорока лет эволюционное развитие сотовых сетей подвижной радиосвязи (СПРС) способствовало совершенствованию не только основных услуг передачи речи и данных, но и дополнительных возможностей определения местоположения (ОМП) абонентских устройств, что, в свою очередь, на рубеже очередной декады позволяет говорить об оформлении нового направления – технологий сетевого позиционирования.

Решение задачи определения местоположения посредством инфраструктуры СПРС осуществляется за счет оборудования сетей радиодоступа (СРД), а также инфраструктуры ядра сети; первичные измерения собираются базовыми станциями (БС) СРД; обработка первичных измерений, как правило, осуществляется в ядре сети. В сетях подвижной радиосвязи первого поколения с частотным разделением каналов FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) в качестве первичных измерений могли выступать уровни мощности принимаемого сигнала. В СПРС 2G с частотно-временным разделением каналов FDMA/TDMA (*Time Division Multiple Access*) в качестве первичных измерений уже можно было использовать временные параметры прихода сигнала. В сетях подвижной радиосвязи третьего поколения с кодовым разделением каналов CDMA (*Code-Division Multiple Access*) возможности измерения параметров времени прихода сигналов существенно возросли за счет корреляционных свойств используемых широкополосных сигналов [1, 2]. В сетях подвижной радиосвязи четвертого поколения с множественным доступом на основе ортогонального частотного разделения

OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) были введены специальные сигналы позиционирования, а техническая реализация технологий сетевого ОМП была специфицирована документами партнерского проекта 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) [3, 4]. В перспективных сетях пятого поколения технологии сетевого позиционирования и реализуемые на их основе услуги геолокации устройств рассматриваются как один из важных механизмов цифровой экономики [5, 6]. Дополнительный интерес к вопросам сетевого позиционирования в перспективных сетях 5G обусловлен следующими факторами развития сетей, услуг и технологий:

- а) интернета вещей высокой плотности [7];
- б) тактильного интернета [8];
- в) дополненной реальности [9];
- г) толерантных к задержкам [10];
- д) прямой связи между устройствами D2D [11];
- е) кластеризации D2D-устройств [12];
- ж) самоорганизующихся сетей [13], в том числе на основе радиостанций с направленными антеннами [14, 15].

Таким образом, есть все основания полагать, что сетевое позиционирование устройств в экосистеме 5G будет уже не одной из дополнительных услуг, а важной составляющей построения и функционирования сети радиодоступа [16].

Рассматриваемое сетевое позиционирование устройств в СПРС, являющихся источниками радиоизлучения (ИРИ) в СРД, в терминах теории радиолокации можно рассматривать как ОМП в многопозиционных системах пассивной радиолокации (МПСПР), когда множество позиций представлено базовыми станциями (БС) СРД, являющимися пунктами приема (ПП) первичных измерений. Позиционирование ИРИ в МПСПР осуществляется по измерениям на пространственно разнесенных ПП времени прихода, направления прихода или доплеровских сдвигов сигналов, излучаемых ИРИ. Наиболее распространенными пассивными измерениями являются гиперболические, или разностно-дальномерные (РДМ) и угломерные (УМ) измерения. Задача позиционирования может решаться сразу в процессе совместной обработки принимаемых в МПСПР сигналов. Однако принято рассматривать двухэтапную процедуру: на первом этапе оценивают параметры принятых от ИРИ сигналов, т. е. первичные измерения, связанные с каждой позицией ПП (дальность, пеленг) или парой позиций ПП (разность дальностей); на втором этапе по этим измерениям выполняют оценку пространственных координат ИРИ.

Возможности сбора и обработки первичных измерений, а также результирующая точность оценок пространственных координат при вторичной обработке непосредственно связаны с используемыми в СПРС радиointерфейсами, поэтому целью настоящего обзора является анализ эволюции радиointерфейсов, используемых для сетевого позиционирования в СПРС 2G–4G, а также оценка тенденций их совершенствования в сетях 5G.

Радиointерфейсы для позиционирования в сетях 2G–4G

Несмотря на то, что СПРС начиная с 1G, создавались в первую очередь для организации услуг подвижной радиосвязи, в них также могла быть реализована возможность ОМП мобильных АТ.

СПРС 1G, такие как AMPS, NMT, появились в 1980-х годах и имели аналоговый узкополосный радиointерфейс. Стандарты 1G не предусматривали процедур позиционирования абонентов, однако в процессе функционирования выяснилось, что ОМП может повысить эксплуатационные показатели сети за счет управления мобильностью; например, для идентификации соты, в которой в данный момент находится абонент, выделения канальных ресурсов, организации хэндовера и др. Технические возможности позиционирования реализовывалось преимущественно на основе измерений RSSI (*Received Signal Strength Indicator*). В этом методе на БС производится измерение уровня или амплитуды сигнала, переданного АТ. Поскольку уровень уменьшается с увеличением расстояния, то, измеряя его, можно судить об удалении АТ от БС. В городе условия PPB далеки от прямой видимости и метод RSSI становится малопригодным, однако он успешно может быть использован в комбинации с другими методами.

СПРС 2G цифрового стандарта GSM стали разворачиваться с 1990-х годов. Радиointерфейс GSM основан на частотно-временном разделении каналов TDMA/FDMA и гауссовой манипуляции с минимальным сдвигом GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*). Частотное разделение каналов реализуется разделением выделенного ресурса на частотные каналы шириной по 200 кГц, в каждом из которых организуются 8 каналов с временным разделением: TDMA кадр в GSM делится на восемь временных интервалов (ВИ) периодом 576,9 мкс (рис. 1) [1].

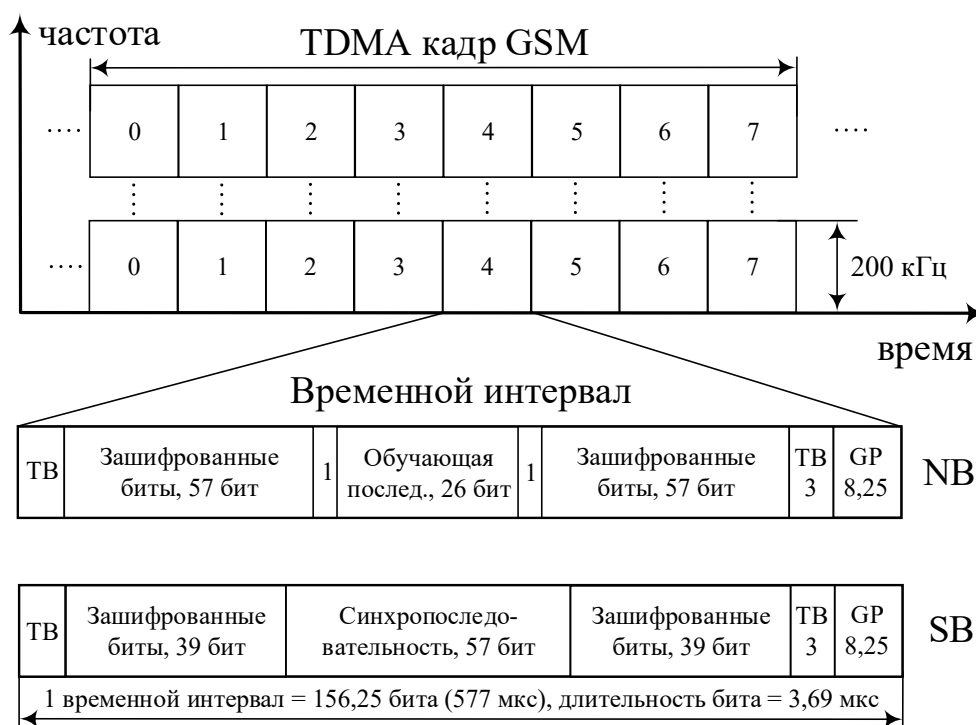


Рис. 1. Структура временного интервала TDMA кадра GSM

Скорость передачи на радиointерфейсе GSM равна 270,833 кбит/с; при емкости кадра 156,25 бит длительность ВИ получится равной $156,25/270,833 \sim 3,69$ мкс. Для сбора первичных измерений может использоваться

как нормальный временной интервал (ВИ) NB (*Normal Burst*), так и ВИ синхронизации SB (*Synchronization Burst*). Обучающая последовательность TS (*Training Sequence*) из 26 бит за счет вычисления корреляции позволяет оценить временную задержку прихода сигнала, которая затем может быть пересчитана в дальность.

В радиointерфейсе СПРС 2G GSM специальной поддержки технологий позиционирования все еще не было. Были реализованы лишь два механизма синхронизации для управления радиоресурсами. В GSM фазе 1 была реализована синхронизация передач АТ по параметру времени оборота RTT (*Round Trip Time*), которая позволяла оценить упреждение передачи ТА (*Timing Advance*) в канале «вверх» UL. В GSM фазе 2 был реализован механизм OTD (*Observed Time Difference*) для оценки рассинхронизации между БС. Возможности использования представленных механизмов в задачах позиционирования были ограничены используемыми для этого пакетами NB и SB. Разрешение ТА определяется временем передачи бита; если $RTT = 3,69$ мкс, точность, с которой можно оценить удаление, равна $d = RTT/2 \cdot c \sim 550$ м.

СПРС 3G стандарта UMTS были разработаны организацией 3GPP и стали разворачиваться с 2000-х годов. Радиointерфейс UMTS основан на широкополосном многостанционном доступе с кодовым разделением WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) с шириной канала 5 МГц. Общий пилотный канал CPICH (*Common Pilot Channel*) является немодулированным кодовым каналом, который использует уникальный для каждой БС код и служит, в том числе, для установления размеров сот БС (рис. 2) [2].

Длительность чипа при скорости передачи 3,84 Мчип/с равна 0,26 мкс, поэтому точность дальномерных измерений в UMTS имеет порядок 78 м ($3,0 \cdot 10^8$ м/с 0,26 мкс). Если разница многолучевых компонент составляет 0,26 мкс, то приемник WCDMA сможет разделить и сложить их когерентно.

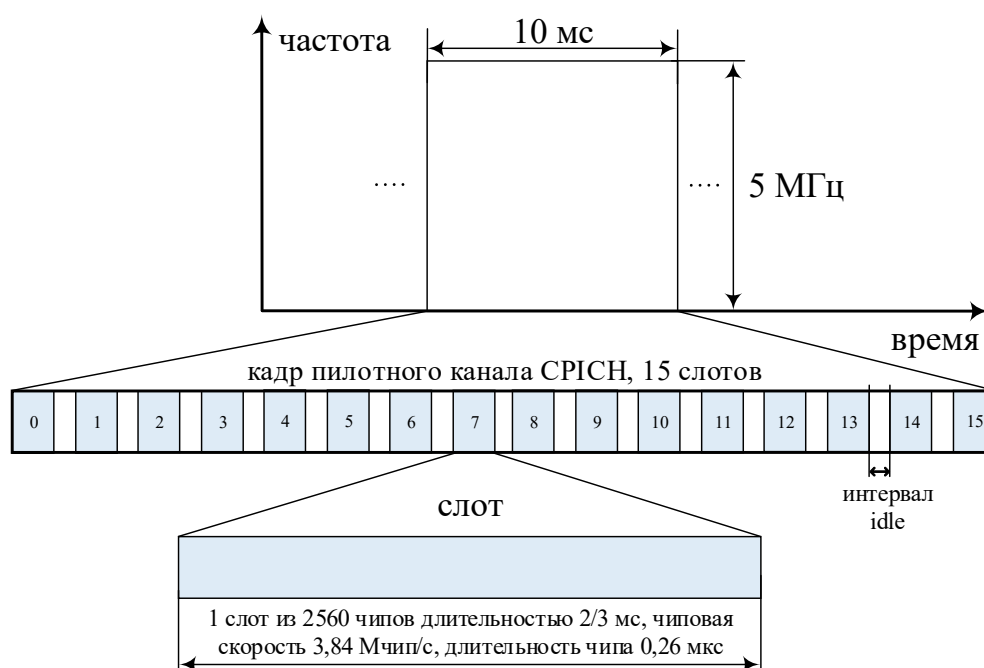


Рис. 2. Структура слота кадра UMTS канала CPICH

СПРС 4G стандарта LTE (*Long Term Evolution*) разработаны организацией 3GPP и стали разворачиваться с 2010-х годов. Радиоинтерфейс LTE основан на доступе с ортогональным частотным мультиплексированием OFDMA (*Orthogonal frequency-division multiple access*) в DL. В UL, где излучаемая мощность значительно ниже, работает одночастотная технология SC-FDMA (*Single-carrier FDMA*), которая обеспечивает энергоэффективность AT. Сигналы в нисходящем и восходящем каналах могут занимать полосы шириной от 1,4 до 20 МГц и различаются числом ресурсных блоков (РБ). РБ организованы в кадры длительностью 10 мс, которые разделяются на 20 слотов длительностью $T = 15\,360 \cdot T_s = 0,5$ мс, где T_s – элементарный временной интервал. Разделение частотного ресурса выполняется ресурсными блоками (РБ); при этом ширина полосы частот РБ равна 180 кГц; из разнеса соседних поднесущих в 15 кГц следует, что в РБ содержится 12 поднесущих [3, 4].

Для дальномерных измерений в радиоинтерфейсе LTE предложен показатель RSTD (*Reference Signal Time Difference*) разности времен опорных сигналов¹, который определяется как наименьшая разность времен прихода подкадров от eNB в двух разных сотах. В пределах кадра различают подкадры из двух смежных слотов. Интервал измерений RSTD определяется двумя слотами в пределах одного подкадра с разрешением в T_s . Пусть $T_{\text{subframeRxj}}$ – момент начала приема подкадра eNB_j, а $T_{\text{subframeRxi}}$ – момент начала приема подкадра eNB_i, ближайший после начала приема $T_{\text{subframeRxj}}$, тогда $\text{RSTD} = T_{\text{subframeRxj}} - T_{\text{subframeRxi}}$.

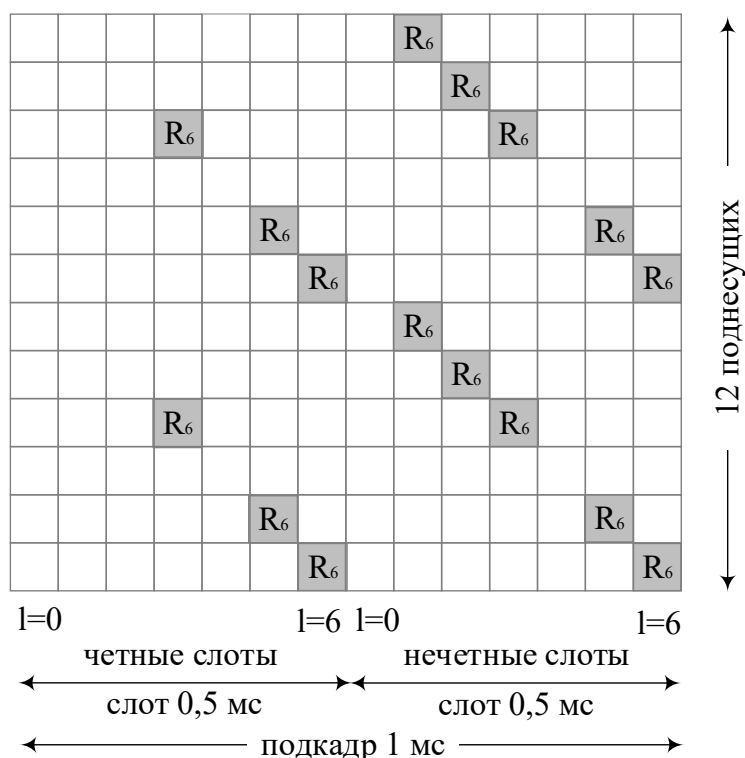


Рис. 3. Отображение сигналов PRS на частотно-временную сетку OFDM

Измерения разности времен опорных сигналов RSTD могут быть выполнены по нескольким специальным служебным сигналам канала вниз, в том числе, по специальным пилотным сигналам сот CRS (*Cell specific Reference Signals*), первичным PSS (*Primary Synchronization Signal*) и вторичным SSS (*Secondary Synchronization Signal*) сигналам синхронизации. Недостатком данных первичных измерений является то, что при их одновременном приеме неизбежными оказываются внутрисистемные помехи, которые могут существенно снизить качество первичных измерений. Например,

¹ 3GPP TS 36.214. Physical layer; Measurements. Rel. 15, V15.4.0, Sep. 2019.

надежный радиоприем сигналов CRS, PSS и SSS осуществляется при отношении сигнал/(шум+помехи) $SINR > -6 \text{ дБ}^2$, однако для одновременного обнаружения сигналов от нескольких БС в канале вниз этого условия уже оказывается недостаточно. Сбор RSTD от нескольких территориально-распределенных eNB согласно 9-му релизу LTE осуществляется с использованием специальных опорных сигналов позиционирования PRS (*Positioning Reference Signal*), которые используют псевдослучайную последовательность, модулированную сигналом ФМ-4 (QPSK, *Quadrature Phase Shift Keying*) с последующим отображением на частотно-временную сетку LTE с расположением ресурсных элементов по диагонали со сдвигами по поднесущим и OFDM-символам для избежания взаимного влияния с сигналами CRS. Сигналы PRS передаются с антенного порта 6, который определен как логический канал; отображение логического канала антенного порта на физическую антенну определяется БС (рис. 3).

На рис. 3 показан пример организации ресурсных блоков в элементы частотно-временной сетки для случая нормального ЦП и варианта конфигурации 1 и 2 антенных портов физического канала передачи вещательной информации PBCH (*Physical Broadcast Channel*) при передаче комплексных модулированных сигналов PRS [17].

Показанные на рис. 3 ресурсные блоки LTE представляет собой элементы с индексом k в частотном домене и индексом l во временном домене. Ресурсные элементы, помеченные индексом R_6 , транслируют сигналы PRS внутри РБ из 12 поднесущих и 14 OFDM-символов. Частотный сдвиг для каждой соты определяется как $v_{\text{shift}} = N^{\text{Cell ID}} \bmod 6$; таким образом, коэффициент повторного использования частот для сигналов PRS равен 6, т. е. всего может быть 6 частотных сдвигов (6 разных диагональных отображений сигналов PRS на частотно-временной ресурсной сетке). Сигналы PRS передаются в определенном порядке группами по N_{PRS} подкадров с периодичностью следования T_{PRS} подкадров. Параметр T_{PRS} определен в [3GPP TS 36.211. Physical channels and modulation. Rel. 15, V15.7.0, Sep. 2019] и может принимать значения 160, 320, 640, а $N_{\text{PRS}} - 1, 2, 4$, или 8. Пример PRS при $N_{\text{PRS}} = 4$ представлен на рис. 4.



Рис. 4. Порядок передачи и конфигурация подкадров PRS

Передача PRS ведется с уникальными для соты сдвигами Δ_{PRS} , которые отсчитываются от начала передачи $SFN = 0$. Параметры T_{PRS} и Δ_{PRS} определяются индексом I_{PRS} конфигурации PRS (табл. 1) [5].

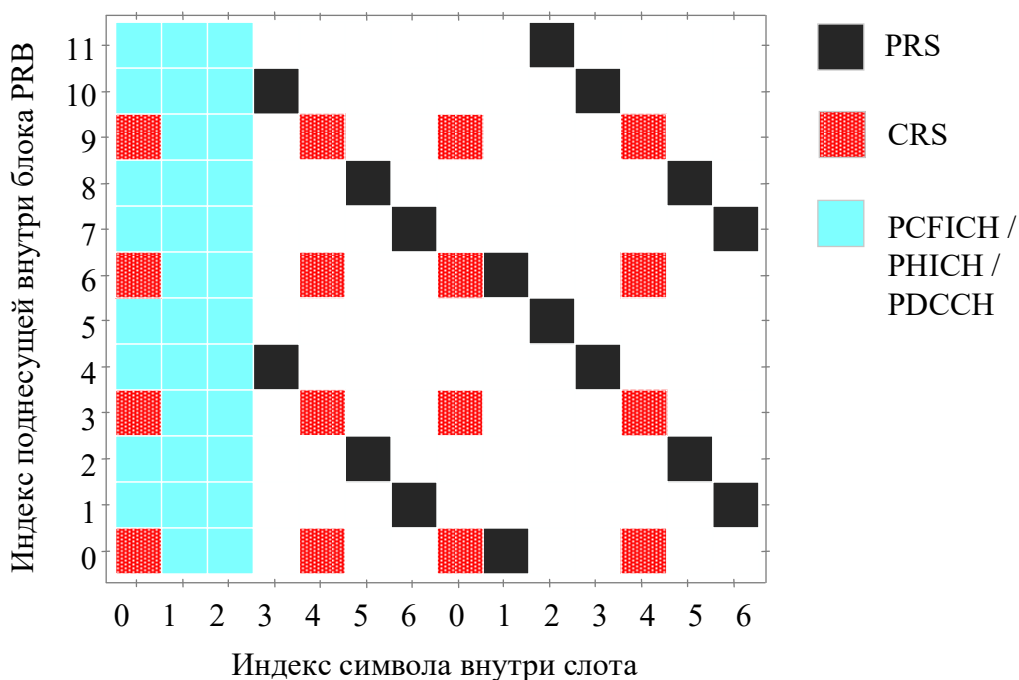
² 3GPP TS 36.133. Requirements for support of radio resource management. Rel.16, V16.3.0, Sep. 2019.

Таблица 1.

Индекс конфигурации сигналов PRS

Индекс PRS I_{PRS}	Период подкадров PRS T_{PRS}	Сдвиг подкадров PRS Δ_{PRS}
0 – 159	160	I_{PRS}
160 – 479	320	$I_{PRS} - 160$
480 – 1119	640	$I_{PRS} - 480$
1120 – 2399	1280	$I_{PRS} - 1120$
2400 – 4095	Зарезервировано	

В идеально синхронизированной сети сигналы PRS одной соты интерферируют с сигналами PRS другой соты тогда, когда шаблон подкадров PRS этих сот совпадают, т. е. при равенстве параметра частотного сдвига $v_{\text{shift}} = N^{\text{Cell ID}} \bmod 6$. На рис. 5 представлен пример подкадра PRS со сдвигом $v_{\text{shift}} = 1$: в не закрашенных элементах ничего не передается.

Рис. 5. Пример подкадра PRS LIS со сдвигом $v_{\text{shift}} = 1$ для 1-го антенного порта PBCH

Транслируемые сигналы PRS передаются с постоянной мощностью. Для повышения надежности приема опорных сигналов позиционирования возможны сценарии, когда выполняется отключения сигналов PRS, при этом UE принимает сильный сигнал PRS от обслуживающей базовой станции, и не «слышит» слабый сигнал позиционирования от соседней БС (излучаемый с тем же частотным сдвигом v_{shift}). Сбор первичных измерений от соседней БС станет возможен тогда, когда сигнал PRS обслуживающей БС будет отключен. Периодичность отключения групп подкадров PRS определяется параметром T_{REP} , который измеряется числом

последовательных групп подкадров PRS и может принимать значения 2, 4, 8, или 16^3 .

Для отключения используется команда-строка из 2, 4, 8, или 16 бит, в зависимости от показателя T_{REP} ; бит в команде-строке определяет передачу (1) или же отключение (0) сигнала PRS. Первый бит в команде-строке отключения соответствует первой группе подкадров PRS, которая следует за меткой SFN = 0. Пример отключения в команде-строке 1 100 для $T_{REP} = 4$ представлен на рис. 6а. Пример отключения PRS разных сот представлен на рис. 6б; передача в 4 разных сотах синхронизирована. Порядок следования PRS в сотах с идентификаторами PCI = 0/PCI = 6 и PCI = 1/PCI = 7 совпадает, поэтому сигналы PRS данных сот будут создавать друг другу взаимные помехи. Для исключения помех во время передачи PRS от сот PCI = 0 и PCI = 1 группы подкадров PRS с аналогичным порядком следования от сот с идентификаторами PCI = 6 и PCI = 7 отключаются.

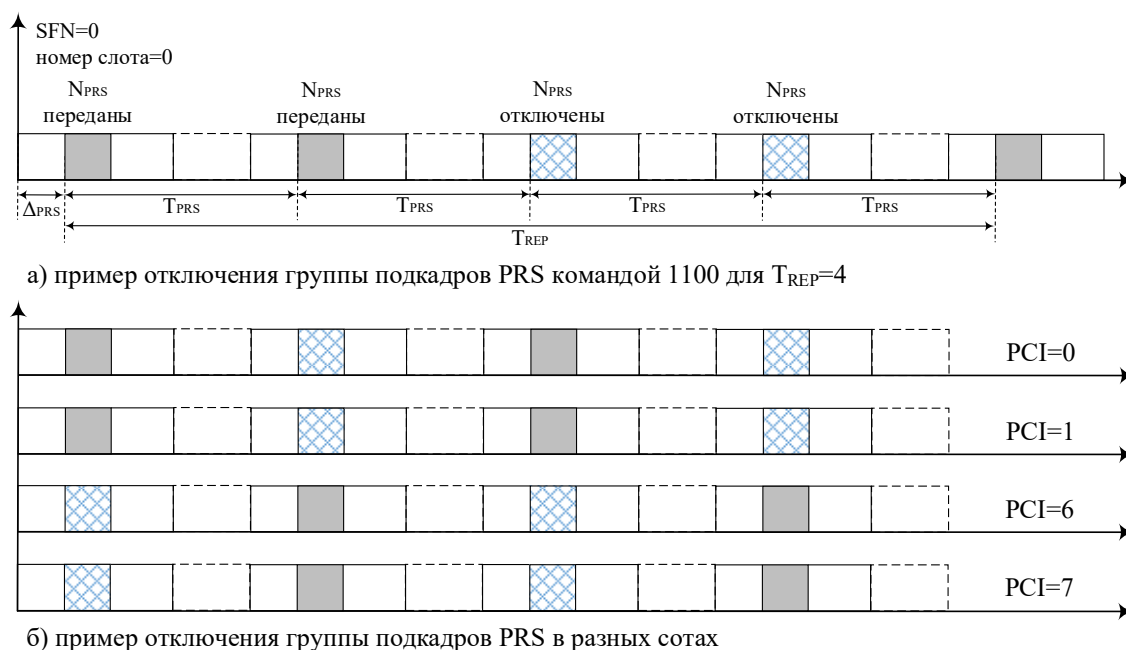


Рис. 6. Пример отключения группы подкадров PRS

Синхронизация eNB в СПРС 4G LTE является обязательной для позиционирования OTDOA. Под фазовой (временной) синхронизацией понимается наличие опорного сигнала временной метки, у которого передний фронт синхроимпульса на обоих eNB совпадает. Если погрешность синхронизации eNB от опорного источника составляет $\pm\varphi$ с, то максимальный фазовый (временной) сдвиг между двумя eNB составит 2φ с (рис. 7).

При позиционировании OTDOA фазовый сдвиг приведет к тому, что $OTDOA = GTD + RTD$ будет отличаться от GTD на $RTD = (T_i - T_j) = 2\varphi$. Для метода OTDOA сдвиг синхронизации между eNB должен быть в пределах 100 нс (0,1 мкс), для чего требуется приемник GPS⁴.

³ 3GPP TS 36.355. LTE Positioning Protocol (LPP). Rel. 15, V15.5.0, Sep. 2019.

⁴ 3GPP TS 36.211. Physical channels and modulation. Rel. 15, V15.7.0, Sep. 2019.

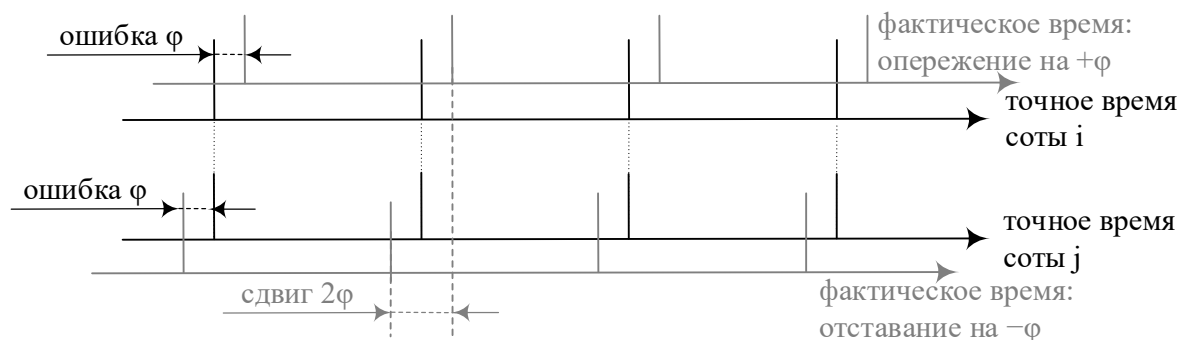


Рис. 7. Синхронизация фазы двух сот

На синхронность излучения сигналов PRS от eNB, помимо временной метки GPS, оказывает влияние тракт между приемом метки GPS и излучением сигнала PRS с антенны eNB; задержки, вносимые блоками BB (*Base Band*) и RF (*Radio Frequency*) должны быть компенсированы так, чтобы $RTD = (T_i - T_1) = 0$ (рис. 8).

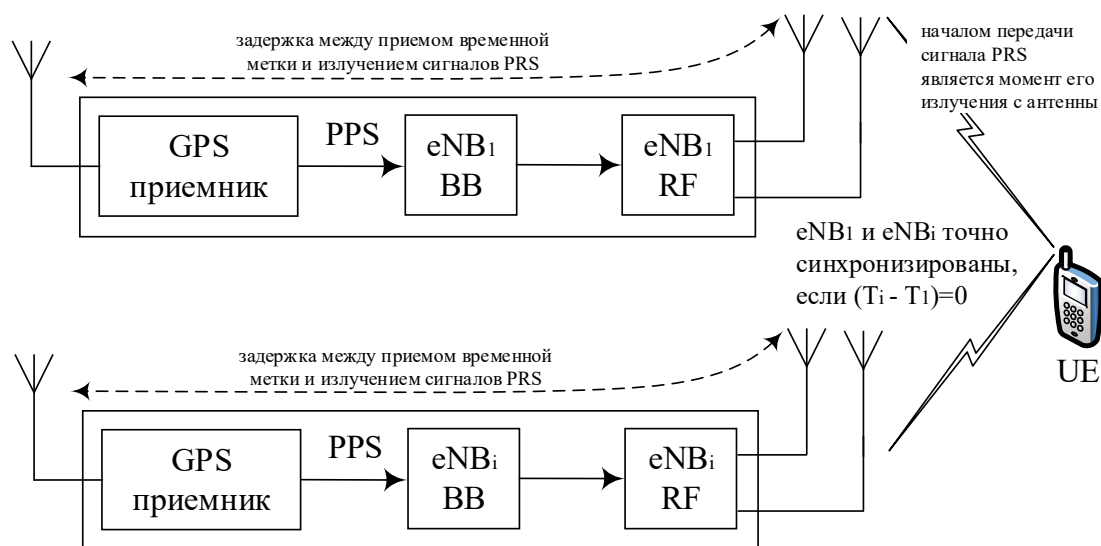


Рис. 8. Синхронизация eNB от GPS

Измерения RSTD в СПРС 4G LTE выполняются UE в режиме установленного соединения с обслуживающей БС eNB. Опорная сота i выбирается АТ. Измерения RSTD могут проводиться как от сот, которые работают на той же частоте, что и обслуживающая eNB, так и от сот, которые работают на частотах, отличных от частоты обслуживающей eNB. В первом случае опорная сота i и соседняя сота j работают на той же частоте, что и обслуживающая eNB. Во втором случае опорная сота i или же соседняя сота j работают на частоте, отличной от частоты, обслуживающей eNB. Измерения RSTD могут принимать значения в диапазоне от $-15\,391 \cdot T_s$ до $15\,391 \cdot T_s$ с разрешением в $1\, T_s$ при $|RSTD| \leq 4\,096 \cdot T_s$ и с разрешением в $5T_s$ при $|RSTD| \geq 4\,096 \cdot T_s$ ⁵. Элементарный временной интервал $T_s = 1 / (15\,000 \cdot 2\,048) = 32,552$ нс, что дает 9,7656 м.

⁵ 3GPP TS 36.133. Requirements for support of radio resource management. Rel.16, V16.3.0, Sep. 2019.

Окно поиска RSTD определяет оценку ожидаемого значения разности времен опорных сигналов и сообщается UE сервером позиционирования LS. Оценка ожидаемого значения RSTD может быть выполнена на основе предполагаемого местонахождения UE с точностью до соты по методу Cell ID; на основе этой оценки сервер позиционирования выбирает соседние соты для измерений RSTD. На основе предполагаемого местонахождения UE и соседних eNB_i , LS может вычислить расстояние между предполагаемым местонахождением UE и соседними БС eNB_i и, таким образом, оценить ожидаемое значение разности времен прихода опорных сигналов RSTD. На рис. 9 представлен пример сценария с опорной БС eNB_1 , одной соседней БС eNB_i и двумя потенциально возможными местоположениями АС UE на расстоянии r от eNB_1 в точке А (ближе к eNB_i) и В (дальше от eNB_i). Допустим, что сигнал, переданный eNB_1 в момент времени t , поступит на UE в момент времени $t_1 = t + r/c$. Пусть неточность синхронизации RTD между двумя БС eNB_1 и eNB_i составляет Δ . Тогда сигнал, переданный eNB_i в момент времени $t + \Delta$, поступит на UE в точке А в момент $t_{iA} = (t + \Delta) + (d + r)/c$, а на UE в точке В в момент $t_{iB} = (t + \Delta) + (d - r)/c$.

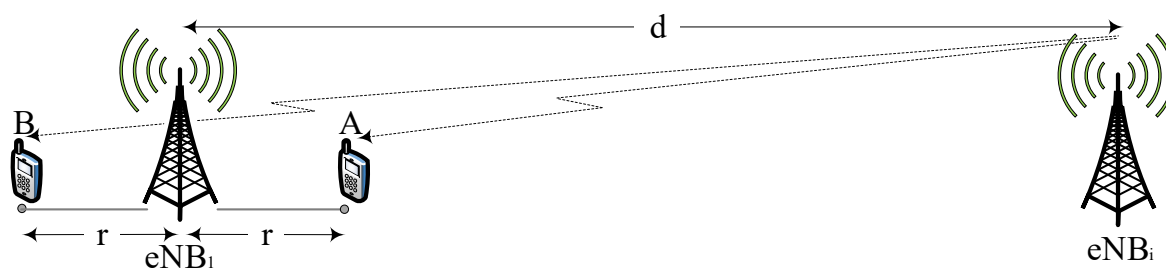
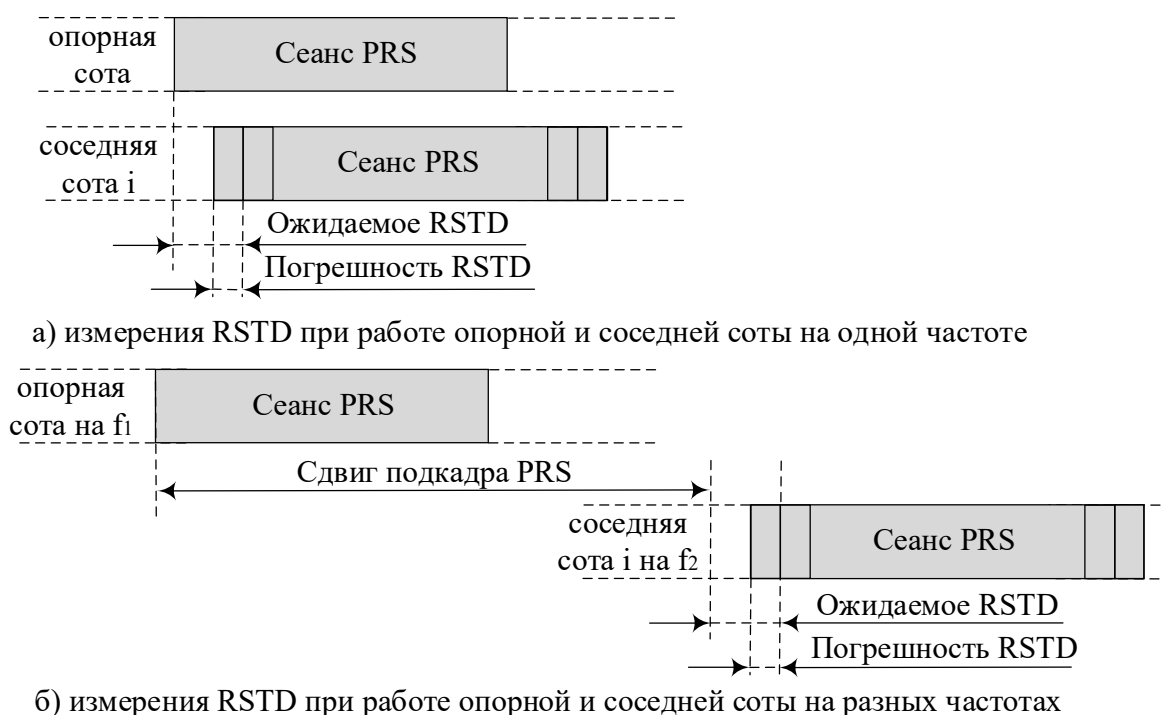


Рис. 9. Оценка окна поиска RSTD

Таким образом, разность времен прихода сигналов eNB_1 и eNB_i на UE в точке А определяется как $RSTD_{iA1} = t_{iA} - t_1 = (\Delta + d/c) - 2r/c$, а разность времен прихода сигналов с eNB_1 и eNB_i на UE в точке В определяется как $RSTD_{iB1} = t_{iB} - t_1 = (\Delta + d/c)$. Допустим опорная сота eNB_1 является обслуживающей, тогда параметр r/c может быть оценен по максимальному радиусу зоны обслуживания eNB_1 . В таком случае, окно поиска RSTD определяется выражением $[-r/c; r/c]$ с центром в $(\Delta + d/c - r/c)$. Таким образом, окно поиска RSTD определяется расстоянием r между опорной БС и искомым UE и может считаться одинаковым для всех соседних БС; расстояние r между опорной БС и искомым UE можно принять равным максимальному радиусу зоны обслуживания опорной БС. Центр окна поиска RSTD представляет собой ожидаемое значение RSTD, а размер окна поиска – ожидаемую погрешность RSTD. Ожидаемое значение RSTD μ_{RSTD} показывает разность времен опорных сигналов, измеренных UE от соседней и опорной сот. Это значение включает ожидаемую разность времен прихода сигналов и неточность синхронизации моментов излучения сигналов PRS разными БС. σ_{RSTD} показывает погрешность ожидаемого значения RSTD и сопоставима с погрешностью априорной оценки местонахождения UE с точностью до соты по методу Cell ID. Разрешение ожидаемой погрешности RSTD составляет $3 \cdot T_s$ [17]. На рис. 10, а представлено ожидаемое μ_{RSTD} и погрешность σ_{RSTD} UE при работе опорной и соседней соты на одной частоте.

Если для измерений OTDOA используются разные несущие частоты (рис. 10б), сеансы PRS на опорной и соседней сотах сдвинуты друг относительно друга на величину сдвига подкадра PRS Δ_{PRS} (сдвиг между первым подкадром PRS опорной соты на опорной частоте и первым появившимся подкадром PRS соседней соты на другой несущей частоте). UE находит начала сеанса PRS соседней соты i в пределах окна поиска RSTD $[-\sigma_{RSTD} \cdot 3 \cdot T_s; +\sigma_{RSTD} \cdot 3 \cdot T_s]$ с центром в $T_{REF} + (1m \cdot N) + (\mu_{RSTD} \cdot 3 \cdot T_s)$, где T_{REF} – время начала приема подкадра PRS опорной соты; $N = 0$, если абсолютный номер радиоканала соседней и опорной соты совпадают и $N = \Delta_{PRS}$ при работе опорной и соседней соты на разных радиоканалах.



а) измерения RSTD при работе опорной и соседней соты на одной частоте

б) измерения RSTD при работе опорной и соседней соты на разных частотах

Рис. 10. Измерения RSTD при работе соты на одной и разных частотах

Ожидаемое значение RSTD μ_{RSTD} кодируется (14-ю битами) целым числом в диапазоне от $-8\,192$ до $+8\,191$; окно поиска RSTD имеет диапазон $[-8\,192 \cdot 3 \cdot T_s; +8\,192 \cdot 3 \cdot T_s] \approx [-0,8\text{ мс}; 0,8\text{ мс}]$; это позволяет поддерживать частично синхронизированные сеансы PRS, когда максимальная погрешность частичной временной синхронизации передачи сигналов PRS от разных eNB не превышает половины подкадра, т. е. $0,5\text{ мс}$. В табл. 2⁶ представлены требования к точности измерений RSTD при SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) больше -6 дБ в своей соте (*intra*) и больше -13 дБ в соседней соте (*inter*). Требования по измерению RSTD исчисляются в интервалах дискретизации LTE $T_s = 32,55\text{ нс}$. Точность дальномерных измерений в метрах приводится для минимальной ширины сигнала PRS в ресурсном блоке шириной 180 кГц из 12 поднесущих. Требования к измерениям

⁶ 3GPP TS 36.133. Requirements for support of radio resource management. Rel.16, V16.3.0, Sep. 2019.

RSTD на частоте соседней соты ниже, так как включают аппаратную задержку на перестройку частоты.

Таблица 2.

Требования к точности измерений RSTD в 13-м релизе TS 36.133⁷

Минимальная ширина канала PRS	Точность T_s		Точность, м	
	Intra	Inter	Intra	Inter
$\geq 1,08$ МГц (6 РБ)	± 15	± 21	$\pm 146,5$	$\pm 204,9$
$\geq 2,7$ МГц (15 РБ)	± 10	± 16	$\pm 97,6$	$\pm 156,1$
$\geq 4,5$ МГц (25 РБ)	± 6	± 10	$\pm 58,6$	$\pm 97,7$
≥ 9 МГц (50 РБ)	± 5	± 9	$\pm 48,8$	$\pm 87,8$
$\geq 13,5$ МГц (75 РБ)	± 4	± 8	$\pm 39,0$	$\pm 78,1$

Заключение

Проведенный анализ эволюции радиointерфейсов для позиционирования в СПРС позволяет сделать следующие выводы:

1) со 2-го по 4-е поколение совершенствовались параметры радиосигнала, по которым производятся первичные дальномерные измерения, а именно, уменьшалась длительность элементарного временного интервала, которая позволяла оценить дальность: длительность бита GSM 3,69 мкс давала порядок точности 550 м; длительность чипа UMTS 0,26 мкс давала порядок точности 78 м; длительность временного интервала LTE 32,552 нс давала порядок точности 9,7656 м.

2) в 4-м поколении LTE были введены специальные выделенные опорные сигналы позиционирования PRS; для повышения помехоустойчивости их приема в условиях внутрисистемных помех от разных базовых станций были предусмотрены специальные механизмы формирования, повторного использования и временного отключения сигналов PRS в разных сотах.

3) для сбора и обработки первичных дальномерных измерений RSTD от территориально-распределенных БС была обоснована необходимость их синхронизации.

4) в СПРС 5G механизмы повторного использования специальных сигналов позиционирования должны учитывать сценарий сверхплотного территориального распределения радиостанций.

Литература

1. Бабков В. Ю., Цикин И. А. Сотовые системы мобильной радиосвязи. СПб.: изд-во политехнического ун-та, 2011. 425 с. ISBN 978-5-7422-2937-7.
2. Тихвинский В. О., Терентьев С. В. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS: учебное пособие. М.: Эко-Трендз, 2007. 395 с. ISBN 978-5-88405-085-3.
3. Сети стандарта LTE. Развитие технологий радиодоступа // Рыжков А. Е., Сиверс М. А., Бабкин А. С., Пыленок А. М., Трофимов А. П. СПб.: изд-во Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2015. 256 с. ISBN 978-5-89160-123-9.

⁷ То же.

4. Тихвинский В. О., Терентьев С. В., Высочин В. П. Сети мобильной связи LTE/LTE-Advanced: технологии 4G, приложения и архитектура: монография. М.: ООО «Издательский дом Медиа Паблишер», 2014. 384 с. ISBN 978-5-903650-28-6.
5. Тихвинский В. О. Сети 5G и IoT – инновационная среда для цифровой экономики России // Электросвязь. 2017. № 8. С. 18–24.
6. Тихвинский В. О. Стандартизация мобильной связи 5G как процесс создания инфраструктурной основы цифровой экономики // Электросвязь. 2018. № 12. С. 24–30.
7. Тонких Е. В., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Анализ беспроводной сети Интернета вещей высокой плотности // Электросвязь. 2020. № 1. С. 44–48.
8. Атея А. А., Мутханна А. С., Кучерявый А. Е. Интеллектуальное ядро для сетей связи 5G и тактильного интернета на базе программно-конфигурируемых сетей // Электросвязь. 2019. № 3. С. 34–40.
9. Маколкина М. А., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Моделирование движения пользователя услуги дополненной реальности // Электросвязь. 2019. № 4. С. 32–40.
10. Махмуд О. А., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Модель сети Интернета вещей как сети, толерантной к задержкам // Электросвязь. 2019. № 7. С. 43–49.
11. Бородин А. С., Кучерявый А. Е., Парамонов А. И. Особенности использования D2D-технологий в зависимости от плотности пользователей и устройств // Электросвязь. 2018. № 10. С. 40–45.
12. Хуссейн О. А., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Анализ кластеризации D2D-устройств в сетях пятого поколения // Электросвязь. 2018. № 9. С. 32–38.
13. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 160 с.
14. Бабков В. Ю., Фокин Г. А. Оценка вероятности успешного радиоприема в самоорганизующихся пакетных радиосетях на основе радиостанций с направленными антеннами // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2009. № 4 (82). С. 77–84.
15. Фокин Г. А. Управление самоорганизующимися пакетными радиосетями на основе радиостанций с направленными антеннами: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.12.04 // Фокин Григорий Алексеевич. СПб., 2009.
16. del Peral-Rosado J. A., Raulefs R., López-Salcedo J. A. and Seco-Granados G.: Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1G to 5G // in IEEE Communications Surveys & Tutorials. Vol. 20. No. 2. pp. 1124–1148, Secondquarter 2018.
17. Fischer Sven Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE // tech. rep., Qualcomm Technologies, July 2014.

References

1. Babkov V. Yu., Cikin I. A. Sotovye sistemy mobil'noj radiosvyazi. SPb.: izd-vo politekhnicheskogo un-ta, 2011. 425 s. ISBN 978-5-7422-2937-7.
2. Tihvinskij V. O., Terent'ev S. V. Upravlenie i kachestvo uslug v setyah GPRS/UMTS: uchebnoe posobie. M.: Eko-Trendz, 2007. 395 s. ISBN 978-5-88405-085-3.
3. Seti standarta LTE. Razvitie tekhnologij radiodostupa // Ryzhkov A. E., Sivers M. A., Babkin A. S., Pylenok A. M., Trofimov A. P. SPb.: izd-vo Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta telekommunikacij im. prof. M. A. Bonch-Bruevicha, 2015. 256 s. ISBN 978-5-89160-123-9.
4. Tikhvinsky V. O. LTE/LTE advanced mobile networks: 4G technologies, applications architecture. Moscow: Media publisher, 2014. 384 p. ISBN 978-5-903650-28-6.
5. Tikhvinskiy V. O. 5G and IOT networks as innovative environment of digital economy in Russia // Electrosvyaz. 2017. No. 8. pp. 18–24.
6. Tikhvinskiy V. O. 5G mobile standardization as a process of creation of digital economy infrastructure basis // Electrosvyaz. 2018. No. 12. pp. 24–30.
7. Tonkikh E. V., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Analysis of wireless high-density IoT network // Electrosvyaz. 2020. No. 1. pp. 44–48.
8. Ateya A.A., Muthanna A.S., Koucheryavy A.E. Intelligent core network for 5G and tactile internet systems based on software defined networks // Electrosvyaz. 2019. No. 3. pp. 34–40.
9. Makolkina M. A., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Augmented reality service user motion modeling // Electrosvyaz. 2019. No 4. pp. 32–40.

10. Mahmood O. A., Paramonov A. I., Koucheryavy A. Eu. Model of internet of things as a delay tolerant network // *Electrosvyaz*. 2019. No. 7. pp. 43–49.
11. Borodin A. S., Koucheryavy A. Eu., Paramonov A. I. Features of using d2d communication at various subscriber densities // *Electrosvyaz*. 2018. No. 10. pp. 40–45.
12. Hussein O. A., Paramonov A. I., Koucheryavy A. Eu. Analysis of D2D clustering in 5G network // *Electrosvyaz*. 2018. No. 9. pp. 32–38.
13. Kucheryavyj A. E., Prokop'ev A. V., Kucheryavyj E. A. *Samoorganizuyushchiesya seti*. SPb.: BHV-Peterburg, 2011. 160 s.
14. Babkov V. Yu., Fokin G. A. Ocenka veroyatnosti uspehnogo radiopriema v samoorganizuyushchihsiya paketnyh radiosetyah na osnove radiostancij s napravlennymi antennami. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer science. Telecommunications and control systems*. 2009. No. 4 (82). pp. 77–84.
15. Fokin G. A. *Upravlenie samoorganizuyushchimisiya paketnymi radiosetyami na osnove radiostancij s napravlennymi antennami: avtoreferat dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.12.04* // Fokin Grigorij Alekseevich. SPb., 2009.
16. del Peral-Rosado, J. A., Raulefs, R., López-Salcedo, J. A. and Seco-Granados, G.: Survey of Cellular Mobile Radio Localization Methods: From 1G to 5G // in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. Vol. 20. No. 2. pp. 1124–1148, Secondquarter 2018.
17. Fischer, Sven Observed time difference of arrival (OTDOA) positioning in 3GPP LTE // tech. rep., Qualcomm Technologies, July 2014.

Фокин Григорий Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, grihafokin@gmail.com
Fokin Grigoriy – Candidate of Engineering Sciences, docent, assistant professor, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, grihafokin@gmail.com