

Научная статья

УДК 621.396.969

DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-80-99



# Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 2. Обработка 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:** Вторая часть исследования о моделировании технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR посвящена процедурам обработки разностно-дальномерных измерений на основе сконфигурированных опорных сигналов позиционирования PRS с результирующей оценкой координат пользовательского устройства методом наблюдаемой разности времен прихода сигналов OTDOA. Программная реализация процедур первичной и вторичной обработки сигналов PRS в имитационной модели использует встроенные функции пакета расширения 5G Toolbox специального программного обеспечения Matlab. В результате оценки точности позиционирования пользовательских устройств в сетях стандарта 5G NR средствами имитационного моделирования, показано, что в диапазоне FR1 точность оценок координат менее одного метра достигается при увеличении ширины полосы частот с 50 до 60 МГц, а максимальная точность позиционирования в диапазоне FR2 в канале с шириной полосы частот 400 МГц и частотой дискретизации 491,52 МГц составила 0,2 м.

**Ключевые слова:** 5G NR, PRS, позиционирование, метровая и дециметровая 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 2. Обработка сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 80–99. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-80-99

## Simulation Model of 5G NR Network Positioning Technology with Meter Accuracy. Part 2. PRS Signals Processing

Grigoriy Fokin, grihafokin@gmail.com

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

**Abstract:** The second part of the study on 5G NR network positioning technology with meter accuracy modeling is devoted to the procedures for range-difference measurements processing based on configured PRS positioning reference signals with the resulting estimate of the user equipment coordinates based on observed time difference of arrival (OTDOA) of the signals. The software implementation of the procedures for PRS signals primary and secondary processing in the simulation model uses the built-in functions of the 5G Toolbox extension package of the special MATLAB software. The assessment of the positioning accuracy of user devices in 5G NR networks using simulation modeling in the FR1 range shows that the accuracy of coordinate estimates of less than one meter is achieved when increasing the bandwidth from 50 to 60 MHz with the maximum positioning accuracy in the FR2 band in a channel having a bandwidth of 400 MHz and a sampling rate of 491.52 MHz was 0.2 m.

**Keywords:** 5G NR, PRS, positioning, meter and decimeter 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 Network Positioning Technology with Meter Accuracy. Part 2. PRS Signals Processing. *Proc. of Telecom. Universities*. 2022;8(3):80–99. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-80-99

## 1. Введение

В одной из первых опубликованных в 2015 г. работ по определению местоположения (ОМП) пользовательских устройств (UE, *аббр. от англ.* User Equipment) с использованием инфраструктуры базовых станций gNB (gNodeB) в сетях пятого поколения 5G NR (*аббр. от англ.* New Radio) было показано [1], что в условиях кооперативного позиционирования и достаточно плотного распределения приемопередатчиков при расстоянии между gNB порядка 100 м и плотности UE от 1000 устройств на квадратный километр потенциальная точность оценок координат (ОК) UE менее одного метра достигается с вероятностью более 95 %. С 2015 г. в рамках партнерского проекта 3GPP (*аббр. от англ.* 3rd Generation Partnership Project) была проведена фундаментальная работа по совершенствованию технологии сетевого позиционирования в сетях LTE (*аббр. от англ.* Long-Term Evolution) методом наблюдаемой разности времен прихода сигналов OTDOA (*аббр. от англ.* Observed Time Difference of Arrival) на основе обработки специальных опорных сигналов позиционирования PRS (*аббр. от англ.* Position Reference Signal) как для абонентских терминалов, так и для устройств Интернета вещей (IoT, *аббр. от англ.* Internet of Things) [2]. Результаты имитационного моделирования (ИМ) технологии сетевого позиционирования LTE для полосы 10 МГц с 50 ресурсными блоками (РБ) показали точность ОК до 40 м с вероятностью 95 % для подвижного UE (3 км/ч) в сценарии макросот с разном соседних базовых станций eNB (eNodeB) 700 м. В сверхплотных сетях UDN (*аббр. от англ.* Ultra-Dense Networks) радиодоступа пятого поколения 5G NR вероятность наличия прямой видимости (LOS, *аббр. от англ.* Line of Sight) в радиолиниях gNB–UE микросот существенно выше, чем в сценариях eNB–UE макросот сетей LTE, поэтому с увеличением числа LOS gNB, осуществляющих первичные дальномерные (ДМ) измерения времени прихода сигнала (ТОА, *аббр. от англ.* Time of Arrival), потенциальная точность оценок координат UE достигает уже единиц метров [3]. Помимо точности первичных измерений и условий отсутствия прямой видимости NLOS (*аббр. от англ.* Non Line of Sight) в радиолиниях gNB–UE дополнительными источниками погрешности ОК в методе OTDOA с обработкой сигналов PRS канале «вниз» DL (*аббр. от англ.* Downlink TDOA, OTDOA) для сетей 5G NR являются рассинхронизация базовых станций gNB и не-

точность их известных координат [4]. Например, рассинхронизация gNB в 1 нс вносит систематическую погрешность первичных ДМ измерений в 0,3 м, а типовая погрешность временной метки глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС, *от англ.* GNSS – Global Navigation Satellite System) в 50 нс приводит уже к смещению в 15 м. В [5] средствами имитационного моделирования (ИМ) проиллюстрировано влияние рассинхронизации базовых станций gNB на точность позиционирования в сетях 5G NR методом OTDOA: при идеальной синхронизации gNB точность ОК UE составляет менее 1 м с вероятностью 50 %; при внесении погрешности синхронизации gNB в 50 нс точность ОК UE при прочих равных условиях снижается уже до 7 м. Также при решении навигационной задачи по первичным разностно-дальномерным (РДМ) измерениям в пользовательском устройстве местоположения (МП) базовых станций должны быть известны UE, однако если координаты gNB транслируются посредством ГНСС, результирующая оценка координат UE получает дополнительное смещение вследствие погрешности, вносимой ГНСС в МП gNB. Таким образом, для метровой точности позиционирования UE в сетях 5G NR и погрешность синхронизации базовых станций gNB, и неточность их координат должны быть минимизированы. В 15-м релизе 3GPP для высокоточного определения местоположения была предложена поддержка ГНСС систем «кинематики реального времени» GNSS-RTK (*аббр. от англ.* Real Time Kinematic), позволяющая получить координаты и высоты точек местности сантиметровой точности посредством поправок к ГНСС. В 16-м релизе 3GPP для позиционирования UE получила развитие концепция использования сигналов PRS, апробированная в сетях LTE. В процессе работы над 17-м релизом 3GPP для высокоточного позиционирования в сетях 5G NR была отмечена также необходимость компенсации задержек при прохождении сигналами радио- и base-band-тракта обработки на нулевой частоте (где осуществляется обработка сигналов PRS) как в пользовательском устройстве UE, так и в приемопередающем модуле TRP (*аббр. от англ.* Transmission Reception Point) базовой станции gNB [6]; без предварительной калибровки эти задержки могут составлять несколько наносекунд.

При достижении сантиметровой точности МП базовых станций, наносекундной синхронизации gNB и калибровке трактов TRP и UE потенциальная

точность ОК пользовательского устройства определяется, во-первых, геометрическим фактором точности позиционирования GDOP (*аббр. от англ. Geometric Dilution of Precision*), и во-вторых, погрешностью первичных измерений.

Параметр GDOP зависит от взаимного территориального распределения UE и gNB, участвующих в сеансе позиционирования. Так, в работе [7] в задачах ОМП в сетях 5G NR методом OTDOA предлагается использовать дополнительную метрику качества позиционирования PQM (*аббр. от англ. Positioning Quality Metric*), основанную на GDOP, для выбора наиболее подходящих для сбора первичных РДМ измерений базовых станций gNB, работающих в режиме диаграммообразования (ДО). Целесообразность исключения из вторичной обработки некоторых базовых станций gNB подтверждается также результатами исследования [8] для сценария первичных измерений по опорным зондирующим сигналам SRS (*аббр. от англ. Sounding Reference Signal*) в канале «вверх» UL при позиционировании в сетях 5G методом UTDOA (*аббр. от англ. Uplink TDOA*).

В одной из первых работ [9], где средствами ИМ выполнена оценка точности позиционирования устройств в сетях 5G в зависимости от первичных РДМ измерений по сигналам PRS показано, что погрешность ОК UE менее одного метра достигается в диапазоне FR2 (*аббр. от англ. Frequency Range 2*) для нумерологий NR с разносом поднесущих более 60 кГц. В [10] для позиционирования UE предлагается использовать параметр упреждения по времени TA (*аббр. от англ. Timing Advance*), полученный в результате первичных измерений в канале случайного доступа RACH (*аббр. от англ. Random Access Channel*). Необходимость реализации подсистемы приема и обработки сигналов PRS с дробной оценкой времени прихода сигнала TOA обоснована в [11]. Так, для набора используемых радиointерфейсом 5G NR частот дискретизации 7,68; 15,36; 30,72; 61,44; 122,88; 245,76 и 491,52 МГц разрешение TOA с целочисленным интервалом дискретизации при переводе в ДМ измерения составляет 39; 19,5; 9,8; 4,9; 2,4; 1,2 и 0,6 м, соответственно. Для сигнала NR с частотой дискретизации 30,72 МГц показана возможность дробной оценки TOA с разрешением в 0,13 от интервала дискретизации, что составляет 1,27 м. В одной из последних работ по позиционированию в сетях 5G NR [12] для достижения сантиметровой точности ОК UE предлагается фазовый метод оценки времени прихода сигнала, аналогичный используемому в системах GNSS-RTK. Результаты имитационного моделирования показывают, что данный подход заслуживает внимания для выполнения требований 18-го релиза 3GPP TS 22.261 [13] и TS 22.104 [14] в части, касающейся позиционирования с дециметровой точностью.

На сегодняшний день можно выделить следующие спецификации и рекомендации партнерского проекта 3GPP [13–28], имеющие отношения к технологиям сетевого позиционирования пятого и последующих поколений. В TS 22.261 [13] и TS 22.104 [14] сформулированы требования в части, касающейся сетевого позиционирования 5G с дециметровой точностью. В TR 22.872 [15] описаны сценарии позиционирования в сетях 5G с количественными и качественными требованиями. В TR 38.855 [16] формализованы условия моделирования сценариев позиционирования 5G NR. В TR 38.857 [17] содержатся дополнительные требования и сценарии совершенствования технологии позиционирования 5G NR. Архитектура и процедуры технологии позиционирования UE на уровне сети радиодоступа NG-RAN (*аббр. от англ. Next Generation Radio Access Network*) рассмотрены в TS 38.305 [18]. Процедуры взаимодействия NG-RAN и функции определения местоположения LMF (*аббр. от англ. Location Management Function*) в плоскости управления CP (*аббр. от англ. Control Plane*) при позиционировании UE регламентированы протоколом NRPPa (*аббр. от англ. NR Positioning Protocol A*) в TS 38.455 [19], а также протоколом LPP (*аббр. от англ. LTE Positioning Protocol*) в TS 37.355 [20]. Спецификации физического и канального уровней стандарта 5G NR, имеющие отношения к вопросам обработки сигналов PRS, представлены в [21–25] и [26,27], соответственно. В TR 38.901 [28] описаны модели радиоканала в диапазоне от 0,5 до 100 ГГц, используемые при имитационном моделировании технологии 5G NR.

Настоящая статья является продолжением работы [29] и посвящена исследованию процедур вторичной обработки первичных РДМ измерений на основе сигналов PRS с результирующей оценкой координат пользовательского устройства методом OTDOA в сетях 5G NR средствами ИМ.

Ввиду достаточно широкого круга вопросов, определяющих точность технологий сетевого позиционирования 5G [30–32], в настоящем исследовании сделаны следующие допущения. Во-первых, из совокупности сценариев позиционирования в сетях 5G NR [33,34], с точки зрения территориального распределения gNB и UE, в настоящей работе рассматривается ОМП UE в масштабе микросот на плоскости. Во-вторых, из набора процедур позиционирования в сетях 5G NR [35], с точки зрения первичных измерений и их вторичной обработки, исследуется позиционирование UE методом OTDOA по излученным gNB сигналам PRS в канале «вниз» с приемом и обработкой в пользовательском устройстве. В-третьих, по критерию геометрического фактора снижения точности [36–38], с точки зрения топологии расположения базовых станций gNB, анализируется сценарий позиционирования UE с фиксированным МП, при котором обеспечивается оп-



тимистический GDOP. В-четвертых, из множества прикладных сценариев использования методов сетевого позиционирования в экосистеме 5G [39,40] результирующая точность оценки координат пользовательского устройства представляет интерес не только как непосредственная задача ОМП UE, но и как инструмент управления диаграммой направленности в отдельной радиолинии сверхплотной сети радиодоступа миллиметрового диапазона.

Материал настоящей работы организован далее следующим образом. В разделе 2 формализована имитационная модель технологии сетевого позиционирования 5G NR с обработкой сигналов PRS. В разделе 3 представлены результаты оценки точности технологии позиционирования 5G NR с обработкой сигналов PRS средствами ИМ. Раздел 4 содержит выводы и пути дальнейших исследований.

## 2. Имитационная модель технологии сетевого позиционирования 5G NR с обработкой сигналов PRS

В настоящем разделе рассматривается конфигурация объектов имитационной модели технологии сетевого позиционирования 5G NR с обработкой опорных сигналов позиционирования PRS [41] пакета расширения 5G Toolbox [42] в следующем порядке. В 2.1 представлена конфигурация территориального распределения базовых станций gNB и UE для получения оптимистического GDOP. В 2.2 формализованы процедуры и реализующие их программные модели формирования и передачи сигналов PRS базовыми станциями gNB. В 2.3 описаны модели радиоканала между базовыми станциями gNB и пользовательским устройством UE, используемые для воспроизведения условий распространения радиоволн (PPV) в задачах сетевого позиционирования UE. В 2.4 рассмотрены процедуры и реализующие их программные модели приема и обработки сигналов PRS пользовательским устройством с результирующей оценкой координат UE.

### 2.1. Конфигурация территориального распределения gNB и UE

Предварительная конфигурация территориального распределения gNB и UE обусловлена необходимостью получения оптимистического геометрического фактора точности GDOP. В таком случае точность оценки координат UE при вторичной обработке опорных сигналов PRS, полученная в результате решения системы нелинейных уравнений РДМ метода, оказывается сопоставимой по порядку с точностью первичных РДМ измерений, полученных в результате приема и первичной обработки опорных сигналов PRS. Скрипт 1 содержит инициализацию числа кадров, несущей частоты, числа gNB и масштаб сценария территориального распределения gNB и пользовательского устройства в ИМ.

#### Скрипт 1. Инициализация параметров имитационной модели

```
clear all; clc; close all;
rng('default'); % генератор случайных чисел
% инициализация параметров имитационной модели
nFrames = 1; % число кадров по 10 мс
fc = 3e9; % несущая частота, Гц
% нумерологии стандарта 5G NR
NumRB=52; % число физических ресурсов блоков
SubcarrierSpacing=15; % разнос поднесущих, кГц
% параметры территориального распределения gNB и UE
UEPos = [0 0]; % конфигурация МП UE на плоскости
% конфигурация числа базовых станций gNB и их местоположений на плоскости
numgNBs = 5; % число gNB
rd=100; % масштабируемое расстояние между gNB от UE
% координаты gNB на плоскости в м
gNBPos = get_gNB_positions(numgNBs,rd);
% визуализация территориального расположения UE и gNB
plot_gNB_and_UE_positions(gNBPos,UEPos,1:numgNBs, rd);
```

Для получения территориального распределения базовых станций gNB с оптимистическим GDOP используется скрипт 2.

#### Скрипт 2. Расстановка gNB для оптимистического GDOP

```
function gNBPos = get_gNB_positions(numgNBs,rd)
% функция возврата массива случайных координат gNBs
for gNBIdx = 1:numgNBs
% расположение gNB случайно в пределах сектора
% gNBIdx*2*pi/numgNBs рад.
phi = gNBIdx*2*pi/numgNBs+rand(1,1)*2*pi/(2*numgNBs)-
2*pi/(2*numgNBs);
% расположение gNB случайно на удалении от UE
r = rd + (gNBIdx*rd/numgNBs) +
randi([0,rd/numgNBs],1,1);
% преобразование полярных координат в прямоугольные
[x,y] = pol2cart(phi,r);
gNBPos{gNBIdx} = [x,y];
end
end
```

Принцип расположения numgNBs базовых станций на плоскости заключается в следующем. Во-первых, каждая gNB с индексом gNBIdx располагается в своем секторе, угол раскрытия которого определяется в радианах как  $gNBIdx \cdot 2\pi / numgNBs$ . Во-вторых, каждая gNB с индексом gNBIdx располагается от пользовательского устройства на удалении  $rd + (gNBIdx \cdot rd / numgNBs) + randi([0, rd / numgNBs], 1, 1)$  с масштабируемым расстоянием rd. Данный прием обеспечивает равномерное увеличение расстояния с ростом gNBIdx таким образом, что первым по времени прихода TOA и наиболее мощным будет сигнал, принимаемый от gNB с первым индексом, которая выполняет роль опорной базовой станции при оценке TDOA.

Рисунок 1 показывает сценарий территориального распределения numgNBs базовых станций gNB и пользовательского устройства UE в начале координат.

Далее рассмотрим процедуры и реализующие их программные модели формирования и передачи сигналов PRS базовыми станциями gNB.

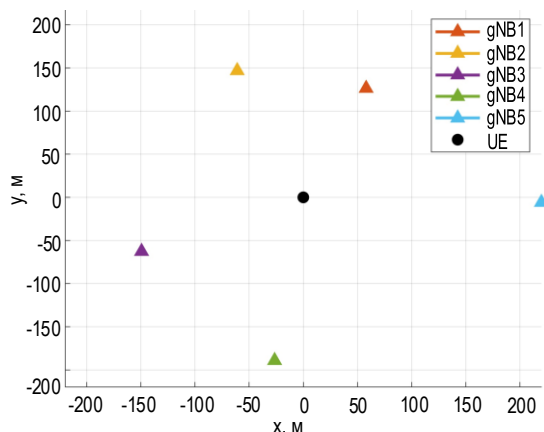


Рис. 1. Сценарий территориального распределения gNB и UE на плоскости

Fig. 1. Scenario of Terrestrial Distribution of gNB and UE on the Plane

## 2.2. Модели формирования и передачи сигналов PRS в gNB

### Конфигурация параметров несущей gNB

Скрипт 3 содержит конфигурацию параметров несущей carrier для всех gNB, работающих на одной частоте. Конфигурация осуществляется с использованием различных физических идентификаторов соты cellIds, которые инициализируются для numgNBs базовых станций случайным образом командой randperm(1008, numgNBs) - 1 в диапазоне от 0 до 1007.

#### Скрипт 3. Конфигурация параметров несущей gNB

```
% инициализация параметров несущей для базовых станций
% физические идентификаторы соты
cellIds = randperm(1008, numgNBs) - 1;
% конфигурация несущей для numgNBs базовых станций
carrier = repmat(nrCarrierConfig, 1, numgNBs);
for gNBIdx = 1:numgNBs
    carrier(gNBIdx).NCellID = cellIds(gNBIdx);
    carrier(gNBIdx).NSizeGrid = NumRB;
    carrier(gNBIdx).SubcarrierSpacing = SubcarrierSpacing;
end
validate_carriers(carrier); % проверка корректности
```

Для отдельной gNB конфигурация несущей осуществляется объектом nrCarrierConfig [43] пакета расширения 5G Toolbox [42]. Затем командой repmat(nrCarrierConfig, 1, numgNBs) данная конфигурация повторяется для numgNBs базовых станций. Объект nrCarrierConfig устанавливает конфигурацию несущей для стандартной нумерологии OFDM (аббр. от англ. Orthogonal Frequency Division Multiplexing) символов согласно 3GPP TS 38.211 [22] и определяет характеристики разноса поднесущих, ширины полосы, а также параметры сдвига относительно точки A, центра поднесущей 0 в общем ресурсном блоке CRB 0 (аббр. от англ. Common Resource Block) [29]. Для разноса поднесущих 60 кГц можно указать нормальный ('normal') или расширенный ('extended') циклический префикс (ЦП, от англ. CP – Cyclic Prefix). По умолчанию функция nrCarrierConfig инициализируется для сигнала с шириной полосы 10 МГц, что соответствует

52 РБ и разносом поднесущих 15 кГц. Корректность инициализированных параметров проверяет функция validate\_carriers(carrier). Таблица 1 содержит параметры объекта nrCarrierConfig [43] со значениями по умолчанию (Default).

ТАБЛИЦА 1. Параметры объекта nrCarrierConfig

TABLE 1. nrCarrierConfig Object Parameters

Параметры	Содержание
NCellID	идентификатор соты на физическом уровне; может принимать значения от 0 до 1007; по умолчанию: 1
Subcarrier-Spacing	разнос поднесущих для всех каналов и опорных сигналов; может принимать значения 15, 30, 60, 120, 240 кГц; по умолчанию: 15
Cyclic-Prefix	циклический префикс; может принимать значения 'normal' или 'extended'; 'normal' – нормальный ЦП соответствует 14 OFDM символам в слоте; 'extended' – расширенный ЦП соответствует 12 OFDM символам в слоте; для нумерологии, указанных в TS 38.211, расширенный ЦП применяется для разноса поднесущих 60 кГц; по умолчанию: 'normal'
NSizeGrid	количество РБ в ресурсной сетке несущей; может принимать значения от 1 до 275; значение 52 соответствует максимальному количеству РБ несущей 10 МГц с разносом поднесущих 15 кГц; по умолчанию: 52
NStartGrid	начало ресурсной сетки несущей относительно общего ресурсного блока CRB 0; может принимать значения от 0 до 2199; является параметром более высокого уровня offsetToCarrier; по умолчанию: 0
NSlot	номер слота в виде неотрицательного целого числа; можно установить NSlot в значение, превышающее количество слотов на кадр, тогда придется убедиться, что значение равно модулю количества слотов на кадр; по умолчанию: 0
NFrame	системный номер кадра SFN (аббр. от англ. System Frame Number); может принимать значения от 0 до 1023; можно установить NFrame в значение больше, чем максимальный номер кадра 1023, тогда придется убедиться, что значение равно модулю 1024; по умолчанию: 0
Symbols-PerSlot	количество OFDM символов на слот: 14 – для нормального ЦП; 12 – для расширенного ЦП; задается параметром CyclicPrefix; по умолчанию: 14
SlotsPer-Subframe	количество слотов на 1 субкадр 1 мс; может принимать значения 1, 2, 4, 8, 16; задается на основе параметра SubcarrierSpacing 15, 30, 60, 120 и 240, соответственно; по умолчанию: 1
SlotsPer-Frame	количество слотов на кадр 10 мс; может принимать значения 10, 20, 40, 80, 160; задается на основе параметра SubcarrierSpacing 15, 30, 60, 120 и 240, соответственно; по умолчанию: 10

### Конфигурация параметров сигналов PRS

Рассмотрим конфигурацию параметров опорных сигналов позиционирования PRS. Для конфигурации параметров сигналов PRS используется объект nrPRSConfig. По умолчанию объект инициа-

лизирует набор с одним ресурсом PRS, занимающим 52 ресурсных блока и охватывающий первые 12 OFDM символов на слот. В сочетании с системным объектом `nrCarrierConfig` по умолчанию `nrPRSConfig` выделяет полную полосу пропускания для передачи сигналов PRS. Таблица 2 содержит параметры `nrPRSConfig` [44]. Использование параметров объекта `nrPRSConfig` (см. таблица 2) проиллюстрировано в [29]. Скрипт 4 содержит параметры конфигурации сигналов PRS для разных базовых станций gNB в настоящей имитационной модели.

ТАБЛИЦА 2. Параметры объекта `nrPRSConfig`

TABLE 2. `nrPRSConfig` Object Parameters

Параметры	Содержание
PRS-Resource-SetPeriod	периодичность интервала и сдвиг интервала набора ресурсов PRS в виде опции; а) 'on' – все ресурсы PRS присутствуют в рабочем слоте; б) 'off' – в рабочем слоте отсутствуют все ресурсы PRS; в) двухэлементный вектор [TPRSPeriod, TPRSOffset], где TPRSPeriod – периодичность набора ресурсов; номинальное значение TPRSPeriod должно быть равно 2 <sup>n</sup> , умноженному на одно из значений в наборе {4, 5, 8, 10, 16, 20, 32, 40, 64, 80, 160, 320, 640, 1280, 2560, 5120, 10 240}, где n – конфигурация разности поднесущих со значением 0, 1, 2, 3; TPRSOffset – смещение слота набора ресурсов PRS в диапазоне [0, TPRSPeriod-1]; по умолчанию: 'on'
PRS-Resource-Offset	смещение/сдвиг слота каждого ресурса PRS (начиная с 0), предоставляемый параметром более высокого уровня d1-PRS-ResourceSlotOffset-r16 скаляром в диапазоне [0, 511] или вектором в диапазоне [0, 511]; свойство представляет смещение начального слота ресурса PRS относительно смещения набора ресурсов PRS TPRSOffset; по умолчанию: 0
PRS-Resource-Repetition	коэффициент повтора ресурса PRS, предоставляемый параметром более высокого уровня d1-PRS-ResourceRepetitionFactor-r16 как 1, 2, 4, 6, 8, 16, 32; значение свойства одинаково для всех ресурсов PRS в наборе ресурсов PRS; чтобы включить это свойство, для параметра PRSResourceSetPeriod задается вектор [TPRSPeriod, TPRSOffset]; по умолчанию: 1
PRS-Resource-TimeGap	смещение/разнос слотов между двумя последовательными повторяющимися экземплярами ресурса PRS, заданное как 1, 2, 4, 8, 16, 32; свойство представляет смещение в количестве слотов между двумя повторяющимися экземплярами ресурса PRS; значение этого свойства одинаково для всех ресурсов PRS в наборе ресурсов PRS; свойство предоставляется параметром более высокого уровня d1-PRS-ResourceTimeGap-r16; по умолчанию: 1
Muting-Pattern1	конфигурация битов для приглушения слотов PRS по варианту 1 в виде [] или вектора с двоичным знаком длины 2, 4, 6, 8, 16, 32; по умолчанию: []

Параметры	Содержание
MutingBit-Repetition	коэффициент повтора битов приглушения слотов PRS, предоставляемый параметром высокого уровня d1-PRS-MutingBitRepetitionFactor-r16, как 1, 2, 4, 8; это свойство указывает количество последовательных экземпляров набора ресурсов PRS, N, соответствующих каждому элементу параметра MutingPattern1; по умолчанию: 1
Muting-Pattern2	конфигурация битов для приглушения слотов PRS по варианту 2 в виде [] или вектора с двоичным значением длины 1, 2, 4, 6, 8, 16, 32; по умолчанию: []
NumPRS-Symbols	количество последовательных OFDM символов, выделенных для каждого ресурса PRS в виде скаляра в диапазоне [0, 12] или вектора в диапазоне [0, 12]; по умолчанию: 12
Symbol-Start	начальный OFDM символ каждого ресурса PRS в слоте (начиная с 0) в виде скаляра в диапазоне [0, 13] или вектора целых чисел в диапазоне [0, 13]; по умолчанию: 0
NumRB	количество физических ресурсных блоков PRB, выделенных для всех ресурсов PRS в наборе ресурсов в виде скаляра в диапазоне [0, 275]; по умолчанию: 52
RBOffset	начальный индекс PRB всех ресурсов PRS относительно сетки ресурсов несущей carrier в виде скаляра в области значений [0, 274]; по умолчанию: 0
CombSize	размер гребенки (плотность) всех ресурсов PRS в наборе ресурсов, указанный как 2, 4, 6, 12; размер гребенки представляет интервал ресурсных элементов RE; это свойство предоставляется параметром более высокого уровня d1-PRS-CombSizeN-r16; значение 2 указывает, что объект должен выделять каждый 2-й ресурсный элемент RE в физическом ресурсном блоке PRB для сигнала PRS, 4 указывает, что выделяется каждый 4-й RE в PRB для PRS и т.д.; по умолчанию: 2
REOffset	начальное смещение ресурсного элемента RE в первом PRS OFDM символе каждого ресурса PRS в виде скаляра или вектора целых чисел в диапазоне [0, (CombSize-1)]; относительные смещения в RE следующих PRS OFDM символов определяются относительно значения REOffset; по умолчанию: 0
NPRSID	идентификатор последовательности каждого ресурса PRS, предоставляемый параметром более высокого уровня d1-PRS-SequenceID-r16, заданным как скаляр или вектор целых чисел в диапазоне [0, 4095]; по умолчанию: 0
Freq-ucency-Offset-Table	таблица сдвига частот размером 4 на 13; свойство доступно только для чтения; таблица содержит относительные смещения ресурсных элементов в каждом OFDM символе PRS, определенном относительно свойства REOffset, в соответствии с TS 38.211 [22]; четыре строки в таблице соответствуют четырем значениям свойства CombSize; 13 столбцов в таблице соответствуют номерам OFDM символов в распределении ресурсов PRS от 0 до 12; объект автоматически устанавливает это свойство на основе TS 38.211 [22]



**Скрипт 4. Конфигурация параметров сигналов PRS**

```

% вектор сдвигов слотов ресурсов PRS
prsSlotOffsets = 0:2:(2*numgNBs - 1);
% вектор индексов PRS
prsIDs = randperm(4096,numgNBs) - 1;
% конфигурация свойств PRS
prs = nrPRSCONFIG; % конфигурация набора ресурсов PRS
% периодичность/сдвиг набора ресурсов PRS
prs.PRSResourceSetPeriod=[10 0];
% сдвиг слота каждого ресурса PRS
prs.PRSResourceOffset = 0;
% коэффициент повтора ресурсов PRS
prs.PRSResourceRepetition = 1;
% разнос слотов между двумя последовательными
% повторяющимися экземплярами ресурса PRS
prs.PRSResourceTimeGap = 1;
% конфигурация битов для приглушения
% слотов PRS по варианту 1
prs.MutingPattern1 = [];
% конфигурация битов для приглушения
% слотов PRS по варианту 2
prs.MutingPattern2 = [];
% количество последовательных OFDM символов,
% выделенных для каждого ресурса PRS
prs.NumPRSSymbols = 12;
% начальный символ OFDM каждого ресурса PRS в слоте
prs.SymbolStart = 0;
% количество физических PRB,
% выделенных для всех ресурсов PRS
prs.NumRB = NumRB;
% начальный индекс PRB всех ресурсов PRS
% относительно сетки ресурсов
prs.RBOffset = 0;
% размер гребенки (плотность) всех ресурсов PRS
prs.CombSize = 12;
% конфигурация prs для numgNBs базовых станций
prs = repmat(prs,1,numgNBs);
for gNBIdx = 1:numgNBs
    prs(gNBIdx).PRSResourceOffset =
    prsSlotOffsets(gNBIdx);
    prs(gNBIdx).PRSID = prsIDs(gNBIdx);
end

```

Затем командой `repmat(prs,1,numgNBs)` данная конфигурация повторяется для `numgNBs` базовых станций `gNB` ИМ с различными параметрами сдвигов слотов `prsSlotOffsets` и индексами PRS `prsIDs`. Конфигурация параметров ресурсов PRS осуществляется так, чтобы исключить одновременное наложение сигналов PRS отдельных `gNB` друг на друга и, таким образом, нивелировать проблему слышимости [29]. Вообще, наложение сигналов PRS в частотно-временной ресурсной сетке можно исключить, например, используя неперекрывающиеся распределения символов во временном домене или ресурсных элементов в частотном домене; также возможно использование режима «приглушения». В настоящей ИМ используются различные сдвиги слотов `prsSlotOffsets` с индексами `prsIDs` от разных базовых станций `gNB` для исключения их взаимного наложения (см. рисунки 2–4).

**Конфигурация параметров канала PDSCH**

Рассмотрим конфигурацию параметров физического распределенного/общего канала «вниз» PDSCH (аббр. от англ. Physical Downlink Shared Channel). Конфигурация канала PDSCH в пакете рас-

ширения 5G Toolbox [42] осуществляется с использованием объекта `nrPDSCHConfig` [44] согласно 3GPP TS 38.211 [15]. Объект `nrPDSCHConfig` определяет параметры обработки сигналов в канале PDSCH, включая параметры скремблирования, модуляции, отображения на слои, перемежение виртуальных VRB (аббр. от англ. Virtual Resource Blocks) и физических PRB ресурсных блоков, а также сопоставление ресурсных элементов RE (аббр. от англ. Resource Element) с шаблонами зарезервированных ресурсов. Объект `nrPDSCHConfig` также содержит свойства ассоциированных с каналом PDSCH физических опорных сигналов, таких как, опорный сигнал демодуляции DM-RS (аббр. от англ. Demodulation Reference Signal) и опорный сигнал слежения за фазой PT-RS (аббр. от англ. Phase Tracking Reference Signal). По умолчанию объект `nrPDSCHConfig` конфигурирует однослойный (в одном частотном домене) канал PDSCH с отображением типа A, квадратурной фазовой манипуляцией QPSK (аббр. от англ. Quadrature Phase Shift Keying), выделением в частотно-временной ресурсной сетке 52 ресурсных блоков и 14 OFDM символов в слоте. Таблица 3 содержит параметры `nrPRSCONFIG` [45].

**ТАБЛИЦА 3. Параметры объекта `nrPDSCHConfig`**TABLE 3. `nrPDSCHConfig` Object Parameters

Параметры	Содержание
NSizeBWP	количество физических ресурсных блоков PRB в части полосы пропускания BWP (Bandwidth Part); может принимать значения от 1 до 275; значение по умолчанию [] используется для установки этого параметра в свойство NSizeGrid объекта <code>nrCarrierConfig</code> ; по умолчанию: []
NStartBWP	начальный индекс физического ресурсного блока PRB в части полосы пропускания BWP относительно общего ресурсного блока CRB 0; может принимать значения от 0 до 2473; значение по умолчанию [] используется для установки этого параметра в свойство NStartGrid объекта <code>nrCarrierConfig</code> ; по умолчанию: []
ReservedPRB	зарезервированные физические ресурсные блоки PRB и шаблон OFDM символов в части полосы пропускания BWP; по умолчанию: <code>nrPDSCH-Reserved-Config</code>
ReservedRE	зарезервированные индексы RE в BWP в виде вектора неотрицательных целых чисел; параметр задает индексы RE (отсчитываемые от 0), которые недоступны для PDSCH из-за наличия в конкретном слоте опорного сигнала информации о состоянии канала CSI-RS (аббр. от англ. Channel State Information Reference Signal) или опорного сигнала соты; по умолчанию: []
Modulation	схема модуляции 'QPSK', '16QAM', '64QAM' или '256QAM'; параметр определяет тип модуляции кодовых слов и количество битов, используемых на символ модуляции; по умолчанию: 'QPSK'
NumLayers	количество уровней передачи в виде целого числа от 1 до 8; для одного кодового слова указывается целое число от 1 до 4; для двух кодовых слов указывается целое число от 5 до 8; по умолчанию: 1

Параметры	Содержание
Mapping-Type	тип сопоставления/отображения физического общего канала в виде 'A' или 'B'; по умолчанию: 'A'
Symbol-Allocation	распределение OFDM символов физического общего канала в виде двухэлементного вектора неотрицательных целых чисел; первый элемент параметра представляет собой начало выделения для символа, начиная с 0; второй элемент представляет количество выделенных OFDM символов; при установлении параметра в [] или второго элемента вектора в 0, для общего канала не выделяются OFDM символы; по умолчанию: [0 14]
PRBSet	распределение физических ресурсных блоков PRB общего канала PDSCH в части полосы пропускания BWP в виде вектора целых чисел от 0 до 274; по умолчанию: [0:51]
VRBToPRB Inter-leaving	отключение/включение чередования VRB-PRB в виде одного из значений: 0 – отключить чередование VRB-PRB; 1 – включить чередование VRB-PRB; по умолчанию: 0
VRBBundle-Size	параметр размера пучка VRB с точки зрения количества PRB для перемежения VRB-PRB, заданный как 2 или 4; параметр активен, если значение VRBToPRBInterleaving равно 1; по умолчанию: 2
NID	идентификатор скремблирования в канале PDSCH в виде [] или целого числа от 0 до 1023; если настроен параметр более высокого уровня dataScramblingIdentityPDSCH, то NID должен находиться в диапазоне от 0 до 1023; если параметр dataScramblingIdentityPDSCH не настроен, NID должен находиться в диапазоне от 0 до 1007; при установлении параметра как [], объект устанавливает идентификатор скремблирования в канале PDSCH на идентификатор соты на физическом уровне, заданный свойством NCellID несущей carrier; по умолчанию: []
RNTI	временный идентификатор сети радиодоступа пользовательского устройства UE, заданный как целое число от 0 до 65535; по умолчанию: 1
DMRS	параметры конфигурации PDSCH DM-RS в виде объекта nrPDSCHDMRSConfig; по умолчанию: nrPDSCH-DMRS-Config
EnablePTRS	отключение/включение PT-RS: 0 (false) – отключить настройку PT-RS; 1 (true) – включить конфигурацию PT-RS; по умолчанию: 0
PTRS	конфигурация PDSCH PT-RS в виде объекта nrPDSCHPTRSConfig; по умолчанию: nrPDSCH-PTRS-Config

Скрипт 5 содержит параметры конфигурации канала PDSCH для разных базовых станций gNB в настоящей ИМ.

#### Скрипт 5. Конфигурация параметров канала PDSCH

```
% конфигурация параметров канала PDSCH
pdsch = nrPDSCHConfig; % конфигурация канала PDSCH
% распределение физических ресурсных блоков
pdsch.PRBSet = 0:NumRB-1;
% распределение OFDM символов
pdsch.SymbolAllocation = [0 14];
% номер группы CDM DM-RS без данных
pdsch.DMRS.NumCDMGroupsWithoutData = 1;
% конфигурация pdsch для numgNBs базовых станций
pdsch = repmat(pdsch,1,numgNBs);
validate_num_layers(pdsch); % проверка корректности
```

Объект nrPDSCHDMRSConfig устанавливает параметры конфигурации опорного сигнала демодуляции DM-RS для физического общего канала «вниз» PDSCH и используется при настройке свойства DMRS. Объект nrPDSCHConfig определяет свойства генерации символов и индексов DM-RS в канале PDSCH, а также шаблон ресурсных элементов, не используемый для передачи данных в местах расположения символов DM-RS. Доступные только для чтения свойства этого объекта предоставляют положения поднесущих DM-RS в ресурсном блоке RB, группы мультиплексирования с кодовым разделением каналов CDM (*аббр. от англ.* Code Division Multiplexing), а также весовые коэффициенты символов DM-RS в частотно-временной ресурсной сетке. Объект nrPDSCHDMRSConfig по умолчанию определяет один символ DM-RS с индексом символа 2 (начиная с 0) с типом конфигурации 1 и антенным портом 0. Параметр NumCDMGroupsWithoutData (см. скрипт 5) объекта nrPDSCHDMRSConfig определяет количество групп CDM DM-RS без данных в виде числа 1, 2 или 3. Каждое значение указывает на различный набор номеров групп CDM согласно TS 38.214 [24]: 1 – номер группы CDM 0; 2 – номера группы CDM 0 и 1; 3 – номера группы CDM 0, 1 и 2. В настоящей ИМ используется номер 1 группы CDM DM-RS без данных. Далее в ИМ формируется массив одинаковых каналов PDSCH для numgNBs базовых станций командой `pdsch = repmat(pdsch,1,numgNBs)`. Корректность инициализации каналов PDSCH проверяется функцией `validate_num_layers(pdsch)`.

#### Формирование сигналов PRS и каналов PDSCH

Первичные РДМ измерения осуществляются пользовательскими устройствами UE по синхронно излучаемым базовыми станциями gNB сигналам PRS. Для исключения проблемы одновременной слышимости UE сигналов PRS нескольких gNB выделяемые базовым станциям для их передачи ресурсы конфигурируются в канале PDSCH специальным образом. Рассмотрим процедуры формирования ресурсов сигналов PRS и канала PDSCH для всех базовых станций gNB. Скрипт 6 содержит процедуры формирования ресурсов PRS и PDSCH.

#### Скрипт 6. Формирование ресурсов PRS и PDSCH

```
% формирование ресурсов PRS и PDSCH
% общее число слотов в ИМ
totSlots = nFrames*carrier(1).SlotsPerFrame;
% частотно-временная ресурсная сетка сигналов PRS
prsGrid = cell(1,numgNBs);
% частотно-временная ресурсная сетка данных
dataGrid = cell(1,numgNBs);
for slotIdx = 0:totSlots-1 % цикл по числу слотов ИМ
    [carrier(:).NSlot] = deal(slotIdx);
    [prsSym,prsInd] = deal(cell(1,numgNBs));
    for gNBIdx = 1:numgNBs % цикл по числу numgNBs
        % формирование пустой ресурсной сетки,
        % занимающей один слот во временном домене
        slotGrid = nrResourceGrid(carrier(gNBIdx),1);
        % формирование символов и индексов PRS
        prsSym{gNBIdx} = nrPRS(carrier(gNBIdx),prs(gNBIdx));
```



```

prsInd{gNBIdx} = nrPRSIndices(carrier(gNBIdx),prs(gNBIdx));
% отображение ресурсов сигналов PRS на сетку слота
slotGrid{prsInd{gNBIdx}} = prsSym{gNBIdx};
prsGrid{gNBIdx} = [prsGrid{gNBIdx} slotGrid];
end
% передача данных в слотах, где не передаются PRS
% ни от одной gNB для контроля проблемы слышимости
for gNBIdx = 1:numgNBs
dataSlotGrid = nrResourceGrid(carrier(gNBIdx),1);
% проверка занятости ресурсов
if all(cellfun(@isempty,prsInd))
% формирование индексов PDSCH
[pdschInd,pdschInfo] =
nrPDSCHIndices(carrier(gNBIdx),pdsch(gNBIdx));
% формирование случайных бит для передачи
data = randi([0 1],pdschInfo.G,1);
% формирование символов PDSCH
pdschSym = nrPDSCH(carrier(gNBIdx),pdsch(gNBIdx),data);
% формирование индексов и символов опорных сигналов
% демодуляции DM-RS (demodulation reference signal)
dmrsInd = nrPDSCHDMRSIndices(carrier(gNBIdx),pdsch(gNBIdx));
dmrsSym = nrPDSCHDMRS(carrier(gNBIdx),pdsch(gNBIdx));
% отображение сигналов PDSCH и соответствующего
% ему сигнала DM-RS на ресурсную сетку слота
dataSlotGrid(pdschInd) = pdschSym;
dataSlotGrid(dmrsInd) = dmrsSym;
end
dataGrid{gNBIdx} = [dataGrid{gNBIdx} dataSlotGrid];
end
end

```

Улучшение слышимости сигналов PRS от разных базовых станций обеспечивается за счет того, что передача ресурсов канала PDSCH осуществляется gNB в слотах, не занятых ресурсами PRS. Для этого в ИМ для каждой gNB формируется отдельная структура частотно-временной сетки ресурсов сигналов PRS `prsGrid = cell(1,numgNBs)` и отдельная структура частотно-временной сетки ресурсов канала PDSCH `dataGrid = cell(1,numgNBs)`. Общее количество слотов для передачи gNB определяется как произведение числа кадров на число слотов в кадре: `totSlots = nFrames*carrier(1).SlotsPerFrame`. В цикле по числу слотов для каждой базовой станции выполняется заполнение сетки ресурсов сигналов PRS `prsGrid` и ресурсов канала PDSCH `dataGrid`.

Рассмотрим процедуры заполнения сетки ресурсов `prsGrid` (см. скрипт 6). Сначала для каждой gNB формируется пустая частотно-временная ресурсная сетка `slotGrid` командой `nrResourceGrid` [46], занимающая один слот во временном домене. Затем командами `nrPRSIndices` [47] и `nrPRS` [48] формируются индексы `prsInd{gNBIdx}` и символы `prsSym{gNBIdx}` соответствующих ресурсных элементов PRS в частотно-временной ресурсной сетке по каждому индексу базовой станции `gNBIdx`. Далее для каждой базовой станции с индексом `gNBIdx` выполняется отображение символов `prsSym` с заданными индексами `prsInd` на частотно временную ресурсную сетку `slotGrid`. Таким образом, в цикле по `gNBIdx` заполняется частотно временная ресурсная сетка `prsGrid` для всех gNB имитационной модели.

Рассмотрим процедуры заполнения сетки ресурсов `dataGrid` (см. скрипт 6). Для каждой gNB формируется пустая частотно-временная ресурсная сетка `dataSlotGrid` командой `nrResourceGrid` [46], занимающая один слот во временном домене. Процедуры заполнения сетки `dataSlotGrid` выполняются только в тех слотах, которые не заняты ресурсами PRS. Затем командами `nrPDSCHIndices` [49] и `nrPDSCH` [50] формируются индексы `pdschInd` и символы `pdschSym` соответствующих ресурсных элементов PDSCH в частотно-временной ресурсной сетке по каждому индексу базовой станции `gNBIdx`. Дополнительно командами `nrPDSCHDMRSIndices` [51] и `nrPDSCHDMRS` [52] формируются индексы `dmrsInd` и символы `dmrsSym` соответствующих ресурсных элементов опорных сигналов демодуляции DM-RS. Далее для каждой базовой станции с индексом `gNBIdx` выполняется отображение символов `pdschSym` с заданными индексами `pdschInd`, а также символов `dmrsSym` с заданными индексами `dmrsInd`, на частотно временную сетку `dataSlotGrid`. Таким образом, в цикле по `gNBIdx` заполняется частотно временная сетка `dataGrid` для всех базовых станций имитационной модели.

Рисунок 2 иллюстрирует частотно-временную сетку несущей с ресурсами PRS и PDSCH от `numgNBs` базовых станций для рассматриваемого сценария ИМ. Число используемых поднесущих определяется числом физических ресурсных блоков `prs.NumRB = 52` (см. скрипт 4), в каждом из которых 12 поднесущих, т. е. всего 624 поднесущих в частотном домене ресурсной сетки. Количество OFDM символов в одном кадре определяется числом слотов в кадре `carrier(1).SlotsPerFrame=10`, в каждом из которых 14 OFDM символов для нормального циклического префикса, т. е. всего 140 OFDM символов во временном домене ресурсной сетки.

Рисунки 3 и 4 масштабируют (+) рисунок 2 и иллюстрируют фрагменты сетки несущей с ресурсами PRS для `gNB1` и `gNB2`, соответственно. В частотном домене распределение ресурсов PRS использует одинаковый шаблон. Во временном домене качественный анализ распределения ресурсных элементов PRS на примере базовых станций `gNB1` и `gNB2` показывает, что они разнесены с различными сдвигами слотов `prsSlotOffsets` (см. скрипт 4); вектор сдвигов слотов всех gNB в настоящей ИМ равен `prsSlotOffsets = [0 2 4 6 8]` (см. рисунок 2).

## Модуляция OFDM

После формирование частотно-временной ресурсной сетки сигналов PRS и каналов PDSCH выполняется модуляция OFDM. Скрипт содержит реализацию процедуры OFDM с использованием функции `nrOFDMModulate` [53].

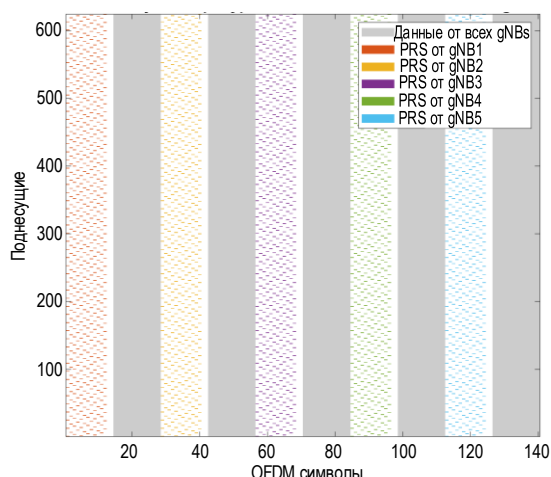


Рис. 2. Сетка несущей с PRS и PDSCH нескольких gNB  
Fig. 2. Carrier Grid with PRS and PDSCH from Multiple gNBs

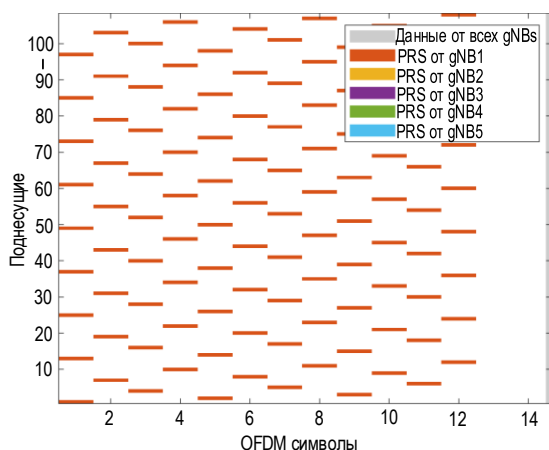


Рис. 3. Фрагмент сетки несущей с ресурсами PRS для gNB<sub>1</sub>  
Fig. 3. Carrier Grid with PRS Resources for gNB<sub>1</sub>

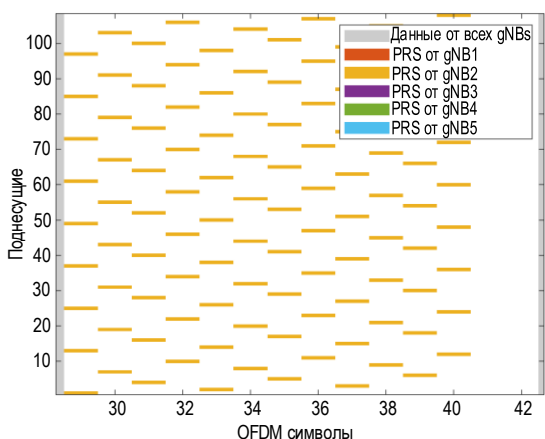


Рис. 4. Фрагмент сетки несущей с ресурсами PRS для gNB<sub>2</sub>  
Fig. 4. Carrier Grid with PRS Resources for gNB<sub>2</sub>

#### Скрипт 7. Модуляция OFDM

```
% модуляция OFDM сигналов PRS и данных PDSCH каждой gNB
txWaveform = cell(1,numgNBs);
for waveIdx = 1:numgNBs
    carrier(waveIdx).NSlot = 0;
    txWaveform{waveIdx} = ...
        nrOFDMModulate(carrier(waveIdx),prsGrid{waveIdx}
+ dataGrid{waveIdx});
end
```

Входными аргументами функции nrOFDMModulate являются объект конфигурации несущей carrier(waveIdx) для каждого индекса радиосигнала базовой станции waveIdx, а также частотно-временная ресурсная сетка, образованная суммой сигналов PRS и данных каналов PDSCH prsGrid{waveIdx} + dataGrid{waveIdx}.

Размерность массива комплекснозначных чисел частотно-временной ресурсной сетки в рассматриваемом сценарии ИМ для каждой gNB равна  $\mathbb{C}^{624 \times 140}$ , где размерность в частотном домене определяется произведением 52 физических ресурсных блоков на 12 поднесущих в каждом, а размерность во временном домене определяется произведением 10 слотов на 14 OFDM символов в каждом. В результате модуляции OFDM размерность вектора комплекснозначных чисел txWaveform во временном домене получается равной  $\mathbb{C}^{153600 \times 1}$ .

Встроенная функция nrOFDMInfo [54] служит для извлечения характеристик модуляции OFDM по параметрам сконфигурированного объекта несущей carrier. Для OFDM нумерологии определяющими в объекте carrier являются значения числа физических ресурсных блоков NSizeGrid, разности поднесущих SubcarrierSpacing и циклического префикса CyclicPrefix. Таблица 4 содержит описание выходных параметров функции nrOFDMInfo.

ТАБЛИЦА 4. Выходные параметры функции nrOFDMInfo

TABLE 4. nrOFDMInfo Function Output Parameters

Параметр	Содержание
Nfft	размерность быстрого преобразования Фурье (БПФ, от англ. FFT – Fast Fourier Transform) Nfft, принимает значение от 127; значение Nfft должно приводить к целочисленной длине ЦП и максимальной заполняемости 100 %; заполняемость определяется как $(12 \times N_{RB}) / Nfft$ , где $N_{RB}$ – число ресурсных блоков; размерность БПФ выбирается с учетом частоты дискретизации SampleRate; если частота дискретизации не инициализируется как входной параметр, то размерность БПФ Nfft выбирается как четная степень двойки и приводит к максимальной заполняемости в 85 %; если частота дискретизации инициализируется как входной параметр, то размерность БПФ Nfft должна приводить к целочисленной длине ЦП и максимизировать наибольший общий делитель $\gcd(Nfft \times SCS, SampleRate)$ , где $\gcd$ (от англ. Greatest Common Divisor), SCS – разность поднесущих
SampleRate	частота дискретизации в Гц; если частота дискретизации не инициализируется как входной параметр, то SampleRate выбирается как произведение $Nfft \times SCS$ , где Nfft – размерность БПФ, SCS – разность поднесущих

Параметр	Содержание
Cyclic-Prefix-Lengths	вектор-строка длин циклического префикса (ЦП); длина ЦП измеряется числом выборок; ЦП может быть 'normal' или 'extended'; длина вектора строки CyclicPrefixLengths определяется числом OFDM символов в субкадре (слоте); по умолчанию используется нормальный ЦП, что соответствует слоту из 14 OFDM символов; расширенный ЦП соответствует слоту из 12 OFDM символов и используется при разносе поднесущих 60 кГц
SymbolLengths	вектор-строка длин OFDM символов в числе выборок; длина вектора строки SymbolLengths определяется числом OFDM символов в субкадре (слоте)
Windowing	параметр оконного сглаживания OFDM символов, равный числу выборок во временной области, на интервале которых производится сглаживание; если число выборок для оконного сглаживания не инициализируется как входной параметр, то он устанавливается максимальным и равным значению $E = \text{floor}((N_{CP} - W) \times \text{info.Nfft} / N_{FFT, \text{nominal}})$ , где $N_{CP}$ – длина ЦП; $W$ – длина окна модуля вектора ошибки EVM (аббр. от англ. Error Vector Magnitude)
Symbol-Phases	вектор-строка чисел в диапазоне $[-\pi, \pi]$ радиан; параметр используется для компенсации фазового сдвига в каждом OFDM символе; длина вектора SymbolPhases определяется числом OFDM символов в субкадре (слоте)
Symbols-PerSlot	число OFDM символов в слоте
Slots-PerSubframe	число слотов в субкадре длительностью 1 мс
Slots-PerFrame	число слотов в кадре длительностью 10 мс

Далее рассмотрим моделирование задержек и потерь при распространении радиоволн в радиоканале gNB-UE.

### 2.3. Модели радиоканала gNB-UE

Конфигурация параметров потерь распространения радиоволн

Рассмотрим конфигурацию параметров потерь РРВ. Для конфигурации потерь РРВ в сетях 5G NR согласно 3GPP TR 38.901 [28] используется объект nrPathLossConfig [55]. В соответствии со сценариями 3GPP TR 38.901 [28] различают следующие типы моделей распространения радиоволн снаружи помещений: макросоты в сельской местности RMa, макросоты города UMa, микросоты в городе UMi. По умолчанию объект nrPathLossConfig конфигурирует сценарий макросоты города снаружи помещений UMa с высотой окружающих объектов, равной 1 м.

Таблица 5 содержит параметры nrPathLossConfig. Скрипт 8 – конфигурацию потерь РРВ, а также признака наличия прямой видимости LOS (аббр. от англ. Line of Sight) в радиолиниях gNB-UE.

ТАБЛИЦА 5. Параметры объекта nrPathLossConfig

TABLE 5. nrPathLossConfig Object Parameters

Параметры	Содержание
Scenario	сценарий РРВ задается следующими параметрами: 'UMa' – макросота в городе (аббр. от англ. Urban macrocell); 'UMi' – микросота в городе (аббр. от англ. Urban microcell); 'RMa' – макросота в сельской местности (аббр. от англ. Rural Macrocell); 'InH' – точка доступа внутри помещения (аббр. от англ. Indoor hotspot); 'InF-SL' – крытая фабрика с редким расположением рассеивателей и низкой высотой подвеса антенны базовой станции (аббр. от англ. Indoor Factory with Sparse clutter and Low base station height); 'InF-DL' – крытый завод с плотным расположением рассеивателей и низкой высотой подвеса антенны базовой станции (аббр. от англ. Indoor Factory with Dense clutter and Low base station height); 'InF-SH' – крытый завод с редким расположением рассеивателей и большой высотой подвеса антенны базовой станции (аббр. от англ. Indoor Factory with Sparse clutter and High base station height); 'InF-DH' – крытый завод с плотным расположением рассеивателей и большой высотой подвеса антенны базовой станции (аббр. от англ. Indoor Factory with Dense clutter and High base station height); 'InF-HH' – крытый завод с большой высотой подвеса антенны передатчика и большой высотой подвеса антенны приемника по умолчанию (аббр. от англ. Indoor Factory with High base station height)
BuildingHeight	средняя высота здания в метрах в сценарии макросоты в сельской местности в виде скаляра в диапазоне от 5 до 50; чтобы включить это свойство, параметр Scenario следует установить в 'RMa'; по умолчанию: 5
StreetWidth	средняя ширина улицы в метрах в сценарии макросоты в сельской местности в виде скаляра в диапазоне от 5 до 50; чтобы включить это свойство, параметр Scenario следует установить в 'RMa'; по умолчанию: 20
EnvironmentHeight	средняя высота объектов среды РРВ в метрах в сценарии макросоты или микросоты в городе в виде скаляра или матрицы размера $N_{BS} \times N_{UE}$ , где $N_{BS}$ – количество базовых станций, $N_{UE}$ – количество пользовательских устройств; чтобы включить это свойство, параметр Scenario следует установить в 'UMa' или 'UMi'; по умолчанию: 1
OptionalModel	опциональная модель потерь РРВ, определяемая логическим значением: 0 (false) – в конфигурации не используется дополнительная модель потерь РРВ; 1 (true) – в конфигурации используется дополнительная модель потерь РРВ согласно TR 38.901 [28] для сценариев макросоты и микросоты в городе, а также и точки доступа внутри помещения; чтобы включить это свойство, параметр Scenario следует установить в 'UMa', 'UMi' или 'InH'; по умолчанию: 0



**Скрипт 8. Конфигурация параметров потерь PPB**

```
plCfg = nrPathLossConfig;
plCfg.Scenario = 'Uma';
% высота здания в м; для сценария 'Rma'
plCfg.BuildingHeight = 5;
% ширина улицы в м; для сценария 'Rma'
plCfg.StreetWidth = 5;
% высота объектов среды в м; для 'Uма' и 'UMi'
plCfg.EnvironmentHeight = 2;
% конфигурация признака LOS
% в радиолнии между каждой парой gNB и UE
los = [true false true false true];
```

Рисунок 5 иллюстрирует сценарий оценки потерь PPB снаружи помещений согласно 3GPP TR 38.901. Таблица 6 содержит выражения для оценки потерь PPB, а таблица 7 – выражения для оценки вероятности LOS в сценариях снаружи помещений

согласно 3GPP TR 38.901 [28]. Критерий LOS в рассматриваемой ИМ инициализируется вектором:  $los = [true \ true \ false \ true \ false]$ .

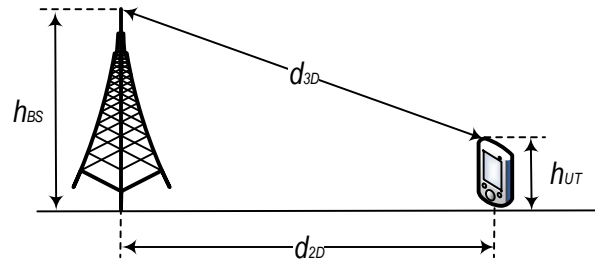


Рис. 5. Сценарий модели оценки потерь PPB снаружи помещений

Fig. 5. Scenario of Outdoor Model of the Pathloss Estimation

**ТАБЛИЦА 6. Модели оценки потерь PPB снаружи помещений**

TABLE 6. Outdoor Model of the Pathloss Estimation

Сценарий	LOS/ NLOS	Потери PPB $PL$ , дБ; несущая частота $f_c$ , ГГц; расстояние $d$ , м	СКО медленных за- мираний, $\sigma_{SF}$ , дБ	Допустимые пределы использования
RMa	LOS	$PL_{RMa-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10 \text{ м} \leq d_{2D} \leq d_{BP} \\ PL_2 & d_{BP} \leq d_{2D} \leq 10 \text{ км} \end{cases}$ $d_{BP} = 2\pi h_{BS} h_{UT} f_c / c$ ; $f_c$ [Гц]; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ $PL_1 = 20\lg(40\pi d_{3D} f_c / 3) + \min(0,03h^{1,72}, 10)\lg(d_{3D}) - \min(0,044h^{1,72}, 14,77) + 0,002\lg(h)d_{3D}$ $PL_2 = PL_1(d_{BP}) + 40\lg(d_{3D}/d_{BP})$	$\sigma_{SF} = 4$  $\sigma_{SF} = 6$	$h_{BS} = 35 \text{ м}$ $h_{UT} = 1,5 \text{ м}$ $W = 20 \text{ м}$ $h = 5 \text{ м}$ $h$ – средняя высота здания; $W$ – средняя ширина улицы;
	NLOS	$PL_{RMa-NLOS} = \max(PL_{RMa-LOS}, PL'_{RMa-NLOS})$ при $10 \text{ м} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ км}$ $PL'_{RMa-NLOS} = 161,04 - 7,1\lg(W) + 7,5\lg(h) - (24,37 - 3,7(h/h_{BS})^2)\lg(h_{BS}) + (43,42 - 3,1\lg(h_{BS}))(\lg(d_{3D}) - 3) + 20\lg(f_c) - (3,2(\lg(11,75h_{UT}))^2 - 4,97)$	$\sigma_{SF} = 8$	$5 \text{ м} \leq h \leq 50 \text{ м}$ $5 \text{ м} \leq W \leq 50 \text{ м}$ $10 \text{ м} \leq h_{BS} \leq 150 \text{ м}$ $1 \text{ м} \leq h_{UT} \leq 10 \text{ м}$
UMa	LOS	$PL_{UMa-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10 \text{ м} \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ км} \end{cases}$ $PL_1 = 28 + 22\lg(d_{3D}) + 20\lg(f_c)$ $PL_2 = 28 + 40\lg(d_{3D}) + 20\lg(f_c) - 9\lg((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$ $d'_{BP} = 4h_{BS}h_{UT}f_c/c$ ; $f_c$ [Гц]; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ $h'_{BS} = h_{BS} - h_E$ ; $h'_{UT} = h_{UT} - h_E$ $h_E = \begin{cases} 1 \text{ м с вер. } p = 1/(1 + C(d_{2D}, h_{UT})) \\ \text{rand}(12,15, \dots (h_{UT} - 1,5)) \text{ в др.} \end{cases}$ $C(d_{2D}, h_{UT}) = \begin{cases} 0, h_{UT} \leq 13 \text{ м} \\ \left(\frac{h_{UT}-1,5}{10}\right)^{1,5} g(d_{2D}), 13 \text{ м} \leq h_{UT} \leq 23 \text{ м} \end{cases}$	$\sigma_{SF} = 4$	$1,5 \text{ м} \leq h_{UT} \leq 22,5 \text{ м}$ $h_{BS} = 25 \text{ м}$
	NLOS	$PL_{UMa-NLOS} = \max(PL_{UMa-LOS}, PL'_{UMa-NLOS})$ при $10 \text{ м} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ км}$ $PL'_{UMa-NLOS} = 13,54 + 39,08\lg(d_{3D}) + 20\lg(f_c) - 0,6(h_{UT} - 1,5)$	$\sigma_{SF} = 6$	
		Опц. $PL = 32,4 + 20\lg(f_c) + 30\lg(d_{3D})$	$\sigma_{SF} = 7,8$	
UMi	LOS	$PL_{UMi-LOS} = \begin{cases} PL_1 & 10 \text{ м} \leq d_{2D} \leq d'_{BP} \\ PL_2 & d'_{BP} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ км} \end{cases}$ $PL_1 = 32,4 + 21\lg(d_{3D}) + 20\lg(f_c)$ $PL_2 = 32,4 + 40\lg(d_{3D}) + 20\lg(f_c) - 9,5\lg((d'_{BP})^2 + (h_{BS} - h_{UT})^2)$	$\sigma_{SF} = 4$	$1,5 \text{ м} \leq h_{UT} \leq 22,5 \text{ м}$ $h_{BS} = 10 \text{ м}$
	NLOS	$PL_{UMi-NLOS} = \max(PL_{UMi-LOS}, PL'_{UMi-NLOS})$ при $10 \text{ м} \leq d_{2D} \leq 5 \text{ км}$ $PL'_{UMi-NLOS} = 35,3\lg(d_{3D}) + 22,4 + 21,3\lg(f_c) - 0,3(h_{UT} - 1,5)$	$\sigma_{SF} = 7,82$	
		Опц. $PL = 32,4 + 20\lg(f_c) + 31,9\lg(d_{3D})$	$\sigma_{SF} = 8,2$	

ТАБЛИЦА 7. Вероятность LOS снаружи помещений

TABLE 7. Outdoor LOS Probability

Сценарий	Вероятность прямой видимости
RMa	$P_{LOS} = \begin{cases} 1, & d_{2D} \leq 10 \text{ м} \\ \exp\left(-\frac{d_{2D}-10}{1000}\right), & 10 \text{ м} < d_{2D} \end{cases}$
UMa	$P_{LOS} = \begin{cases} 1, & d_{2D} \leq 18 \text{ м} \\ \left[ \frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{63}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right) \right] \cdot \left(1 + C'(h_{UT}) \frac{5}{4} \left(\frac{d_{2D}}{100}\right)^3 \exp\left(-\frac{d_{2D}}{150}\right)\right), & 18 \text{ м} < d_{2D} \end{cases}$ где $C'(h_{UT}) = \begin{cases} 0, & h_{UT} \leq 13 \text{ м} \\ \left(\frac{h_{UT}-13}{10}\right)^{1.5}, & 13 \text{ м} < h_{UT} \leq 23 \text{ м} \end{cases}$
UMi	$P_{LOS} = \begin{cases} 1, & d_{2D} \leq 18 \text{ м} \\ \frac{18}{d_{2D}} + \exp\left(-\frac{d_{2D}}{36}\right) \left(1 - \frac{18}{d_{2D}}\right), & 18 \text{ м} < d_{2D} \end{cases}$

### Моделирование задержек и потерь при распространении радиоволн

Моделирование задержек и потерь сигналов при PPB в радиолиниях gNB-UE выполняется с учетом известных координат базовых станций gNB и пользовательского устройства UE. Скрипт 9 содержит процедуры моделирования задержек при PPB.

#### Скрипт 9. Моделирование задержек при PPB

```
% скорость света, м/с
speedOfLight = physconst('LightSpeed');
sampleDelay = zeros(1,numgNBs);
radius = cell(1,numgNBs);
for gNBIdx = 1:numgNBs
    radius{gNBIdx} = sqrt((gNBPos{gNBIdx}(1)-UEPos(1))^2 + (gNBPos{gNBIdx}(2)-UEPos(2))^2);
    delay = radius{gNBIdx}/speedOfLight; % задержка в с
% задержка в выборках
sampleDelay(gNBIdx) = ...
    round(delay*ofdmInfo.SampleRate);
end
```

Вычисленные расстояния для каждой пары gNB-UE заносятся в вектор radius. Используя скорость света speedOfLight в качестве скорости распространения, можно вычислить точное значение задержки времени прихода сигнала от gNB до UE по формуле  $\text{delay} = \text{radius}\{\text{gNBIdx}\} / \text{speedOfLight}$ . Задержка при PPB, выраженная в единицах целого периода дискретизации, определяется по формуле  $\text{sampleDelay}(\text{gNBIdx}) = \text{round}(\text{delay} * \text{ofdmInfo.SampleRate})$ , где частота дискретизации для заданного сценария ИМ равна  $\text{ofdmInfo.SampleRate} = 15,36$  МГц. Потери при PPB PLdB в каждой радиолинии gNB-UE оцениваются встроенной в 5G Toolbox функцией nrPathLoss [55] согласно спецификации 3GPP TR 38.901 [28] в зависимости от расстояния radius между базовыми станциями gNB и пользовательским устройством UE для сценария LOS. Скрипт 10 содержит процедуры моделирования потерь PPB.

Для моделирования задержек при PPB и сохранения одинакового размера векторов сигналов в ИМ в начало принятых сигналов rx{gNBIdx} добавляются sampleDelay нулей. Для моделирования потерь при PPB амплитуда принятого сигнала rx{gNBIdx} от каждой gNB масштабируется коэф-

фициентом  $\sqrt{\text{PL}}$ , где  $\text{PL} = 10^{(\text{PLdB}/10)}$ . Совокупный вектор rxWaveform принятых сигналов определяется как сумма задержанных и ослабленных при PPB сигналов от каждой базовой станции rx{gNBIdx}. Следует отметить, что задержка при PPB моделируется в целых интервалах периода дискретизации, т. е. частота дискретизации непосредственно влияет на условия ИМ.

#### Скрипт 10. Моделирование потерь при PPB

```
rxWaveform = zeros(length(txWaveform{1}) + max(sampleDelay),1);
rx = cell(1,numgNBs);
for gNBIdx = 1:numgNBs
% вычисление потерь PPB для каждой пары gNB-UE
PLdB = nrPathLoss(plCfg,fc,los(gNBIdx),[gNBPos{gNBIdx}(:);0],[UEPos(:);0]);
PL = 10^(PLdB/10);
% добавление задержек, нулей и ослаблений
rx{gNBIdx} = [zeros(sampleDelay(gNBIdx),1); txWaveform{gNBIdx}; ...
zeros(max(sampleDelay)-sampleDelay(gNBIdx),1)]/sqrt(PL);
% суммирование радиосигналов от всех gNBs
rxWaveform = rxWaveform + rx{gNBIdx};
end
```

Далее рассмотрим модели приема и обработки сигналов PRS на стороне пользовательского устройства в задачах позиционирования UE.

### 2.4. Модели приема и обработки сигналов PRS в UE

#### Первичная обработка сигналов PRS. Оценка времени прихода TOA

В исследуемой имитационной модели передача сигналов первичной PSS и вторичной SSS синхронизации для целей поиска базовых станций gNB пользовательским устройством не рассматривается. Для первичной обработки сигналов PRS пользовательское устройство выполняет корреляцию принятого сигнала rxWaveform с опорными локально-сформированными сигналами PRS, генерируемыми для каждой gNB; в результате обработки первичных измерений UE выбирает cellsToBeDetected базовых станций gNB с принятыми сигналами, обладающими наилучшими корреляционными свойствами. Скрипт 11 содержит процедуры оценки TOA.

**Скрипт 11. Оценка времени прихода сигнала**

```
cellsToBeDetected = min(3,numgNBs);
corr = cell(1,numgNBs);
delayEst = zeros(1,numgNBs);
maxCorr = zeros(1,numgNBs);
for gNBIdx = 1:numgNBs
    [~,mag] = nrTimingEstimate(carrier(gNBIdx),
    rxWaveform,prsGrid{gNBIdx});
    % извлечение выборок корреляции, занимающих порядка
    % 1/14 мс для нормального ЦП и порядка 1/12 мс для
    % расширенного ЦП; усечение производится для исключе-
    % ния боковых лепестков в рассчитанной корреляции
    corr{gNBIdx} = mag(1:(ofdmInfo.Nfft*carrier(1).Sub-
    carrierSpacing/15));
    % оценки задержки соответствует
    % максимальному значению корреляции
    maxCorr(gNBIdx) = max(corr{gNBIdx});
    delayEst(gNBIdx) = find(corr{gNBIdx} == max-
    Corr(gNBIdx),1)-1;
end
% получение обнаруженных номеров gNB по результатам
% оценки корреляции; сортировка detectedgNBs
[~,detectedgNBs] = sort(maxCorr,'descend');
detectedgNBs = detectedgNBs(1:cellsToBeDetected);
% построение результатов корреляции сигналов PRS
plot_PRS_corr(carrier,corr,ofdmInfo.SampleRate);
```

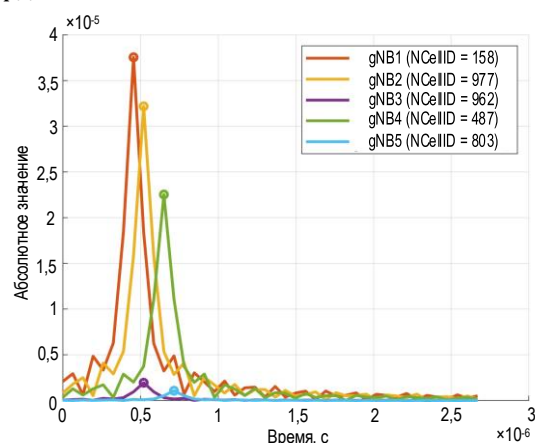
Вычисление TOA от трех разных базовых станций gNB осуществляется UE по корреляционному пику с использованием функции nrTimingEstimate [56], встроенной в 5G Toolbox [42].

Входными аргументами функции nrTimingEstimate являются:

- системный объект конфигурации несущей данной базовой станции gNB с известными параметрами модуляции OFDM carrier(gNBIdx);
- вектор выборок принятых сигналов rxWaveform;
- частотно-временная ресурсная сетка prsGrid{gNBIdx} для формирования локальных опорных сигналов PRS каждой gNB.

Локальный опорный сигнал PRS каждой базовой станции gNB во временном домене получается в результате модуляции OFDM ресурсных элементов частотно-временной ресурсной сетки prsGrid{gNBIdx} с известными в аргументе carrier(gNBIdx) параметрами ортогонального частотного мультиплексирования. Затем функция nrTimingEstimate выполняет вычисление кросс корреляции вектора принятых сигналов rxWaveform с локальными опорными сигналами PRS каждой gNB. Результатом работы функции nrTimingEstimate по умолчанию является оценка временного сдвига offset и его импульсная характеристика mag. Скрипт 11 использует оценку корреляционной характеристики corr{gNBIdx}, полученную из импульсной характеристики mag с числом выборок, определяемым размерностью БПФ ofdmInfo.Nfft. Далее выполняется поиск корреляционного пика maxCorr(gNBIdx)=max(corr{gNBIdx}) по сигналу каждой gNB. Индекс выборки, соответствующей корреляционному пику gNB, определяется командой delayEst(gNBIdx)=find(corr{gNBIdx}==maxCorr(gNBIdx),1)-1. После вычисления корреля-

ционных пиков maxCorr выполняется их сортировка в порядке убывания. Рисунок 6 иллюстрирует пример корреляции PRS для сигналов, принятых UE от всех базовых станций gNB в рассмотренном сценарии ИМ. Порядок величин по оси абсолютного значения корреляции объясняется нормированием переданных сигналов и потерями РРВ, которые для заданного сценария, в зависимости от расстояния gNB-UE, составляет более 100 дБ, что при переводе в абсолютные значения дает ослабление амплитуды более чем в  $10^5$  раз. Следует отметить, что сигналы gNB<sub>3</sub> и gNB<sub>5</sub> имеют достаточно слабые корреляционные пики вследствие того, что в соответствующих радиоканалах gNB-UE (см. скрипт 8) инициализированы условия отсутствия прямой видимости. Оценка TOA по корреляционным пикам является этапом первичной обработки дальномерных измерений. Далее рассмотрим вторичную обработку РДМ измерений с вычислением разностей времен прихода сигналов TDOA и построением соответствующих линий положения на плоскости – гипербол с результирующей оценкой координат UE.



**Рис. 6. Корреляция сигналов PRS для всех gNB**

*Fig. 6. PRS Signals Correlations for All gNBs*

Вторичная обработка сигналов PRS.  
Оценка координат UE

На этапе вторичной обработки в ИМ по известным значениям TOA вычисляются параметры разности времен прихода опорных сигналов RSTD (аббр. от англ. Reference Signal Time Difference) между каждой парой базовых станций gNB. Скрипт 12 содержит программную реализацию функции вычисления разности времен прихода RSTD по значениям TOA, полученным в результате первичной обработки опорных сигналов позиционирования PRS. При вторичной обработке в ИМ используются значения RSTD для сигналов PRS, принятых от базовых станций gNB с наилучшими корреляционными свойствами. Допустим, что первая базовая станция gNB<sub>1</sub> с наибольшим корреляционным пиком является обслуживающей (опорной), а



остальные gNB – соседними. По известным значениям  $RSTD_{j1}$  для каждой пары соседней gNB<sub>j</sub> и обслуживающей gNB<sub>1</sub> базовых станций вычисляются линии постоянной разности – гиперболы.

**Скрипт 12. Вычисление разности времен прихода RSTD по значениям TOA**

```
function rstd = get_RSTD_values(toa,sr)
% функция вычисления rstd для заданных величин
% времени прихода toa и частоты дискретизации sr
% вычисление числа выборок между toa разных gNBs
rstd = zeros(length(toa));
for jj = 1:length(toa)
    for ii = 1:length(toa)
        rstd(ii,jj) = toa(ii) - toa(jj);
    end
end
rstd = rstd./sr; % получение значений RSTD в секундах
end
```

Скрипт 13 содержит программную реализацию процедур вторичной обработки измерений RSTD с вычислением и построением соответствующих линий положения на плоскости – гипербол.

**Скрипт 13. Вычисление и построение гипербол по RSTD**

```
rstdVals = get_RSTD_values(delayEst,ofdmInfo.SampleRate);
% построение координат местоположений gNB и UE
txCellIDs = [carrier(:).NCellID];
cellIdx = 1; curveX = {}; curveY = {};
% будем считать первую обнаруженную gNB опорной
for jj = detectedgNBs(1)
    for ii = detectedgNBs(2:end)
        % задержка распространения;
        rstd = rstdVals(ii,jj)*speedOfLight;
        % установить gNB, для которых задержка при PPB
        % соответствует обнаруженным идентификаторам сот
        txi = find(txCellIDs == carrier(ii).NCellID);
        txj = find(txCellIDs == carrier(jj).NCellID);
        if (~isempty(txi) && ~isempty(txj))
            % получение и сохранение координат ху гиперболы
            [x,y] = get_RSTD_curve(gNBPos{txi},gNBPos{txj},rstd);
            if isreal(x) && isreal(y)
                curveX{1,cellIdx} = x;
                curveY{1,cellIdx} = y;
                % получение номеров gNB, соответствующих
                % текущим гиперболам
                gNBNums{cellIdx} = [jj ii];
                cellIdx = cellIdx + 1;
            end
        end
    end
end
```

Значения rstdVals рассчитываются функцией get\_RSTD\_values(delayEst,ofdmInfo.SampleRate), входными аргументами которой являются индекс корреляционного пика delayEst и частота дискретизации ofdmInfo.SampleRate. В результате получается матрица значений; первая строка данной матрицы соответствует измерениям  $RSTD_{j1}$  при условии, что опорной является первая базовая станция gNB<sub>1</sub>. Пример значений RSTD для исследуемого сценария ИМ:

```
rstdVals = 1.0e-06 *
    0      -0.0651  -0.0651  -0.1953  -0.2604
    0.0651      0      0      -0.1302  -0.1953
    0.0651      0      0      -0.1302  -0.1953
    0.1953    0.1302    0.1302      0      -0.0651
    0.2604    0.1953    0.1953    0.0651      0
```

Рисунок 7 иллюстрирует результаты ИМ, в частности, пересечение гипербол и ОК UE для измерений  $RSTD_{21}$  и  $RSTD_{41}$  от двух соседних базовых станций gNB<sub>2</sub> и gNB<sub>4</sub>, соответственно, относительно обслуживающей gNB<sub>1</sub> с наилучшими корреляциями по сигналам PRS; при этом используется первая строка матрицы rstdVals. Рисунок 8 иллюстрирует увеличенный сценарий результатов ИМ.

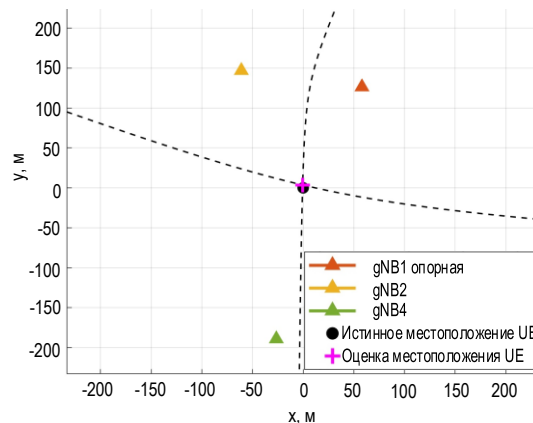


Рис. 7. Пересечение гипербол и оценка координат UE

Fig. 7. Hyperbola Curves Intersection and UE Coordinate Estimate

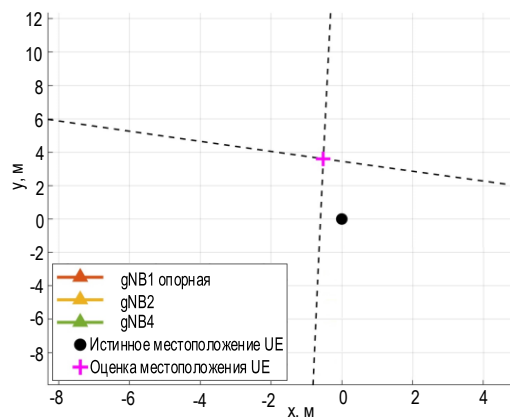


Рис. 8. Пересечение гипербол и оценка координат UE с увеличением

Fig. 8. Hyperbola Curves Intersection and UE Coordinate Estimate Zoomed in

Далее рассмотрим влияние ширины полосы частот, задаваемой числом физических РБ, разности поднесущих и частоты дискретизации на точность оценок координат UE средствами ИМ.

### 3. Оценка точности технологии сетевого позиционирования 5G NR с обработкой сигналов PRS

Оценка точности позиционирования UE в ИМ осуществляется для рассмотренного выше сценария территориального распределения базовых станций gNB и UE при различных нумерологиях 5G NR [57]. Таблица 8 содержит результаты точности ОК UE в зависимости от ширины полосы частот, задаваемой числом физических РБ, и разности поднесущих для заданного сценария территориального

распределения gNB и UE, полученных в результате ИМ при инициализированном по умолчанию генераторе случайных чисел; в оценке координат участвуют 3 LOS gNB (см. скрипт 8).

**ТАБЛИЦА 8. Точность ОК 5G NR PRS в заданном сценарии расположениям gNB**

TABLE 8. Accuracy of Coordinate Estimates Using 5G NR PRS for the Scenario of gNB Distribution under Consideration

FR	BW, Гц	N <sub>RB</sub> , шт.	SCS, кГц	SR, МГц	RMSE, м
FR1	5	25	15	7,68	9,8
		11	30	7,68	9,8
	10	52	15	15,36	7,5
		24	30	15,36	7,5
		11	60	15,36	7,5
	15	79	15	30,72	4,5
		38	30	30,72	4,5
		18	60	15,36	7,5
	20	106	15	30,72	4,5
		51	30	30,72	4,5
		24	60	30,72	4,5
	25	133	15	30,72	4,5
		65	30	30,72	4,5
		31	60	30,72	4,5
	30	160	15	61,44	2,8
		78	30	61,44	2,8
		38	60	61,44	2,8
	40	216	15	61,44	2,8
		106	30	61,44	2,8
		51	60	61,44	2,8
	50	270	15	61,44	2,8
		133	30	61,44	2,8
		65	60	61,44	2,8
	60	162	30	122,88	0,7
		79	60	122,88	0,7
	70	189	30	122,88	0,7
		93	60	122,88	0,7
	80	217	30	122,88	0,7
		107	60	122,88	0,7
	90	245	30	122,88	0,7
		121	60	122,88	0,7
	100	273	30	122,88	0,7
		135	60	122,88	0,7
FR2	50	66	60	61,44	2,8
		32	120	61,44	2,8
	100	132	60	122,88	0,7
		66	120	122,88	0,7
	200	264	60	245,76	0,51
		132	120	245,76	0,51
	400	264	120	491,52	0,27

Условные обозначения:

FR (аббр. от англ. Frequency Range) – диапазон  
 BW (аббр. от англ. BandWidth) – ширина полосы частот  
 N<sub>RB</sub> (аббр. от англ. Number of RB) – число ресурсных блоков  
 SCS (аббр. от англ. SubCarrier Spacing) – разнос поднесущих  
 SR (аббр. от англ. Sampling Rate) – частота дискретизации  
 RMSE (аббр. от англ. Root Mean Square Error) – среднеквадратичное отклонение ОК

Анализ представленных результатов ИМ (см. таблицу 8) позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, с увеличением ширины полосы частот с 5 МГц в диапазоне FR1 до 400 МГц в диапазоне FR2 точность ОК ожидаемо увеличивается с единиц метров до единиц дециметров; в диапазоне FR1 дециметровая точность достигается при увеличении ширины полосы частот с 50 до 60 МГц; в диапазоне FR2 дециметровая точность достигается при увеличении ширины полосы частот с 50 до 100 МГц. Данный вывод объясняется тем обстоятельством, что с ростом ширины полосы частот увеличивается число обрабатываемых символов PRS за фиксированный временной интервал, что, в свою очередь, повышает точность первичных дальномерных измерений. Во-вторых, с увеличением частоты дискретизации с 7,68 МГц в диапазоне FR1 до 491,52 МГц в диапазоне FR2 точность ОК ожидаемо увеличивается с единиц метров до единиц дециметров; при этом частота дискретизации зависит от используемой нумерологии стандарта 5G NR. Данный вывод объясняется тем обстоятельством, что помимо повышения точности обработки первичных измерений, увеличивается и разрешение по времени в условиях численного эксперимента самой имитационной модели, т. к. и задержка при РРВ и время прихода сигнала моделируется в целых интервалах периода дискретизации. В-третьих, с увеличением разнеса поднесущих при фиксированной частоте дискретизации точность ОК не изменяется. Данный вывод можно объяснить условиями численного эксперимента с разрешением по времени в целых интервалах периода дискретизации, а также тем обстоятельством, что UE, как объект позиционирования в ИМ, стационарно.

Для обобщения результатов ИМ в заданном сценарии территориального распределения (см. таблицу 8) далее был проведен численный эксперимент с отключенным по умолчанию генератором случайных чисел и усреднением точности ОК пользовательских устройств по ста итерациям, в каждой из которых территориальное распределение базовых станций gNB выбиралось случайным образом согласно предпосылке об оптимистическом геометрическом факторе точности (см. скрипт 2). Таблица 9 содержит результаты точности технологии сетевого позиционирования 5G NR PRS с усреднением погрешности оценок координат по ста сценариям территориального распределения базовых станций gNB. Полученные результаты усреднения подтверждают сделанные ранее выводы.

ТАБЛИЦА 9. Точность ОК 5G NR PRS с усреднением по расположению gNB

TABLE 9. Accuracy of Coordinate Estimates Using 5G NR PRS for Averaging the Scenarios of gNB Distribution

FR	BW, Гц	N <sub>RB</sub> , шт.	SCS, кГц	SR, МГц	RMSE, м
FR1	5	25	15	7,68	15,1
	10	52	15	15,36	7,1
	15	79	15	30,72	3,8
	20	106	15	30,72	3,6
	25	133	15	30,72	3,8
	30	160	15	61,44	1,6
	40	216	15	61,44	1,8
	50	270	15	61,44	1,8
	60	162	30	122,88	0,9
	70	189	30	122,88	0,7
	80	217	30	122,88	0,8
	90	245	30	122,88	0,9
FR2	100	273	30	122,88	0,7
	50	66	60	61,44	2,1
	100	132	60	122,88	0,7
	200	264	60	245,76	0,6
	400	264	120	491,52	0,2

#### 4. Заключение

Проведенное исследование по оценке точности позиционирования стационарного пользовательского устройства в заданной конфигурации территориального распределения базовых станций на плоскости средствами ИМ позволяет в первом при-

ближении сделать вывод о достижении потенциальной точности оценок координат менее одного метра в диапазоне дециметровых волн при увеличении ширины полосы частот с 50 до 60 МГц и частоте дискретизации 122,88 МГц, а максимальная потенциальная точность позиционирования в диапазоне миллиметровых волн в канале с шириной полосы частот 400 МГц и частотой дискретизации 491,52 МГц составляет 0,2 м. Таким образом, достижение потенциальной точности оценок координат менее одного метра в сверхплотных сетях радиодоступа диапазона миллиметровых волн подтверждает возможность использования данных о местоположении устройств при реализации новых механизмов установления и ведения радиосвязи на основе местоположения, в том числе, диаграммообразования на основе позиционирования. Так как для набора используемых радиointерфейсом 5G NR частот дискретизации 7,68; 15,36; 30,72; 61,44; 122,88; 245,76 и 491,52 МГц разрешение времени прихода сигнала с целочисленным интервалом дискретизации при переводе в дальномерные измерения составляет 39; 19,5; 9,8; 4,9; 2,4; 1,2 и 0,6 м, соответственно, то для достижения потенциальной точности позиционирования менее одного метра при использовании полос частот до 60 МГц и частоты дискретизации до 122,88 МГц соответственно, практический интерес представляет разработка, реализация и апробация устройства приема и обработки сигналов PRS с дробной оценкой времени прихода сигнала.

#### Список источников

1. Dammann A., Raulefs R., Zhang S. On prospects of positioning in 5G // Proceedings of the International Conference on Communication Workshop (ICCW, London, UK, 08–12 June 2015). IEEE, 2015. PP. 1207–1213. DOI:10.1109/ICCW.2015.7247342
2. Lin X., Bergman J., Gunnarsson F., Liberg O., Razavi S.M., Razaghi H.S., et al. Positioning for the Internet of Things: A 3GPP Perspective // IEEE Communications Magazine. 2017. Vol. 55. Iss. 12. PP. 179–185. DOI:10.1109/MCOM.2017.1700269
3. Huang J., Liang J., Luo S. Method and Analysis of TOA-Based Localization in 5G Ultra-Dense Networks with Randomly Distributed Nodes // IEEE Access. 2019. Vol. 7. PP. 174986–175002. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2957380
4. Keating R., Yoon D., Tao T., Huang H. Opportunities and Challenges for NR RAT-Dependent Based Positioning // Proceedings of the 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall, Honolulu, HI, USA, 22–25 September 2019). IEEE, 2019. DOI:10.1109/VTCFall.2019.8891135
5. Mürsepp I., Kulmar M., Elghary O., Alam M.M., Chen T., Horsmanheimo S., et al. Performance Evaluation of 5G-NR Positioning Accuracy Using Time Difference of Arrival Method // Proceedings of the International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom, Athens, Greece, 07–10 September 2021). IEEE, 2021. PP. 494–499. DOI:10.1109/MeditCom49071.2021.9647652
6. Ren B., Fang R., Ren X., Li G., Li H., Zhao Z., Li J., et al. Progress of 3GPP Rel-17 Standards on New Radio (NR) Positioning // Proceedings of the 11th International Conference On Indoor Positioning And Indoor Navigation (IPIN 2021, Lloret De Mar, Spain, 29 November–2 December 2021). 2021.
7. Destino G., Mahmoodi T., Shreevastav R., Shrestha D., Siomina I. A New Position Quality Metric for NR RAT Dependent OTDOA Positioning Methods // Proceedings of the 16th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC, Bremen, Germany, 23–24 October 2019). IEEE, 2019. DOI:10.1109/WPNC47567.2019.8970252
8. Khafa A. del Peral-Rosado J.A., López-Salcedo J.A., Seco-Granados G. Evaluation of 5G Positioning Performance Based on UTDaA, AoA and Base-Station Selective Exclusion // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 1. P. 101. DOI:10.3390/s22010101
9. Ferre R.M., Seco-Granados G., Lohan E.S. Positioning Reference Signal design for positioning via 5G // National Committee for Radiology in Finland. 2019. DOI:10.5281/zenodo.3537686
10. Dev C.S.G.N., Pathak L., Ponnareddy G., Das D. NRPos: A Multi-RACH Framework for 5G NR Positioning // Proceedings of the 3rd 5G World Forum (5GWF, Bangalore, India, 10–12 September 2020). IEEE, 2020. PP. 25–30. DOI:10.1109/5GWF49715.2020.9221379
11. Jin C., Bajaj I., Zhao K., Tay W.P., Ling K.V. 5G Positioning Using Code-Phase Timing Recovery // Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference (WCNC, Nanjing, China, 29 March–01 April 2021). IEEE, 2021. DOI:10.1109/WCNC49053.2021.9417556



12. Fouda A., Keating R., Cha H.S. Toward cm-Level Accuracy: Carrier Phase Positioning for IIoT in 5G-Advanced NR Networks // arXiv preprint 2022. arXiv:2207.06633.
13. 3GPP TS 22.261 V18.6.1 (2022-06). Service requirements for the 5G system; Stage 1 (Release 18).
14. 3GPP TS 22.104 V18.3.0 (2021-12). Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains; Stage 1 (Release 18).
15. 3GPP TR 22.872 V16.1.0 (2018-09). Study on positioning use cases; Stage 1 (Release 16).
16. 3GPP TR 38.855 V16.0.0 (2019-03). Study on NR positioning support (Release 16).
17. 3GPP TR 38.857 V17.0.0 (2021-03). Study on NR Positioning Enhancements; (Release 17).
18. 3GPP TS 38.305 V17.1.0 (2022-06). NG Radio Access Network (NG-RAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in NG-RAN (Release 17).
19. 3GPP TS 38.455 V17.1.1 (2022-06). NG-RAN; NR Positioning Protocol A (NRPPa) (Release 17).
20. 3GPP TS 37.355 V17.1.0 (2022-06). LTE Positioning Protocol (LPP) (Release 17).
21. 3GPP TS 38.201 V17.0.0 (2021-12). NR; Physical layer; General description (Release 17).
22. 3GPP TS 38.211 V17.2.0 (2022-06). NR; Physical channels and modulation (Release 17).
23. 3GPP TS 38.213 V17.2.0 (2022-06). NR; Physical layer procedures for control (Release 17).
24. 3GPP TS 38.214 V17.2.0 (2022-06). NR; Physical layer procedures for data (Release 17).
25. 3GPP TS 38.215 V17.1.0 (2022-03). NR; Physical layer measurements (Release 17).
26. 3GPP TS 38.321 V17.1.0 (2022-06). NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification (Release 17).
27. 3GPP TS 38.212 V17.2.0 (2022-06). NR; Multiplexing and channel coding (Release 17).
28. 3GPP TR 38.901 V17.0.0 (2022-03). Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 17).
29. 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
30. Фокин Г.А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. Дис. ... докт. техн. наук. СПб: СПбГУТ, 2021. 499 с.
31. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования. СПб.: СПбГУТ, 2020. 558 с.
32. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования 5G. Москва: Горячая Линия – Телеком, 2021. 456 с.
33. Фокин Г.А. Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 2. С. 3–9.
34. Фокин Г.А. Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 3. С. 13–21.
35. Фокин Г.А. Процедуры позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2021. № 11. С. 2–8.
36. Фокин Г.А. Модель поиска топологии локальной дальномерной системы позиционирования 5G по заданному геометрическому фактору // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2021. № 4(44). С. 27–38. DOI:10.24412/2221-2574-2021-444-27-38
37. Фокин Г.А. Программный модуль поиска и оптимизации топологии локальной системы позиционирования по заданному геометрическому фактору для объекта с варьируемым в данной области местоположением. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021667003, от 26.10.2021. Оpubл. 02.11.2021.
38. Фокин Г.А. Программный модуль поиска и оптимизации топологии локальной системы позиционирования по заданному геометрическому фактору для объекта с фиксированным местоположением. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2021667002 от 26.10.2021. Оpubл. 03.11.2021.
39. 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
40. Фокин Г.А. Использование методов сетевого позиционирования в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 11. С. 29–37. DOI:10.34832/ELSV.2020.12.11.002
41. NR Positioning Using PRS // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ug/nr-prs-positioning.html> (дата обращения 01.08.2022)
42. 5G Toolbox // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/products/5g.html> (дата обращения 01.08.2022)
43. nrCarrierConfig // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrcarrierconfig.html> (дата обращения 01.08.2022)
44. nrPRSCfg // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrprsconfig.html> (дата обращения 01.08.2022)
45. nrPDSCHConfig // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdschconfig.html> (дата обращения 01.08.2022)
46. nrResourceGrid // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrresourcegrid.html> (дата обращения 01.08.2022)
47. nrPRSIndices // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrprsindices.html> (дата обращения 03.10.2022)
48. nrPRS // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrprs.html> (дата обращения 01.08.2022)
49. nrPDSCHIndices // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdschindices.html> (дата обращения 01.08.2022)
50. nrPDSCH // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdsch.html> (дата обращения 01.08.2022)
51. nrPDSCHDMRSIndices // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdschdmrsindices.html> (дата обращения 01.08.2022)
52. nrPDSCHDMRS // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdschdmrs.html> (дата обращения 01.08.2022)
53. nrOFDMModulate // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrofdmmodulate.html> (дата обращения 01.08.2022)

54. nrOFDMInfo // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrofdminfo.html> (дата обращения 01.08.2022)
55. nrPathLoss // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpathloss.html> (дата обращения 01.08.2022)
56. nrTimingEstimate // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrtimingestimate.html> (дата обращения 01.08.2022)
57. Сеть радиодоступа 5G, часть 2 // Itechinfo. URL: <https://itechinfo.ru/content/сеть-радиодоступа-5g-часть-2> (дата обращения 01.08.2022)

## References

1. Dammann A., Raulefs R., Zhang S. On prospects of positioning in 5G. *Proceedings of the International Conference on Communication Workshop, ICCW, 08–12 June 2015, London, UK*. IEEE; 2015. p.1207–1213. DOI:10.1109/ICCW.2015.7247342
2. Lin X., Bergman J., Gunnarsson F., Liberg O., Razavi S.M., Razaghi H.S., et al. Positioning for the Internet of Things: A 3GPP Perspective. *IEEE Communications Magazine*. 2017;55(12):179–185. DOI:10.1109/MCOM.2017.1700269
3. Huang J., Liang J., Luo S. Method and Analysis of TOA-Based Localization in 5G Ultra-Dense Networks with Randomly Distributed Nodes. *IEEE Access*. 2019;7:174986–175002. DOI:10.1109/ACCESS.2019.2957380
4. Keating R., Yoon D., Tao T., Huang H. Opportunities and Challenges for NR RAT-Dependent Based Positioning. *Proceedings of the 90th Vehicular Technology Conference, VTC2019-Fall, USA, 22–25 September 2019, Honolulu, HI*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/VTCFall.2019.8891135
5. Mürsepp I., Kulmar M., Elghary O., Alam M.M., Chen T., Horsmanheimo S., et al. Performance Evaluation of 5G-NR Positioning Accuracy Using Time Difference of Arrival Method. *Proceedings of the International Mediterranean Conference on Communications and Networking, MeditCom, 07–10 September 2021, Athens, Greece*. IEEE; 2021. p.494–499. DOI:10.1109/MeditCom49071.2021.9647652
6. Ren B., Fang R., Ren X., Li G., Li H., Zhao Z., Li J., et al. Progress of 3GPP Rel-17 Standards on New Radio (NR) Positioning. *Proceedings of the 11th International Conference On Indoor Positioning And Indoor Navigation, IPIN 2021, 29 November–2 December 2021, Lloret De Mar, Spain*. 2021.
7. Destino G., Mahmoodi T., Shreevastav R., Shrestha D., Siomina I. A New Position Quality Metric for NR RAT Dependent OTDOA Positioning Methods. *Proceedings of the 16th Workshop on Positioning, Navigation and Communications, WPNC, 23–24 October 2019, Bremen, Germany*. IEEE; 2019. DOI:10.1109/WPNC47567.2019.8970252
8. Xhafa A. del Peral-Rosado J.A., López-Salcedo J.A., Seco-Granados G. Evaluation of 5G Positioning Performance Based on UTDaA, AoA and Base-Station Selective Exclusion. *Sensors*. 2022;22(1):101. DOI:10.3390/s22010101
9. Ferre R.M., Seco-Granados G., Lohan E.S. Positioning Reference Signal design for positioning via 5G. *National Committee for Radiology in Finland*. 2019. DOI:10.5281/zenodo.3537686
10. Dev C.S.G.N., Pathak L., Ponnareddy G., Das D. NRPos: A Multi-RACH Framework for 5G NR Positioning. *Proceedings of the 3rd 5G World Forum, 5GWF, 10–12 September 2020, Bangalore, India*. IEEE; 2020. p.25–30. DOI:10.1109/5GWF49715.2020.9221379
11. Jin C., Bajaj I., Zhao K., Tay W.P., Ling K.V. 5G Positioning Using Code-Phase Timing Recovery. *Proceedings of the Wireless Communications and Networking Conference, WCNC, 29 March–01 April 2021, Nanjing, China*. IEEE; 2021. DOI:10.1109/WCNC49053.2021.9417556
12. Fouda A., Keating R., Cha H.S. Toward cm-Level Accuracy: Carrier Phase Positioning for IIoT in 5G-Advanced NR Networks. *arXiv preprint 2022*. arXiv:2207.06633
13. 3GPP TS 22.261 V18.6.1 (2022-06). *Service requirements for the 5G system; Stage 1* (Release 18).
14. 3GPP TS 22.104 V18.3.0 (2021-12). *Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains; Stage 1* (Release 18).
15. 3GPP TR 22.872 V16.1.0 (2018-09). *Study on positioning use cases; Stage 1* (Release 16).
16. 3GPP TR 38.855 V16.0.0 (2019-03). *Study on NR positioning support* (Release 16).
17. 3GPP TR 38.857 V17.0.0 (2021-03). *Study on NR Positioning Enhancements* (Release 17).
18. 3GPP TS 38.305 V17.1.0 (2022-06). *NG Radio Access Network (NG-RAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in NG-RAN* (Release 17).
19. 3GPP TS 38.455 V17.1.1 (2022-06). *NG-RAN; NR Positioning Protocol A (NRPPa)* (Release 17).
20. 3GPP TS 37.355 V17.1.0 (2022-06). *LTE Positioning Protocol (LPP)* (Release 17).
21. 3GPP TS 38.201 V17.0.0 (2021-12). *NR; Physical layer; General description* (Release 17).
22. 3GPP TS 38.211 V17.2.0 (2022-06). *NR; Physical channels and modulation* (Release 17).
23. 3GPP TS 38.213 V17.2.0 (2022-06). *NR; Physical layer procedures for control* (Release 17).
24. 3GPP TS 38.214 V17.2.0 (2022-06). *NR; Physical layer procedures for data* (Release 17).
25. 3GPP TS 38.215 V17.1.0 (2022-03). *NR; Physical layer measurements* (Release 17).
26. 3GPP TS 38.321 V17.1.0 (2022-06). *NR; Medium Access Control (MAC) protocol specification* (Release 17).
27. 3GPP TS 38.212 V17.2.0 (2022-06). *NR; Multiplexing and channel coding* (Release 17).
28. 3GPP TR 38.901 V17.0.0 (2022-03). *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz* (Release 17).
29. 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
30. 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.)
31. Fokin G.A. *Technologies of Network Positioning*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич State University of Telecommunications Publ.; 2020. 558 p. (in Russ.)

32. Fokin G.A. *5G Network Positioning Technologies*. Moscow: Hot Line - Telecom Publ.; 2021. 456 p. (in Russ.)
33. Fokin G.A. Scenarios for Positioning in 5G Networks. *Vestnik svyazi*. 2020;2:3–9. (in Russ.)
34. Fokin G.A. Scenarios for Positioning in 5G Networks. *Vestnik Svyazi*. 2020;3:13–21. (in Russ.)
35. Fokin G.A. Procedures for Positioning in 5G Networks. *Vestnik svyazi*. 2021;11:2–8. (in Russ.)
36. Fokin G.A. Search Model for topology of local range-measuring system in 5G positioning as per preset geometric factor. *Radio engineering and telecommunication systems*. 2021;4(44):27–38. (in Russ.) DOI:10.24412/2221-2574-2021-444-27-38
37. Fokin G.A. *Software Module for Searching and Optimizing the Topology of a Local Positioning System by a Given Geometric Factor for an Object with a Location Variable in a Given Area*. Patent RF, no. 2021667003, 10.26.2021. (in Russ.)
38. Fokin G.A. *Software Module for Searching and Optimizing the Topology of a Local Positioning System by a Given Geometric Factor for an Object with a Fixed Location*. Patent RF, no. 2021667002, 10.26.2021. (in Russ.)
39. 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
40. 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
41. MathWorks. *NR Positioning Using PRS*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ug/nr-prs-positioning.html> [Accessed 1st August 2022]
42. MathWorks. *5G Toolbox*. URL: <https://www.mathworks.com/products/5g.html> [Accessed 1st August 2022]
43. MathWorks. *nrCarrierConfig*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrcarrierconfig.html> [Accessed 1st August 2022]
44. MathWorks. *nrPRSConfig*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrprsconfig.html> [Accessed 1st August 2022]
45. MathWorks. *nrPDSCHConfig*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdschconfig.html> [Accessed 1st August 2022]
46. MathWorks. *nrResourceGrid*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrresourcegrid.html> [Accessed 1st August 2022]
47. MathWorks. *nrPRSIndices*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrprsindices.html> [Accessed 1st August 2022]
48. MathWorks. *nrPRS*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrprs.html> [Accessed 1st August 2022]
49. MathWorks. *nrPDSCHIndices*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdschindices.html> [Accessed 1st August 2022]
50. MathWorks. *nrPDSCH*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdsch.html> [Accessed 1st August 2022]
51. MathWorks. *nrPDSCHDMRSIndices*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdschdmrsindices.html> [Accessed 1st August 2022]
52. MathWorks. *nrPDSCHDMRS*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpdschdmrs.html> [Accessed 1st August 2022]
53. MathWorks. *nrOFDMModulate*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrofdmmodulate.html> [Accessed 1st August 2022]
54. MathWorks. *nrOFDMInfo*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrofdminfo.html> [Accessed 1st August 2022]
55. MathWorks. *nrPathLoss*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrpathloss.html> [Accessed 1st August 2022]
56. MathWorks. *nrTimingEstimate*. URL: <https://www.mathworks.com/help/5g/ref/nrtimingestimate.html> [Accessed 1st August 2022]
57. Itecho. *5G radio access network, part 2*. URL: <https://itechinfo.ru/content/сеть-радиодоступа-5g-часть-2> (in Russ.) [Accessed 1st August 2022]


Статья поступила в редакцию 21.05.2022; одобрена после рецензирования 17.06.2022; принята к публикации 02.08.2022.

The article was submitted 21.05.2022; approved after reviewing 17.06.2022; accepted for publication 02.08.2022.

## Информация об авторе:

**ФОКИН**  
**Григорий Алексеевич**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры радиосвязи и вещания  
Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций  
им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0000-0002-5358-1895>