

Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Процедуры приема и обработки опорных сигналов LTE*

Г. А. Фокин, Д. Б. Волгушев

Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Аннотация:

Введение. Поиск технических решений по повышению точности позиционирования устройств с использованием инфраструктуры базовых станций существующих и проектируемых сетей сотовой радиосвязи является актуальным направлением исследований и разработок в последнее десятилетие. Интерес к сетевому позиционированию обусловлен ненадежным приемом сигналов глобальных навигационных спутниковых систем в условиях плотной городской застройки. Инструментом экспериментальной апробации технических решений являются программные и аппаратные средства технологии программно-конфигурируемого радио SDR. Настоящая работа является продолжением исследования по использованию SDR-технологии для задач сетевого позиционирования в части вопросов, касающихся приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE.

Материалы и методы. В работе приводится экспериментально апробированная последовательность процедур приема и обработки опорных сигналов LTE с целью сбора первичных разностно-дальномерных измерений для программной реализации на макете пользовательского устройства, построенного с использованием технологии программно-конфигурируемого радио SDR.

Результаты. Программная реализация представленных процедур лежит в основе SDR-макета пользовательского устройства приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE.

Обсуждение и заключения. Апробация работы SDR-макета пользовательского устройства в лабораторных условиях с SDR-макетами базовых станций, а также в полевых условиях с базовыми станциями функционирующих сетей LTE позволяет осуществлять поиск технических решений по повышению точности определения местоположения.

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

Для цитирования: Фокин Г. А., Волгушев Д. Б. Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Процедуры приема и обработки опорных сигналов LTE // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17, № 1. С. 52–65. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-1-52-65>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Фокин Г. А., Волгушев Д. Б., 2023

Статья поступила в редакцию 22.07.2022;
переработанный вариант – 30.12.2022;
принята к публикации 17.01.2023.

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

1. Введение

Объектом исследования в настоящей работе являются вопросы определения местоположения (ОМП) пользовательских устройств UE (User Equipment) в сетях подвижной радиосвязи LTE (Long Term Evolution) и в перспективе в сетях пятого поколения 5G NR (New Radio) [1–3]. Предметом исследования являются процедуры приема и обработки опорных сигналов LTE в задачах позиционирования UE [4–6]. Цель исследования заключается в отработке технических решений по сбору первичных измерений при ОМП UE в существующих и проектируемых сетях стандарта LTE и в перспективе в 5G NR для последующей программной реализации и экспериментальной апробации на SDR-макете пользовательского устройства UE. Для достижения поставленной цели на этапе программной реализации разрабатываемой подсистемы используется подход модельно-ориентированного проектирования [7, 8], а экспериментальная апробация выполняется средствами программно-конфигурируемого радио SDR (Software-Defined Radio) [9]. Настоящая работа является продолжением исследования по использованию SDR-технологии для задач сетевого позиционирования [10]. Задачей настоящей работы является алгоритмическая и методическая формализация экспериментально апробированной в лабораторных условиях последовательности процедур приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE с целью сбора первичных измерений разности времен прихода сигналов TDOA (Time Difference of Arrival) для решения задач сетевого позиционирования UE.

В открытых зарубежных источниках задача в такой постановке уже решалась в работах [11–16]. Для измерений времени прихода сигнала TOA (Time of Arrival) используются так называемые сигналы SOP (Signal of Opportunity), принимаемые SDR-макетом UE из радиозфира «на лету» [11]. Такое ОМП в зарубежных источниках называют позиционированием «по возможности» (Opportunistic Localization), когда навигационная задача решается по измерениям на основе опорных сигналов SOP, а приемному устройству не обязательно быть абонентом сети данного оператора [12]. Устройства UE, являющиеся абонентами сети данного оператора, могут использовать специальные опорные сигналы позиционирования PRS (Positioning Reference Signal) [13]. Для позиционирования «по возможности» могут использоваться следующие SOP стандарта LTE: сигналы первичной синхронизации PSS (Primary Synchronization Signal), сигналы вторичной синхронизации SSS (Secondary Synchronization Signal) и специальные опорные сигналы соты CRS (Cell Specific Reference Signal) [14]. Данные сигналы SOP сетей LTE изначально не были предназначены для навигации, поэтому для их использования в задачах сетевого позиционирования устройств «на лету» требуется выбор и обоснование специализированной структуры SDR-приемника [15].

Разрабатываемый SDR-приемник должен уметь извлекать наблюдаемые параметры первичных измерений кода, фазы несущей и доплеровского сдвига, по которым выполняется грубая и точная оценка времени прихода сигнала TOA [16]. При этом SDR-устройство приема и обработки сигналов SOP при оценке TOA должно решать свои задачи с высокой точностью и разумной вычислительной сложностью программно-аппаратной реализации.

На физическом уровне сетей LTE [17, 18] и NR (New Radio) [19] используется мультиплексирование с ортогональным частотным разделением OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Для радиоинтерфейса OFDM прием и обработка радиосигналов SOP пользовательским SDR-устройством с целью последующего позиционирования UE имеет определенную специфику, суть которой заключается в том, что задача первичных измерений времени прихода сигнала TOA решается параллельно с частотно-временной синхронизацией приемного устройства по опорным сигналам LTE, включая PSS, SSS и CRS.

Настоящая работа посвящена формализации процедур приема и обработки опорных сигналов при сборе разностно-дальномерных (РДМ, TDOA) первичных измерений SDR-макетом UE на основе результатов экспериментальной апробации в лабораторных условиях. Акцент при этом сделан не на анализ прототипов [11–16], который объективно затруднен по причине отсутствия исходных программных модулей в открытом доступе, а на формализа-

цию зарегистрированного и экспериментально апробированного авторами программного модуля, представленного ссылкой [20]. Описание лабораторного стенда будет представлено в третьей части исследования «Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Апробация приема и обработки опорных сигналов LTE».

Материал настоящей работы организован далее следующим образом. В разделе 2 выполнен краткий обзор этапов приема и обработки опорных сигналов для решения задач позиционирования пользовательских устройств SDR-макетом UE по сигналам CRS стандарта LTE на основе работ [11–16]. В разделе 3 представлена алгоритмическая и методическая формализация экспериментально апробированной в лабораторных условиях последовательности процедур приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE с целью сбора первичных измерений разности времен прихода сигналов согласно [20]. Раздел 4 содержит выводы и направления дальнейших исследований.

2. Обзор этапов приема и обработки опорных сигналов LTE

Обзор прототипов SDR-макетов приема опорных сигналов стандарта LTE в задачах сетевого позиционирования на основе работ [11–16] имеет своим результатом обоснование последовательности этапов и процедур обработки. Рис. 1 иллюстрирует структуру прототипа SDR-приемника опорных сигналов LTE для позиционирования «на лету», предложенную в [16].

На первом этапе выполняется захват радиосигнала на несущей центральной частоте f_c , его перенос в область информационных/нулевых частот (baseband) и дискретизация с частотой f_s ; захват включает грубую оценку времени прихода $\hat{t}_s(0)$ и доплеровского сдвига частоты $\hat{f}_D(0)$ для начальной кадровой синхронизации путем вычисления корреляционных функций принятого сигнала с локальными копиями опорных сигналов первичной PSS и вторичной SSS синхронизации; также на первом этапе определяется идентификатор соты Cell ID.

На втором этапе производится преобразование выборок принятого OFDM-сигнала в частотно-временную структуру кадра для последующего извлечения системных параметров из широкополосных каналов на физическом уровне LTE, включая ширину канала ΔF .

На третьем этапе осуществляется уточнение захвата и извлечение параметров времени прихода TOA τ по опорным сигналам CRS.

На четвертом этапе реализуются контуры подстройки для отслеживания кратковременных изменений времени прихода сигнала TOA $\hat{t}_s$.

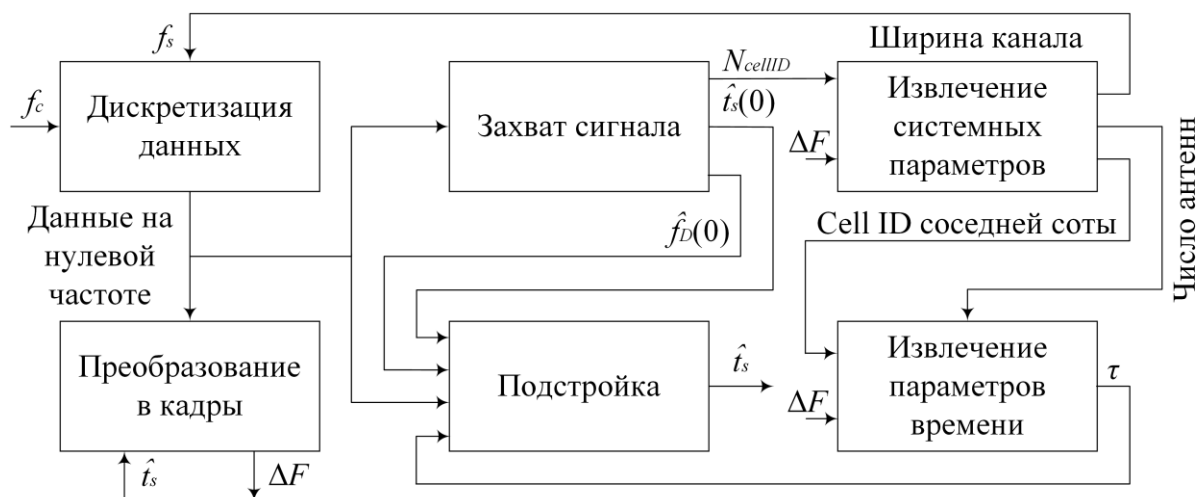


Рис. 1. Структура SDR-приемника опорных сигналов стандарта LTE

Несмотря на достаточно большое число зарубежных публикаций по тематике использования SDR-технологии для задач сетевого позиционирования в анализе, представленном в [10], а также в работах [11–16], их верификация в лабораторных и/или полевых условиях затруднена по причине отсутствия исходных программных модулей в открытом доступе.

Процедуры первого и второго этапов приема и обработки опорных сигналов являются типовыми при начальном подключении пользовательского устройства к сети связи и проиллюстрированы в примере «Cell Search, MIB and SIB1 Recovery» [21] пакета расширения LTE Toolbox. Данные процедуры реализованы исключительно с использованием специализированных встроенных функций пакета расширения LTE Toolbox. Преимуществом данного инструментария для задач радиосвязи является то, что он хорошо подходит для быстрого прототипирования и верификации работоспособности SDR-макета пользовательского устройства UE. Недостатком данного инструментария для задач сетевого позиционирования является сложность и зачастую невозможность (при разумной трудоемкости) внесения необходимых изменений в специализированные встроенные функции пакета расширения LTE Toolbox. Необходимость внесения изменений в специализированные встроенные функции обусловлена более высокой точностью измерения параметра TOA, которая требуется для задач сетевого позиционирования по сравнению с задачами радиосвязи.

Принимая во внимание данные обстоятельства, процедуры приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE в рамках проводимого исследования были реализованы из примитивных функций Matlab без использования пакета расширения LTE Toolbox [20]. Доводом в пользу данного подхода является возможность перехода к последующей аппаратной реализации функционала подсистемы приема и обработки опорных сигналов из примитивных функций на языке программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Следует отметить, что аналогичный подход в рамках проводимого исследования уже использовался ранее при разработке подсистемы формирования и передачи опорных сигналов стандарта LTE [6] и полностью оправдал себя при апробации подсистемы синхронизации нескольких eNB на физическом уровне при работе на передачу в лабораторных условиях.

Для алгоритмической и методической формализации последовательности процедур приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE в следующем разделе сделаем допущение о том, что несущая центральная частота f_c , а также ширина канала ΔF и число антенн радиоинтерфейса в данной сети связи стандарта LTE пользовательскому устройству UE заранее известна, поэтому необходимость в полной реализации процедур второго этапа по структуре, представленной на рис. 1, отпадает. В связи с этим в рамках проводимого исследования рассмотрим далее процедуры приема и обработки первого, третьего и четвертого этапов.

3. Процедуры приема и обработки опорных сигналов LTE

3.1. Последовательность процедур приема и обработки опорных сигналов LTE

Результатом процедур приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE являются первичные измерения разности времен прихода сигналов $\Delta t_{21}, \Delta t_{31}, \dots, \Delta t_{N1}$ от $i = 2, \dots, N$ базовых станций eNB_{*i*} (eNodeB) относительно одной опорной, например, eNB₁.

Допустим, что после понижающего преобразования частоты принятый в области нулевых частот (baseband) сигнал r представляет собой сумму сигналов от нескольких eNB с разными идентификаторами сот Cell ID; также предположим, что eNB работают на одной несущей частоте f_c с одинаковой шириной полосы ΔF , заранее известной SDR-макету пользовательского устройства UE. На рис. 2 представлена структурная схема последовательности процедур приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE.

В составе последовательности процедур приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE можно выделить три основных блока: блок поиска опорных сигналов LTE, блок под-

стройки к опорным сигналам LTE и блок первичных разностно-дальномерных измерений $\Delta t_{21}, \Delta t_{31}, \dots, \Delta t_{N1}, i = 2, \dots, N$. Первый блок процедур обеспечивает поиск сигналов LTE, определение Cell ID всех принимаемых базовых станций eNB, оценку грубой частотной расстройки $\hat{f}_D(0)$, а также установление границы начала кадра с точностью до отсчета для всех обнаруженных eNB, т.е. грубую оценку тактовой подстройки времени прихода сигнала TOA $\hat{t}_s(0)$. Второй блок процедур решает задачу уточнения оценок частотной $\hat{f}_D$ и тактовой $\hat{t}_s$ подстроек для опорных сигналов, обнаруженных eNB. Разности времени прихода сигналов вычисляются относительно опорной базовой станции, в роли которой выступает первая обнаруженная eNB по результатам работы грубой $\hat{t}_s(0)$ и точной $\hat{t}_s$ тактовых подстроек.

Для обнаружения сигналов eNB и определения Cell ID базовых станций используются первичный PSS и вторичный SSS сигналы синхронизации соответственно. Сигналы PSS/SSS всегда передаются в минимальной ширине полосы частот $\Delta F = 1.4$ МГц, поэтому обработка PSS/SSS ведется в отдельной ветви приемника (рис. 2), которая работает на пониженной частоте дискретизации $f_{ss} = 1.4$ МГц. Для подачи в блок поиска опорных сигналов LTE отсчеты принятого сигнала проходят через процедуру децимации в f_s / f_{ss} раз, где f_s – частота дискретизации принятого сигнала: максимальное значение $f_s = 30.72$ МГц для максимальной ширины полосы частот $\Delta F = 20$ МГц, минимальное значение частоты дискретизации $f_{ss} = 1.92$ МГц соответствует минимальной ширине полосы частот $\Delta F = 1.4$ МГц. Далее рассмотрим процедуры блока поиска опорных сигналов LTE, программно реализованные в [20].

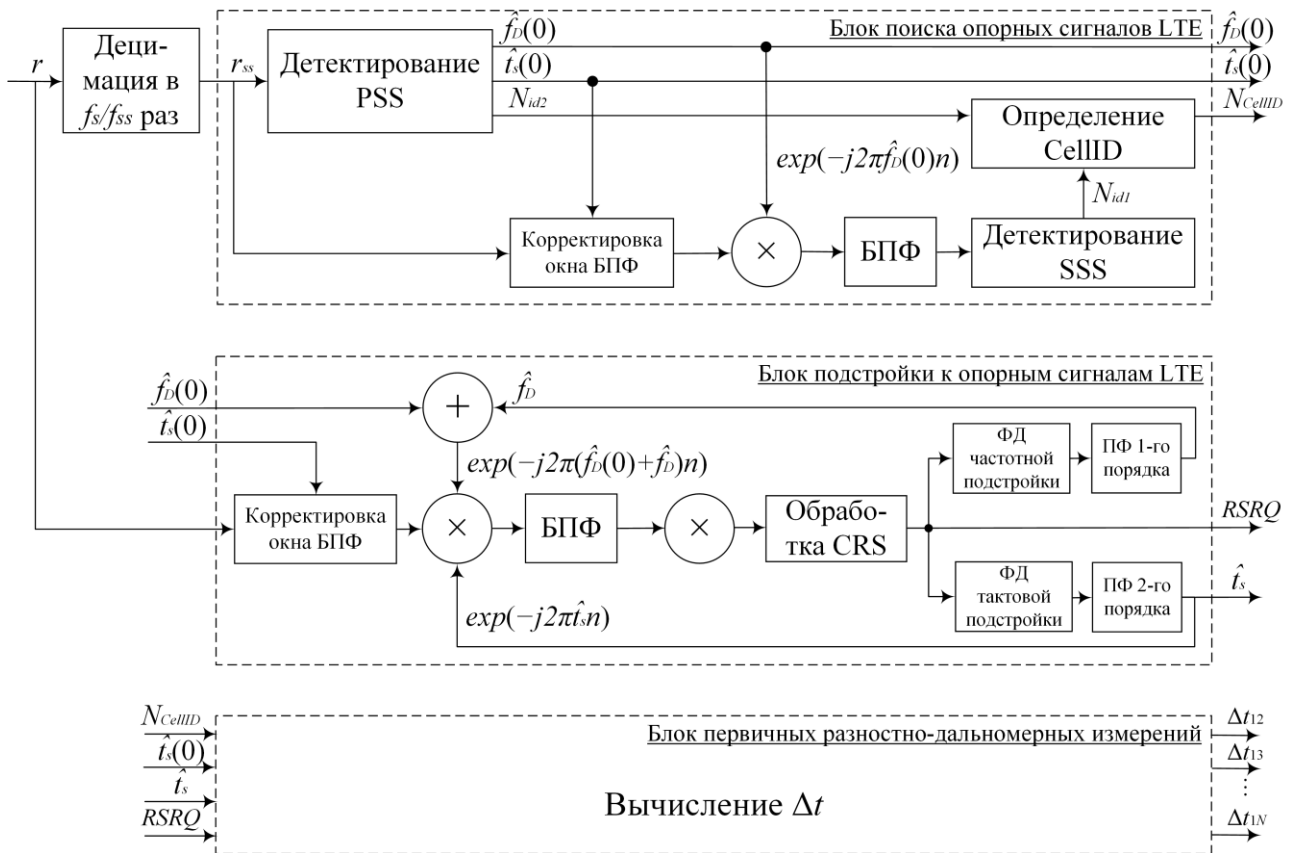


Рис. 2. Процедуры приема и обработки опорных сигналов LTE

3.2. Блок поиска опорных сигналов LTE

Первым этапом поиска опорных сигналов eNB является детектирование первичного сигнала синхронизации PSS. Детектирование PSS выполняется во временной области при помощи трех согласованных фильтров (СФ), коэффициентами которых являются отсчеты PSS-сигнала согласно стандарту LTE [17]. Положение максимума корреляционной функции (КФ) $C_{PSS^i}(n)$ в выражении (1) по опорному сигналу PSS определяет границу кадра eNB и является начальной оценкой временной расстройки $\hat{t}_s(0)$. Данная оценка выражается целым числом отсчетов n с частотой дискретизации 1.92 МГц, на которое нужно сдвинуть начало блока обработки, чтобы его границы были совмещены с границей кадра; обработка при этом ведется блоками по два сабфрейма. Дополнительно по первичным сигналам синхронизации PSS выполняется грубая оценка частотной расстройки $\hat{f}_D(0)$; для этого СФ по опорному сигналу PSS разбивается на два сегмента равной длины: сегмент $C_{PSS_{M0}^i}(n)$ в выражении (2) с индексами $m=0, \dots, N_{PSS}/2-1$ и сегмент $C_{PSS_{M1}^i}(n)$ в выражении (3) с индексами $m=N_{PSS}/2, \dots, N_{PSS}$. Разница фаз пиков корреляции двух сегментов пропорциональна частотной расстройке. Обработка опорных сигналов PSS выполняется согласно выражениям:

$$C_{PSS^i}(n) = \left| C_{PSS_{M0}^i}(n) \right|^2 + \left| C_{PSS_{M1}^i}(n) \right|^2; \quad (1)$$

$$C_{PSS_{M0}^i}(n) = \sum_{m=0}^{N_{PSS}/2-1} r_{ss}(n-m) s_{PSS^i}^*(m); \quad (2)$$

$$C_{PSS_{M1}^i}(n) = \sum_{m=N_{PSS}/2}^{N_{PSS}} r_{ss}(n-m) s_{PSS^i}^*(m); \quad (3)$$

$$t_c^i = \arg \min_n (C_{PSS^i}(n) > \delta P_a); \quad (4)$$

где r_{ss} – отсчеты принятого сигнала в полосе 1.4 МГц; $i=0, 1, 2$ – номер PSS; $N_{PSS}=128$ – длина выборки PSS, равная 128 отсчетам; $s_{PSS^i}^*$ – комплексно-сопряженные отсчеты i -го PSS; C_{PSS^i} – КФ по i -му PSS, полученная как сумма корреляций по двум сегментам i -го PSS, а именно по сегментам $C_{PSS_{M0}^i}(n)$ и $C_{PSS_{M1}^i}(n)$; δ – константа, подобрана эмпирически; P_a – средняя мощность на участке детектирования PSS; * – оператор комплексного сопряжения.

Согласно выражению (4) для каждого сигнала PSS сохраняются те временные индексы t_c^i , для которых значения КФ $C_{PSS^i}(n)$ превышают порог детектирования δP_a по средней мощности. Значения в списке t_c^i являются потенциальными оценками положения границы кадра, т.е. представляют собой грубую оценку временной расстройки $\hat{t}_s(0)$. Каждое из значений в списке t_c^i используется для дальнейшего поиска сигнала вторичной синхронизации SSS; значения в списке t_c^i , при которых сигнал SSS обнаружен не был, отбрасываются.

Оценка частотной расстройки $\hat{f}_D(0)$ по сигналу PSS выполняется следующим образом:

$$f_c^i(m) = \frac{1}{\pi N_{PSS}} \tan^{-1} \left(C_{PSS_{M1}^i}(m) C_{PSS_{M0}^i}^*(m) \right); \quad (5)$$

где m – временной индекс из списка t_c^i .

Таким образом, результатом работы алгоритма поиска первичного сигнала синхронизации PSS является список t_c^i индексов возможного положения границы кадра, список f_c^i оценок частотной расстройки для соответствующих индексов из t_c^i и список идентификаторов N_{id2} , обнаруженных по трем PSS; i -й идентификатор соты внутри группы N_{id2} считается обнаруженным, если список t_c^i не пустой.

Поиск вторичных сигналов синхронизации SSS осуществляется в частотной области для каждого положения сигнала PSS из списка t_c^i . Частотная расстройка f_c^i компенсируется во временной области после выделения отсчетов сигнала SSS из общего блока принятых отсчетов:

$$r_{ss_c}^m(m) = r_{ss} \left(n + t_c^i(m) \right) * e^{j2\pi n f_c^i(m)}, n = 0, \dots, N_{SSS} - 1. \quad (6)$$

Для каждого положения сигнала PSS из списка t_c^i вычисляется 168 корреляций (КФ) по сигналам SSS для 0-го сабфрейма и 168 корреляций (КФ) по сигналам SSS для 5-го сабфрейма:

$$C_{SSSj} = \sum_{k=0}^{N_{SSS}-1} R_{ss}(k) S_{SSSj}^*(k); \quad (7)$$

где $R_{ss} = FFT(r_{ss_c})$ – отсчеты принятого сигнала в полосе 1.4 МГц, соответствующие вторичному сигналу синхронизации SSS в частотной области; $FFT(\cdot)$ – оператор быстрого преобразования Фурье (БПФ, FFT – Fast Fourier Transform); $j = 0, 1, \dots, 167$ – номер сигнала SSS; $N_{SSS} = 128$ – длина выборки сигнала SSS, равная 128 отсчетам; S_{SSSj}^* – комплексно-сопряженные отсчеты j -го сигнала SSS в частотной области; C_{SSSj} – корреляция по j -му SSS.

Полученные корреляции (КФ) сравниваются с порогом; значения КФ, превысившие порог, и соответствующие им индексы (от 0 до 167) сохраняются в сортированные по убыванию значения корреляции списки. Таким образом, формируются два списка (для 0-го и 5-го сабфрейма) с номерами обнаруженных сигналов SSS для всех положений обнаруженных сигналов PSS. Параллельно поддерживаются списки значений корреляции по сигналам SSS и списки номеров сигналов PSS, при которых были обнаружены сигналы SSS. Из всех списков при покадровой обработке удаляются повторяющиеся значения. Максимальные значения корреляции по сигналу SSS для 0-го и 5-го сабфрейма сравниваются для вынесения решения о том, какой сабфрейм (субкадр) принимается в данный момент. Для всех пар PSS/SSS вычисляется Cell ID, а также сохраняются соответствующие значения индексов положения границы кадра t_c^i , т.е. грубые оценки временной расстройки, а также оценки частотной расстройки f_c^i . Полученные значения грубой оценки временной расстройки $\hat{t}_s(0)$ используются для корректировки окна быстрого преобразования Фурье как на этапе поиска, так и на этапе подстройки к опорным сигналам согласно схеме процедур на рис. 2. Далее рассмотрим процедуры блока подстройки к опорным сигналам LTE, реализованные в [20].

3.3. Блок подстройки к опорным сигналам LTE

После установления Cell ID по опорным сигналам LTE в радиоэфире структура каждой базовой станции eNB дополняется счетчиком числа ее обнаружений. В список обнаруженных eNB попадают только те базовые станции, которые в радиоэфире обнаруживаются регулярно. Нерегулярность обнаружений обусловлена ложными срабатываниями по критерию сравнения КФ с эмпирически подобранном порогом в выражении (4). eNB считается обнаруженной, если она детектируется по критерию (4) не менее 40 % от всех попыток обнаружения eNB в процессе обработки принятых из радиоэфира сигналов. Сигналы CRS/PRS, обнаруженные по данному критерию, используются для дальнейшей обработки при подстройке. Каждая eNB характеризуется следующими ключевыми параметрами, которые могут обновляться в процессе работы процедур приема и обработки: Cell ID – идентификатор eNB; TimeOfff – величина грубой временной расстройки $\hat{t}_s(0)$ в количестве отсчетов, начальное значение грубой временной расстройки получается из списка t_c^i ; FreqOfff – величина частотной расстройки в рад/с относительно частоты дискретизации f_s , начальное значение грубой частотной расстройки $\hat{f}_D(0)$ получается из списка f_c^i и далее обновляется по сигналам CRS; TimeOfffFrac – величина дробной временной расстройки Δt_{CRS} , обновляется по сигналам CRS/PRS; (aTimeEst, pTimeEst, iTimeEst) – коэффициенты петлевого фильтра (ПФ) для дробной задержки, обновляются по сигналам CRS/PRS; DetectCnt – число обнаружений eNB; RSRQ – оценка качества приема в дБ для исключения ложных срабатываний, обновляется по сигналам CRS.

Точная временная $\hat{t}_s$ и частотная $\hat{f}_D$ подстройки выполняются по опорным сигналам CRS/PRS для каждой обнаруженной базовой станции eNB (рис. 2), при этом обработка ведется в частотной области в рабочей полосе частот ΔF . Блок обработки на этапе подстройки составляет два сабфрейма. Границы блока обработки определяются значением TimeOfff(t_c^i) с учетом $c_{bw}(bwCoef)$ – коэффициента масштабирования параметров приемника для заданной полосы. Коэффициент c_{bw} необходимо учитывать при переводе параметров, вычисленных в домene частоты дискретизации 1.92 МГц, в домен обработки на полной частоте дискретизации, которая, в свою очередь, определяется рабочей полосой частот ΔF . Коэффициент c_{bw} определяется как отношение размера FFT для полной полосы N_{FFT} к размеру FFT для обработки PSS/SSS $N_{FFT_{ss}}$, т.е. $c_{bw} = N_{FFT} / N_{FFT_{ss}}$; размерность БПФ для всех полос частот стандарта LTE представлена в предыдущей части [10]. Компенсация частотной расстройки в блоке обработки выполняется во временной области в соответствии со значением FreqOfff для конкретной eNB.

Первым этапом обработки CRS/PRS является OFDM-демодуляция, которая заключается в выполнении FFT над блоком обработки и разбиении этого блока на отдельные OFDM-символы; в результате формируется сетка ресурсных элементов из принятых OFDM-символов одного блока обработки. Дальнейшая обработка ведется блоками, равными одному сабфрейму. Для каждого OFDM-символа проводится компенсация точной/дробной временной задержки $\hat{t}_s$ с учетом дробной расстройки Δt_{CRS} согласно параметру TimeOfffFrac:

$$R_c(k) = R(k) e^{\frac{j2\pi k \hat{t}_s}{N_{FFT}}} ; \quad (8)$$

где k – номер поднесущей в OFDM-символе; $R(k)$ – k -я поднесущая принятого OFDM-символа; $R_c(k)$ – k -я поднесущая принятого OFDM-символа после компенсации дробной

временной расстройки; $\hat{t}_s$ – точная/дробная временная задержка, учитывающая дробную расстройку Δt_{CRS} , измеряется в долях отсчета с использованием параметра TimeOffFrac ; N_{FFT} – размер FFT, определяется рабочей полосой.

По известным идентификаторам Cell ID и текущему номеру сабфрейма в процессе обработки формируется последовательность отсчетов опорных CRS-символов, а также выделяются CRS-символы из сетки принятых OFDM-символов.

Оценка частотной расстройки вычисляется как средняя разница фазовых расстроек поднесущих двух CRS-символов с одинаковыми номерами в соседних слотах, т.е. символов CRS, которые располагаются в одинаковых позициях в соседних слотах:

$$\Delta f_{CRS} = \frac{\tan^{-1} \left(\sum_{k=0}^{N_{CRS}-1} h_{CRS_{s_0}}^*(k) h_{CRS_{s_1}}(k) \right)}{N_{FFT} + N_{CP0} + 6(N_{FFT} + N_{CP})}; \quad (9)$$

$$h_{CRS}(k) = S_{CRS}^*(k) R_{CRS}(k), k \in \mathbb{N}_{CRS}; \quad (10)$$

где k – номер поднесущей в OFDM-символе; $R_{CRS}(k)$ – k -я поднесущая принятого CRS-символа; $S_{CRS}(k)$ – k -я поднесущая опорного CRS-символа; $h_{CRS}(k)$ – комплексное умножение принятой и опорной k -й поднесущей CRS-символа, которое позволяет определить разность фазы k -й поднесущей принятого CRS-символа относительно k -й поднесущей опорного CRS-символа; S_0 и S_1 – индексы номера слота; $\mathbb{N}_{CRS}$ – индексы CRS поднесущих в OFDM-символе; N_{CRS} – число активных поднесущих в CRS-символе; N_{FFT} – размер FFT в рабочей полосой частот ΔF ; N_{CP0} – длина циклического префикса (ЦП) 0-го OFDM-символа в слоте; N_{CP} – длина ЦП остальных OFDM-символов в слоте.

Полученная оценка частотной расстройки Δf_{CRS} подается на петлевой фильтр 1-го порядка для плавного отслеживания частотной расстройки $\hat{f}_D$:

$$\hat{f}_D(m) = \hat{f}_D(m-1) + \alpha \Delta f_{CRS}; \quad (11)$$

где m – индекс итерации подстройки; $\alpha = 0.08$ – коэффициент ПФ, выбранный эмпирически.

Оценка дробной временной расстройки Δt_{CRS} вычисляется как среднее значение разницы фаз двух соседних поднесущих в одном CRS/PRS-символе:

$$\Delta t_{CRS} = \frac{\tan^{-1} \left(\sum_{k=1}^{N_{CRS}-1} h_{CRS_{s_0}}^*(k) h_{CRS_{s_0}}(k-1) \right)}{2\pi} \cdot \frac{N_{FFT}}{\Delta N_{FFT}}; \quad (12)$$

где $\Delta N_{FFT} = 6$ – число поднесущих между соседними активными поднесущими CRS/PRS-символа. В формуле (12) представлено вычисление Δt_{CRS} для 0-го слота сабфрейма. Для 1-го слота сабфрейма выполняются вычисления, аналогичные (12); итоговая оценка дробной временной расстройки Δt_{CRS} получается в результате усреднения по двум слотам.

Полученная оценка дробной временной расстройки Δt_{CRS} подается на ПФ 2-го порядка для плавного отслеживания точной/дробной временной задержки $\hat{t}_s$:

$$\hat{t}_s(m) = \hat{t}_s(m-1) + \alpha_p \Delta t_{CRS}(m) + \hat{t}_{s,\alpha}(m); \quad (13)$$

$$\hat{t}_{s,\alpha}(m) = \hat{t}_{s,\alpha}(m-1) + \alpha_i \Delta t_{CRS}(m); \quad (14)$$

где m – индекс итерации подстройки; α_p и α_i – коэффициенты ПФ, подобраны эмпирически.

Оценка задержки $\hat{t}_s$ по символу PRS выполняется аналогично оценке по символу CRS в (13). На ПФ подается сумма оценок задержки по символам CRS Δt_{CRS} и PRS Δt_{PRS} соответственно. Конечная оценка задержки времени прихода сигнала t определяется суммой текущих оценок грубой $\hat{t}_s(0)$ и точной/дробной $\hat{t}_s$ временной задержки:

$$t = \frac{\hat{t}_s(0)c_{bw} + \hat{t}_s}{f_s}; \quad (15)$$

где $\hat{t}_s(0)$ – грубая оценка временной задержки, выполненная по PSS согласно формулам (1)–(4); c_{bw} – коэффициент масштабирования параметров приемника для заданной рабочей полосы, необходим для пересчета $\hat{t}_s(0)$ из домена полосы 1.4 МГц сигналов PSS/SSS с частотой дискретизации $f_{ss} = 1.92$ МГц в домен рабочей полосы ΔF с частотой дискретизации f_s ; $\hat{t}_s$ – оценка точной/дробной временной задержки по сигналам CRS/PRS согласно формулам (12)–(14); f_s – частота дискретизации для рабочей полосы.

Оценка качества приема RSRQ (Reference Signal Received Quality) опорных сигналов выполняется по опорным сигналам соты CRS и представляет собой выраженное в дБ отношение мощности КФ по CRS к средней мощности принятого в ресурсном элементе CRS-символа:

$$RSRQ = 10 \log_{10} \left(\frac{\left| \sum_{k \in \mathbb{N}_{CRS}} h_{CRS}(k) \right|^2}{\left| \sum_{k=0}^{N_{FFT}-1} R_{CRS}(k) \right|^2} \right); \quad (16)$$

где $h_{CRS}(k)$ – комплексное произведение согласно выражению (10); $\mathbb{N}_{CRS}$ – индексы CRS поднесущих в OFDM-символе; $R_{CRS}(k)$ – k -я поднесущая принятого OFDM-символа.

В формировании набора первичных измерений разности дальности участвуют только те базовые станции eNB, значение параметра RSRQ которых превышает заданный порог.

4. Заключение

В настоящей работе рассмотрена архитектура SDR-устройства и соответствующие этапы приема опорных сигналов стандарта LTE с целью их обработки для извлечения первичных измерений времени прихода сигнала и последующего использования в задачах сетевого позиционирования. Представлена алгоритмическая и методическая формализация экспериментально апробированной в лабораторных условиях последовательности процедур приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE с целью сбора первичных измерений разности времен прихода сигналов TDOA.

Следующим этапом исследования в части вопросов приема и обработки опорных сигналов стандарта LTE является описание экспериментальной апробации рассмотренных процедур на макете пользовательского устройства, построенного с использованием подхода модельно-ориентированного проектирования и средств программно-конфигурируемого радио.

Выражение благодарности

Авторы выражают благодарность рецензентам за ценную обратную связь при подготовке рукописи к публикации.

Литература

1. *Фокин Г. А.* Технологии сетевого позиционирования. Санкт-Петербург: СПбГУТ, 2020. 558 с.
2. *Фокин Г. А.* Технологии сетевого позиционирования 5G. М.: Горячая Линия – Телеком, 2021. 456 с.
3. *Фокин Г. А.* Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. дис. ... д-р. техн. наук. Санкт-Петербург. 2021. 499 с.
4. *Гельгор А. Л., Павленко И. И., Горлов А. И., Фокин Г. А., Попов Е. А., Лаврухин В. А., Сиверс М. А.* Первичная синхронизация с базовыми станциями LTE // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2014. Т. 19, № 7. С. 54–62.
5. *Гельгор А. Л., Павленко И. И., Фокин Г. А., Горлов А. И., Попов Е. А., Лаврухин В. А., Сиверс М. А.* Пеленгация базовых станций в сетях LTE // *Электросвязь*. 2014. № 9. С. 34–39.
6. *Фокин Г. А., Волгушев Д. Б., Харин В. Н.* Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Формирование опорных сигналов LTE // *Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2022. Т. 16, № 5. С. 28–47.
7. *Фокин Г. А., Лаврухин В. А., Волгушев Д. А., Киреев А. В.* Модельно-ориентированное проектирование на основе SDR // *Системы управления и информационные технологии*. 2015. № 2 (60). С. 94–99.
8. *Фокин Г. А., Буланов Д. В., Волгушев Д. Б.* Модельно-ориентированное проектирование систем радиосвязи на основе ПКР // *Вестник связи*. 2015. № 6. С. 26–30.
9. *Фокин Г. А.* Технологии программно-конфигурируемого радио. М.: Горячая Линия – Телеком, 2019. 316 с.
10. *Фокин Г. А., Волгушев Д. Б.* Использование SDR-технологии для задач сетевого позиционирования. Модели приема и обработки опорных сигналов LTE // *Вестник СибГУТИ*. 2022. № 3 (59). С. 62–83.
11. *Shamaei K., Khalife J., Kassas Z.* Performance characterization of positioning in LTE systems // *Proceedings of the 29th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS+ 2016)*. 2016. P. 2262–2270.
12. *Shamaei K., Kassas Z. M.* Receiver Design and Time of Arrival Estimation for Opportunistic Localization With 5G Signals // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2021. V. 20, № 7. P. 4716–4731.
13. *Shamaei K.* Exploiting Cellular Signals for Navigation: 4G to 5G. University of California, Irvine, 2020.
14. *Shamaei K., Khalife J., Kassas Z. M.* Comparative results for positioning with secondary synchronization signal versus cell specific reference signal in LTE systems // *Proc. International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2017. P. 1256–1268.
15. *Shamaei K., Khalife J., Kassas Z. M.* Exploiting LTE Signals for Navigation: Theory to Implementation // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2018. V. 17, № 4. P. 2173–2189.
16. *Kassas Z. M., Shamaei K., Khalife J.* SDR for navigation with LTE signals. Patent US11187774B2. United States. University of California. Publication 30.11.2021.
17. 3GPP TS 36.211 V16.7.0 (2021-12). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 17).
18. 3GPP TS 36.212 V17.1.0 (2022-03). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (Release 17).

19. 3GPP TS 38.211 V17.2.0 (2022-06). NR; Physical channels and modulation (Release 17).
20. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022619804 Российская Федерация. Программный модуль первичной обработки опорных сигналов стандарта LTE при позиционировании устройств / Г. А. Фокин, Д. Б. Волгушев; № 2022618875; заявл. 16.05.2022; опубл. 26.05.2022.
21. Cell Search, MIB and SIB1 Recovery. LTE Toolbox. MathWorks. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mathworks.com/help/lte/ug/cell-search-mib-and-sib1-recovery.html> (дата обращения: 31.03.2023).

Фокин Григорий Алексеевич

д.т.н., доцент, профессор кафедры радиосвязи и вещания СПбГУТ (СПбГУТ, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1, а. 407/2), email: grihafokin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5358-1895.

Волгушев Дмитрий Борисович

научный сотрудник СПбГУТ (СПбГУТ, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, к. 1, а. 407/2), email: d.volgushev@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-8147-4368.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

**Development of SDR-based Network Positioning Technology.
LTE Reference Signals Reception and Processing Procedures**

Grigoriy A. Fokin, Dmitry B. Volgushev

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT)

Abstract: Introduction. The search for technical solutions to improve the positioning accuracy of devices using the infrastructure of base stations of existing and planned cellular radio networks is an important area of research and development in the last decade. Interest in network positioning is due to the unreliable reception of signals from global navigation satellite systems in dense urban areas. The instrument for experimental approbation of technical solutions is the software and hardware of the SDR software defined radio technology. This work is a continuation of the research on the use of SDR technology for network positioning tasks in terms of issues related to the reception and processing of reference signals of the LTE standard. Materials and methods. The paper presents an experimentally tested sequence of procedures for receiving and processing LTE reference signals in order to collect primary differential-range measurements for software implementation on a mock-up of a user device built using SDR software defined radio technology. Results. The software implementation of the presented procedures underlies the SDR layout of the user device for receiving and processing reference signals of the LTE standard. Discussion and conclusions. Approbation of the operation of the SDR testbed of the user device in laboratory conditions with SDR testbeds of base stations, as well as in the field with base stations of functioning LTE networks, makes it possible to search for technical solutions to improve the accuracy of positioning.

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

For citation: Fokin G. A. Volgushev D. B. Development of SDR-based network positioning technology. LTE reference signals reception and processing procedures (in Russian). *Vestnik SibGUTI*, 2023, vol. 17, no. 1. pp. 52-65. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-1-52-65>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Fokin G. A. Volgushev D. B., 2023

The article was submitted: 22.07.2022;
revised version: 30.12.2022;
accepted for publication 17.01.2023.

References

1. Fokin G.A. *Tekhnologii setevogo pozitsionirovaniya* [Network positioning technologies]. St. Petersburg, Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy universitet telekommunikatsiy im. prof. M.A. Bonch-Bruyevicha, 2020. 558 p.
2. Fokin G.A. *Tekhnologii setevogo pozitsionirovaniya 5G* [5G network positioning technologies]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom, 2021. 456 p.
3. Fokin G.A. *Kompleks modeley i metodov pozitsionirovaniya ustroystv v setyakh pyatogo pokoleniya. Dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk* [A set of models and methods for positioning devices in fifth-generation networks], Doctor's degree dissertation, St. Petersburg, 2021. 499 p.
4. Gelgor A.L., Pavlenko I.I., Gorlov A.I., Fokin G.A., Popov E.A., Lavrukhin V.A., Sivers M.A. Pervichnaya sinkhronizatsiya s bazovymi stantsiyami LTE [Primary synchronization with LTE base stations]. *Electromagnetic waves and electronic systems*, 2014, vol. 19, no. 7, pp. 54-62.
5. Gelgor A.L., Pavlenko I.I., Fokin G.A., Gorlov A.I., Popov E.A., Lavrukhin V.A., Sivers M.A. Pelengatsiya bazovykh stantsiy v setyakh LTE [Direction finding of base stations in LTE networks]. *Electrosvyaz*, 2014, no. 9, pp. 34-39.
6. Fokin G.A., Volgushev D.B., Kharin V.N. Ispol'zovaniye SDR tekhnologii dlya zadach setevogo pozitsionirovaniya. Formirovaniye opornykh signalov LTE [Using SDR technology for network positioning tasks. Formation of LTE reference signals]. *T-Comm: Telecommunications and transport*, 2022. vol. 16, no. 5, pp. 28-47.
7. Fokin G.A., Lavrukhin V.A., Volgushev D.A., Kireev A.V. Model'no-oriyentirovannoye proyektirovaniye na osnove SDR [Model-Based Design Based on SDR]. *Control Systems and Information Technologies*, 2015, no. 2 (60), pp. 94-99.
8. Fokin G.A., Bulanov D.V., Volgushev D.B. Model'no-oriyentirovannoye proyektirovaniye sistem radiosvyazi na osnove PKR [Model-Based Design of Radio Communication Systems Based on SDR]. *Vestnik svyazi*, 2015, no. 6, pp. 26-30.
9. Fokin G.A. *Tekhnologii programmno-konfiguriruyemogo radio* [Software Defined Radio Technologies]. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2019. 316 p.
10. Fokin G.A., Volgushev D.B. Ispol'zovaniye SDR-tekhnologii dlya zadach setevogo pozitsionirovaniya. Modeli priyema i obrabotki opornykh signalov LTE [Development of SDR-based network positioning technology. LTE reference signals reception and processing models]. *Vestnik SibGUTI*, 2022, no. 3 (59), pp. 62-83.
11. Shamaei K., Khalife J., Kassas Z. Performance characterization of positioning in LTE systems. *Proceedings of the 29th international technical meeting of the satellite division of the institute of navigation (ION GNSS+ 2016)*, 2016, pp. 2262-2270.
12. Shamaei K., Kassas Z.M. Receiver Design and Time of Arrival Estimation for Opportunistic Localization With 5G Signals. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, vol. 20, no. 7, pp. 4716-4731.
13. Shamaei K. *Exploiting Cellular Signals for Navigation: 4G to 5G*. University of California, Irvine, 2020.

14. Shamaei K., Khalife J., Kassas Z.M. Comparative results for positioning with secondary synchronization signal versus cell specific reference signal in LTE systems. *Proceedings of the 2017 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*, 2017, pp. 1256-1268.
15. Shamaei K., Khalife J., Kassas Z.M. Exploiting LTE Signals for Navigation: Theory to Implementation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, vol. 17, no. 4, pp. 2173-2189.
16. Kassas Z.M., Shamaei K., Khalife J. SDR for navigation with LTE signals. Patent US11187774B2. United States. University of California. Publication 30.11.2021.
17. 3GPP TS 36.211 V16.7.0 (2021-12). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 17).
18. 3GPP TS 36.212 V17.1.0 (2022-03). Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding (Release 17).
19. 3GPP TS 38.211 V17.2.0 (2022-06). NR; Physical channels and modulation (Release 17).
20. Fokin G.A., Volgushev D.B. *Programmnyy modul' pervichnoy obrabotki opornykh signalov standarta LTE pri pozitsionirovanii ustroystv* [Software module for primary processing of reference signals of the LTE standard when positioning devices]. Certificate of state registration of the computer program 2022619804. Application 2022618875, submitted on 05.16.2022, published on 05.26.2022.
21. Cell Search, MIB and SIB1 Recovery. LTE Toolbox. MathWorks. available at: <https://www.mathworks.com/help/lte/ug/cell-search-mib-and-sib1-recovery.html> (accessed 31.03.2023).

Grigoriy A. Fokin

Dr. of Sci. (Engineering), Docent; Professor of the Department of Radio Communication and Broadcasting, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT, Russia, 193232, Saint Petersburg, Bolshevikov Prospect 22), email: grihafokin@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-5358-1895.

Dmitry B. Volgushev

Research assistant, The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications (SPbSUT, Russia, 193232, Saint Petersburg, Bolshevikov Prospect 22), email: d.volgushev@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-8147-4368.