

Научная статья

УДК 621.396.677

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-43-64



Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Часть 2. Модель совокупности радиолиний

Григорий Алексеевич Фокин, fokin.ga@sut.ru

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

Аннотация: Вторая часть исследования вопросов диаграммообразования на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа диапазона миллиметровых волн посвящена формализации и программной реализации комплексной имитационной модели функционирования совокупности направленных радиолиний. Каждая направленная радиолиния между базовой станцией gNB (gNodeB), оборудованной антенной решеткой, и пользовательским устройством (UE, аббр. от англ. User Equipment), работающим в ненаправленном режиме, формируется по известному на gNB местоположению UE. Совокупность одновременно функционирующих в общем диапазоне частот направленных радиолиний gNB→UE исследуется как набор трафиковых лучей, реализующих множественный доступ с пространственным мультиплексированием (SDMA, аббр. от англ. Space-Division Multiple Access). Пространственное уплотнение реализуется посредством трехмерного диаграммообразования на базовой станции и позволяет компенсировать потери распространения радиоволн и высокий уровень помех. В первой части исследования было показано, что проблемой практической реализации SDMA в сверхплотных сетях радиодоступа является существенный (десятки дБ) разброс отношения сигнал/(шум + помеха) SINR (аббр. от англ. Signal Interference + Noise Ratio) в зависимости от взаимного расположения двух устройств. Целью настоящего исследования является установление зависимости SINR от 1) ширины луча сектора базовой станции gNB в направлении на пользовательское устройство UE в радиолинии полезного сигнала (SOI, аббр. от англ. Signal Of Interest); 2) неопределенности местоположения UE; 3) помех от радиолиний (SNOI, аббр. от англ. Signal Not of Interest): а) внутри своего сектора, б) других секторов своей соты и в) других сот сети. Разработанная и программно реализованная в настоящей работе имитационная модель впервые позволила установить взаимозависимость факторов погрешности позиционирования UE и требуемой ширины трафикового луча для его обслуживания. В частности, установлено, что с уменьшением погрешности позиционирования с 10 до 1 м требуемая ширина луча в горизонтальной и вертикальной плоскости сужается до 3°, что позволяет увеличить SINR до 25 дБ. Исследование уплотнения одновременных передач показало, что для 64 пространственно мультиплексируемых UE с увеличением размера соты с 20 до 300 м отношение SINR увеличивается примерно на 30 дБ при ограничении на ширину луча в 3°. В отличие от похожих исследований в настоящей модели вклад от помех одновременно работающих трафиковых лучей внутри своего сектора, других секторов своей соты и других сот сети впервые показан по отдельности, что позволяет дифференцировать происхождение помех и использовать научно-обоснованное управление шириной луча для их компенсации.

Ключевые слова: диаграммообразование, позиционирование, сверхплотная сеть радиодоступа, миллиметровые волны, направленные радиолинии, ширина и ориентация луча, отношение сигнал/(шум + помеха)

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

Ссылка для цитирования: Фокин Г.А. Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Часть 2. Модель совокупности радиолиний // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 5. С. 43–64. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-43-64

Location Aware Beamforming in Millimeter-Wave Band Ultra-Dense Radio Access Networks. Part 2. Model of a Set of Radio Links

 Grigoriy Fokin, fokin.ga@sut.ru

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

Abstract: *The second part of the study of beamforming issues, based on positioning in ultra-dense millimeter wave radio access networks, is devoted to the formalization and software implementation of a complex simulation model of the functioning of a set of directional radio links. Each directional radio link between a base station (gNodeB – gNB), equipped with an antenna array, and a user equipment (UE), operating in omnidirectional mode, is formed according to the location of the UE, known at the gNB. The set of gNB→UE directional radio links, simultaneously operating in a common frequency range, is studied as a set of traffic beams, that implement space division multiple access (SDMA). Spatial multiplexing is implemented through three-dimensional beamforming at the gNB and makes it possible to compensate for propagation losses and high levels of interference. In the first part of the study, it was shown that the problem of practical implementation of SDMA in ultra-dense radio access networks is a significant (tens of dB) spread in the signal to interference plus noise ratio (SINR), depending on the arrangement of two devices. The purpose of this study is to establish the dependence of SINR on 1) the beamwidth of the gNB sector in the direction of the user equipment in the radio link of the signal of interest (SOI); 2) uncertainty of the UE location; 3) interference from radio links of signal not of interest (SNOI): a) within its sector, b) other sectors of its cell and c) other cells in the network. The simulation model developed and implemented in software in this work for the first time made it possible to establish the interdependence of the UE positioning error factors and the required width of the traffic beam for its service. In particular, it was found, that as the positioning error decreases from 10 to 1 m, the required beam width in the horizontal and vertical planes narrows to 3°, which makes it possible to increase the SINR to 25 dB. A simultaneous transmission multiplexing study showed that for 64 spatially multiplexed UEs, as the cell size increases from 20 to 300 m, the SINR increases by approximately 30 dB, subject to a beamwidth constraint of 3°. Unlike similar studies, in this model, the contribution from interference from simultaneously operating traffic beams within its sector, other sectors of its cell and other cells in the network is shown separately for the first time, which allows to differentiate the origin of interference and use scientifically based beamwidth control for their compensation.*

Keywords: *beamforming, positioning, ultra-dense radio access network, millimeter wave, directional radio links, beam width and orientation, signal interference + noise ratio*

Funding: the work was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-29-00528, <https://rscf.ru/project/22-29-00528>

For citation: Fokin G. Location Aware Beamforming in Millimeter-Wave Band Ultra-Dense Radio Access Networks. Part 2. Model of a Set of Radio Links. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(5):43–64. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-5-43-64

1. ВВЕДЕНИЕ

Настоящее исследование является обобщением работы [1] на случай совокупности радиолиний. Концепция диаграммообразования на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа (СРД) диапазона миллиметровых волн (ММВ) описана в [2] и основана на сценариях сетевого позиционирования пользовательских устройств [3]. Моделирование совокупности направленных радиолиний, выполненное ранее [4–6], не учитывало факторов погрешности позиционирования пользовательского устройства (UE, аббр. от англ. User Equipment) при ориентации луча базовой станцией

gNB (gNodeB) в направлении на UE, что, однако существенно влияет на бюджет направленных радиолиний [7–9].

Диаграммообразование на основе позиционирования (LAB, аббр. от англ. Location Aware Beamforming) обозначено как один из основополагающих инструментов пространственного уплотнения одновременных передач (SDMA, аббр. от англ. (Space-Division Multiple Access) в сверхплотных СРД диапазона ММВ, который позволит компенсировать рост помех при увеличении плотности одновременно работающих устройств в общем диапазоне частот [10–15].

Анализ направленных радиолиний на уровне СРД ранее уже проводился [16–18], однако факторы погрешности позиционирования UE и ширины луча сектора базовой станции gNB при его ориентации в направлении на UE комплексно исследованы еще не были. Гипотезой настоящего исследования является утверждение о том, что чем точнее известны координаты UE, тем уже по азимуту и углу места может быть луч, сформированный сектором базовой станции gNB при диаграммообразовании на основе позиционирования для данного UE, при этом такой луч в условиях функционирования сверхплотной СРД может не перекрываться или лишь частично перекрываться с другими лучами на соседние UE, приводя к уменьшению отношения сигнал/(шум + помеха) SINR (аббр. от англ. Signal Interference + Noise Ratio).

Объектом исследования является совокупность радиолиний с диаграммообразованием на основе позиционирования в составе нескольких сот сверхплотной СРД диапазона ММВ.

Предметом исследования является зависимость отношения сигнал/(шум + помеха), а также требуемой ширины луча от точности позиционирования UE, размера соты и числа устройств в секторе.

Методом исследования является имитационное моделирование взаимного влияния совокупности направленных радиолиний внутри своего сектора, других секторов своей соты и других сот сети.

Целью исследования является установление влияния ориентации и ширины луча базовой стан-

ции, а также погрешности определения местоположения UE на уровень пространственного уплотнения одновременных передач по критерию отношения сигнал/(шум + помеха).

Материал исследования организован далее следующим образом. В разделе 2 выполнена формализация модели совокупности радиолиний с диаграммообразованием на основе позиционирования, а раздел 3 содержит ее программную реализацию. Результаты имитационного моделирования по оценке влияния ориентации и ширины луча, а также погрешности определения местоположения на уровень пространственного уплотнения одновременных передач по критерию отношения сигнал/(шум + помеха) представлены в разделе 4. Выводы сформулированы в разделе 5.

2. ФОРМАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ СОВОКУПНОСТИ РАДИОЛИНИЙ С LAA

2.1. Постановка задачи моделирования

Формализуем задачу моделирования совокупности направленных радиолиний с диаграммообразованием на базовой станции gNB (gNodeB) на основе предварительного позиционирования UE. Рисунок 1 иллюстрирует сценарий модели диаграммообразования на основе позиционирования, учитывающий взаимное влияние направленных радиолиний. Метрикой оценки взаимного влияния направленных радиолиний является SINR.

На рисунке 1 показаны 7 сот, каждая из которых образована тремя секторами.

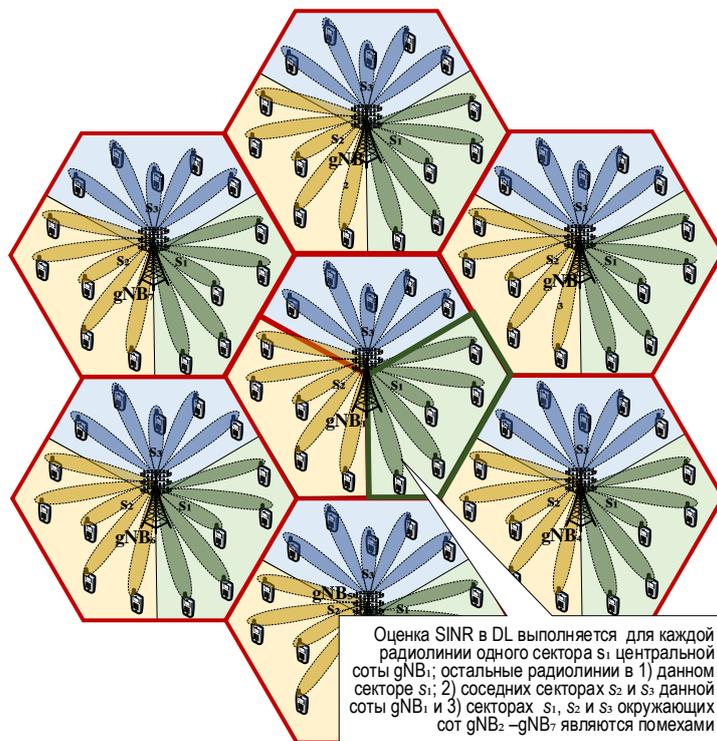


Рис. 1. Сценарий модели диаграммообразования на основе позиционирования

Fig. 1. Location-Aware Beamforming Model Operation Scenario

Каждую соту обслуживает базовая станция gNB_j , $j = 1, \dots, 7$. Каждый сектор s_i , $i = 1, 2, 3$ трехсекторной соты j оборудован многоканальным приемопередатчиком с антенной решеткой (АР), установленной на антенно-мачтовом устройстве базовой станции gNB_j . Возможности АР сектора базовой станции gNB позволяют одновременно формировать несколько лучей при работе на передачу и обслуживать несколько UE с организацией направленных радиолучей в нисходящем канале (DL, аббр. от англ. DownLink) от gNB к UE.

Допустим, что UE работают на прием в ненаправленном режиме. Пусть в каждом секторе s_i одновременно обслуживаются K пользовательских устройств UE_k , $k = 1, \dots, K$. Тогда в модели сети для обслуживания K UE в каждом секторе s_i базовой станции gNB_j необходимо организовать K направленных радиолучей $gNB_{js_i} \rightarrow UE_k$. Общее число одновременно работающих направленных радиолучей в представленной на рисунке 1 модели сети из семи трёхсекторных базовых станций равно $21K$. Ориентация диаграмм направленности АР секторов s_i базовых станций gNB_j осуществляется по известному местоположению пользовательских устройств UE_k в каждом секторе s_i .

Оценка SINR выполняется в DL для каждой направленной радиолучей $gNB_{1s_i} \rightarrow UE_k$ каждого сектора s_i центральной соты базовой станции gNB_1 ; границы одного из секторов на рисунке 1 выделены зеленым цветом. Радиолучи в данном секторе при оценке SINR являются полезными сигналами (SOI, аббр. от англ. Signal of Interest). Одновременно с радиолучами SOI в модели сети на рисунке 1 работают радиолучи SNOI (аббр. от англ. Signal Not of Interest), которые при оценке SINR являются помехами. Для каждой k -й радиолучи SOI $gNB_{1s_i} \rightarrow UE_k$ в секторе s_i центральной соты базовой станции gNB_1 помехи образуются радиолучами SNOI:

- 1) $gNB_{1s_i} \rightarrow UE_{k'}, k' \neq k$ внутри своего сектора s_i центральной соты базовой станции gNB_1 ;
- 2) других секторов своей соты $gNB_{1s_{i'}} \rightarrow UE_{k'}, i' \neq i$ центральной базовой станции gNB_1 ;
- 3) $gNB_{js_i} \rightarrow UE_k$ секторов s_i окружающих сот базовых станций $gNB_j, j = 2, \dots, 7$.

При имитационном моделировании (ИМ) ненаправленных радиолучей в СРД диапазона дециметровых волн (ДМВ) учет помех от сот первого круга – 6-ти других сот, окружающих центральную, – в ряде случаев считают достаточным [19]. Потери при распространении радиоволн (РРВ) в диапазоне ММВ значительно превосходят потери в диапазоне ДМВ, поэтому оценку SINR для направленных радиолучей с учетом помех от сот только первого круга по модели на рисунке 1 можно считать обоснованной. Для имитационного моделирования помех в центральной соте СРД 5G, согласно ITU-R M.2135-1 [20]

и ITU-R M.2412-0 [21], можно использовать модель из 7-ми секторизованных сот.

При ИМ направленных радиолучей для сценария диаграммообразования на основе позиционирования знание местоположения UE позволяет, *во-первых, настроить ориентацию луча* сектора базовой станции gNB в направлении на UE и, *во-вторых, настроить ширину луча* на данное UE так, чтобы минимизировать помехи для соседних устройств СРД. Совместная реализация этих процедур принципиально важна для повышения эффективности множественного доступа с SDMA.

Задачу ИМ совокупности направленных радиолучей в модели диаграммообразования на основе позиционирования можно сформулировать следующим образом. *Во-первых, требуется установить влияние ориентации и ширины луча сектора базовой станции gNB в направлении на UE на SINR. Во-вторых, необходимо оценить влияние погрешности определения местоположения UE при диаграммообразовании на основе позиционирования на SINR. В-третьих, следует выявить вклад в совокупное отношение SINR от помех, создаваемых радиолучами SNOI по отдельности: а) внутри своего сектора, б) других секторов своей соты и в) других сот сети.* Установление данных зависимостей позволит количественно и качественно оценить возможности SDMA в сверхплотных СРД с направленными радиолучами. Совокупность факторов погрешности позиционирования UE и ширины луча сектора базовой станции gNB при его ориентации в направлении на UE исследуются в комплексе. Гипотезой является утверждение о том, что чем точнее известны координаты UE, тем уже по азимуту и углу места может быть луч, сформированный сектором базовой станции gNB при диаграммообразовании на основе позиционирования для данного UE, при этом такой луч в условиях функционирования сверхплотной СРД может не перекрываться с другими лучами на соседние UE.

Для количественного и качественного исследования влияния ориентации и ширины луча сектора базовой станции gNB , а также погрешности определения местоположения (ОМП) пользовательского устройства на SDMA по критерию SINR, далее представлена функциональная схема имитационной модели совокупности радиолучей, работающих по принципу диаграммообразования LAB.

2.2. Функциональная схема модели совокупности радиолучей с LAB

Рисунок 2 иллюстрирует функциональную схему имитационной модели совокупности радиолучей с диаграммообразованием LAB.

В имитационной модели характеристика местоположения UE, включая текущую оценку координат и их погрешность (неопределенность), посту-

пает из модуля позиционирования UE сначала в модуль управления ориентацией луча по местоположению UE и затем в модуль управления шириной луча по местоположению UE. Местоположение пользовательского устройства характеризуется оценкой координат \hat{x} .

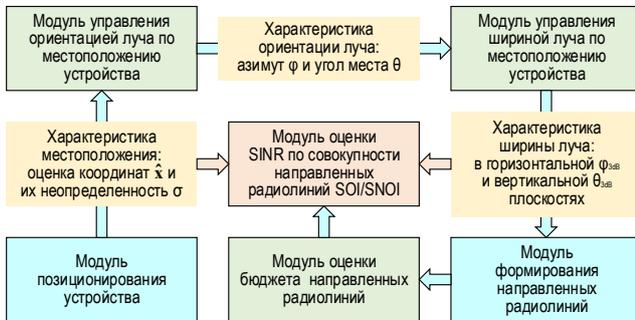


Рис. 2. Функциональная схема модели диаграммообразования LAB

Fig. 2. Location-Aware Beamforming Model Functional Diagram

По оценке координат \hat{x} пользовательского устройства UE_k обслуживаемого сектором s_i базовой станции gNB_j модуль управления ориентацией луча вычисляет необходимые направления ориентации диаграммы направленности антенны (ДНА) по азимуту $\varphi_{(i,k)}$ и углу места $\theta_{(i,k)}$ для каждого пользовательского устройства UE_k в секторе s_i модели сверхплотной СРД.

По неопределенности оценки координат σ пользовательского устройства UE_k модуль управления шириной луча вычисляет необходимую ширину луча по азимуту $\varphi_{3dB(i,k)}$ и углу места $\theta_{3dB(i,k)}$ для UE_k в секторе s_i модели сверхплотной СРД. Ширина луча или ширина ДНА по уровню половинной мощности (-3 дБ) иногда обозначается параметром HPBW (аббр. от англ. Half-Power Beamwidth) и определяется в горизонтальной $\varphi_{3dB(i,k)} = HPBW_{H(i,k)}$ (Horizontal) и вертикальной $\theta_{3dB(i,k)} = HPBW_{V(i,k)}$ (Vertical) плоскостях.

Модуль формирования направленных радиолиний выполняет их инициализацию в заданных направлениях ориентации по азимуту и углу места с заданной шириной луча в горизонтальной $\varphi_{3dB(i,k)}$ и вертикальной $\theta_{3dB(i,k)}$ плоскостях для каждого сектора s_i базовой станции gNB_j и пользовательского устройства UE_k в модели сверхплотной СРД.

В модуле оценки бюджета направленных радиолиний из набора $L_{(i,i,k)}$ выполняется расчет уровня принимаемого сигнала $P_{RX(j,i,k)}$ в каждой направленной радиолинии между сектором s_i базовой станции gNB_j и пользовательским устройством UE_k с учетом потерь РРВ $PL_{(i,i,k)}$ (от англ PathLoss) в модели сверхплотной СРД.

В модуле оценки SINR по совокупности направленных радиолиний SOI/SNOI выполняется оценка отношений $SINR_{(1,i,k)}$ по направленным радиолиниям

из набора $L_{(1,i,k)}$ для 3-х секторов центральной соты базовой станции gNB_1 согласно сценарию на рисунке 1 для модели сверхплотной СРД. Бюджет направленных радиолиний SOI оценивается для набора $L_{(1,i,k)}$. Влияние помех SNOI на $SINR_{(1,i,k)}$ оценивается по вкладу от радиолиний из набора: 1) $L_{(1,i,k')}, k' \neq k$ внутри своего сектора s_i центральной соты базовой станции gNB_1 ; 2) $L_{(1,i',k)}$ других секторов $s_{i'}$, $i' \neq i$ своей соты базовой станции gNB_1 ; 3) $L_{(j,i,k)}$ 3-х секторов s_j окружающих сот gNB_j .

Формализуем далее функции каждого модуля имитационной модели совокупности радиолиний с диаграммообразованием по схеме на рисунке 2.

2.3. Модули формирования и обработки совокупности радиолиний с LAB

2.3.1. Модуль позиционирования устройства

В спецификации 3GPP TS 23.273 [22] для сетей 5G NR (аббр. от англ. New Radio) формализована организация сервисов позиционирования (LCS, аббр. от англ. Location Services). Позиционирование UE радиотехническими методами основано, преимущественно, на разностно-дальномерных и угломерных первичных измерений и использует метод оценки разности времен прихода сигнала в канале «вниз» (DL-TDOA, аббр. от англ. Downlink Time Difference of Arrival) и метод оценки угла прихода сигнала в канале «вверх» (UL-AOA, аббр. от англ. Angle of Arrival).

Рисунок 3 иллюстрирует характеристику местоположения устройства на плоскости, где $\mathbf{x} = [x, y, z]$ – координаты истинного местоположения UE; $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$ – оценка координат (ОК) местоположения UE; σ – неопределенность оценки местоположения, задающая окружность диаметра σ с центром в точке $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$.

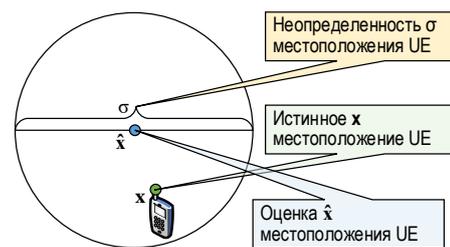


Рис. 3. Характеристика местоположения UE

Fig. 3. UE Location Characteristic

Согласно спецификации 3GPP TS 22.071 [23] каждому LCS соответствует своя категория горизонтальной точности, которая может быть представлена одной из фигур географической протяженности (GAD, аббр. от англ. Geographical Area Description), формализованной в 3GPP TS 23.032 [24]. Неопределенность местоположения характеризует погрешности ОК кругом диаметром σ с центром в точке $\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$. Функциональным результатом работы модуля позиционирования устройства является характеристика местоположения UE, вклю-

чающая оценку координат $\hat{x} = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}]$ и их неопределенность σ .

В 3GPP TS 22.261 [25] специфицированы категории неопределенности местоположения, обозначенные индексами PSL (аббр. от англ. Positioning Service Level). Каждому из 6 индексов PSL соответствует неопределенность абсолютного местоположения σ_{UE} в горизонтальной плоскости вместе с другими ключевыми показателями эффективности KPI (аббр. от англ. Key Performance Indicator) и сценариями функционирования СРД 5G. Таблица 1 содержит параметр неопределенности σ для сценариев сетей 5G согласно 3GPP TS 22.261 [25].

ТАБЛИЦА 1. Параметр неопределенности местоположения
TABLE 1. Location Uncertainty Parameter

Индекс PSL	Покрытие	Сценарий	$\sigma/2$, м
1	внутри/снаружи помещений	село/город	10
2	снаружи помещений	село/город/плотный город	3
3,4	снаружи помещений	село/город/плотный город	1
5,6	снаружи помещений	село/плотный город	0,3

Исследование влияния точности позиционирования на отношение SINR будем выполнять в диапазоне σ от 10 до 1 м. Далее формализуем функции модуля управления ориентацией луча по местоположению устройства.

2.3.2. Модуль управления ориентацией луча по местоположению устройства

Рассмотрим на рисунке 4 зону обслуживания сектора s_i трехсекторной базовой станции gNB_j и точку \hat{x}_k ОК пользовательского устройства UE_k. Согласно сделанному ранее допущению, AP каждого сектора s_i базовой станции позволяет одновременно формировать несколько лучей при работе на передачу и обслуживать несколько пользовательских устройств UE_k. Ориентация каждого луча AP сектора s_i выполняется в направлении на каждое пользовательское устройство UE_k по известной оценке его координат \hat{x}_k . Будем полагать (см. рисунок 4), что точка \hat{x}_k в зоне обслуживания сектора s_i характеризуется углом азимута $\varphi_{(i,k)}$ в горизонтальной плоскости и углом места $\theta_{(i,k)}$ в вертикальной плоскости. Углы азимута $\varphi_{(i,k)}$ измеряются относительно центра сектора s_i в диапазоне от 0° до 360°, а углы места $\theta_{(i,k)}$ измеряются относительно центра сектора s_i в диапазоне от -90° до 90°.

Характеристика ориентации луча сектора s_i на каждое пользовательское устройство UE_k включает направление (steering) по азимуту $\varphi_{(i,k)}$ в горизонтальной плоскости (см. рисунок 4a) и наклон (tilting) по углу места $\theta_{(i,k)}$ в вертикальной плоскости (см. рисунок 4b).

Далее введем обозначения для характеристики ширины луча на рисунке 4. Будем полагать, что ширина луча моделируется конусом и измеряется по уровню -3 дБ от максимума в заданной ориентации по азимуту $\varphi_{(i,k)}$ и углу места $\theta_{(i,k)}$. В горизонтальной плоскости обозначим ширину луча через $\varphi_{3dB(i,k)}$, а в вертикальной – через $\theta_{3dB(i,k)}$.

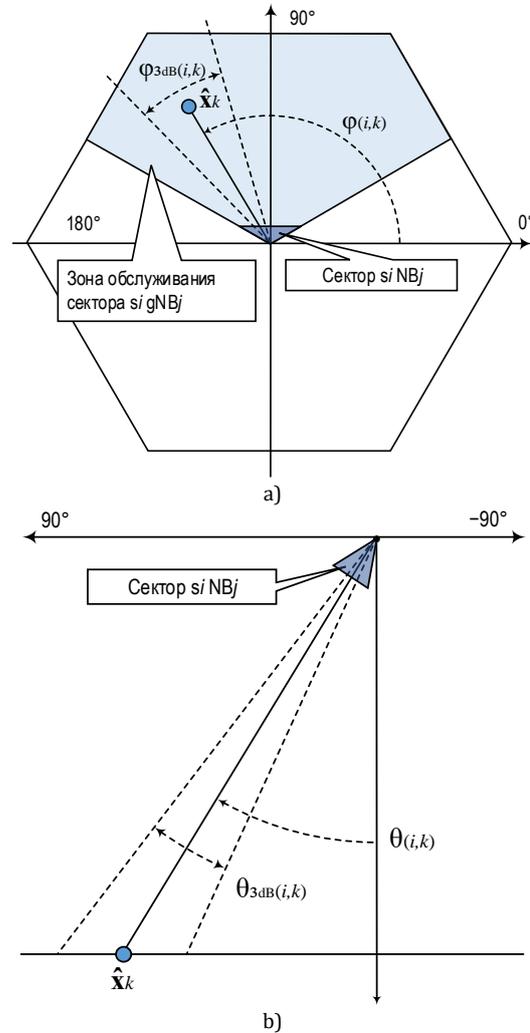


Рис. 4. Характеристика ориентации луча на пользовательское устройство: а) по азимуту (ширина луча в горизонтальной плоскости); б) по углу места (ширина луча в вертикальной плоскости)

Fig. 4. Characteristics of Beam Orientation to the UE: a) in Azimuth (Beamwidth in the Horizontal Plane); b) by Elevation (Beamwidth in the Vertical Plane)

Характеристика ширины луча сектора s_i на каждое пользовательское устройство UE_k включает ширину луча $\varphi_{3dB(i,k)}$ в горизонтальной плоскости (см. рисунок 4a) и ширину луча $\theta_{3dB(i,k)}$ в вертикальной (см. рисунок 4b).

Из рисунка 4 следует, что ширина луча в горизонтальной $\varphi_{3dB(i,k)}$ и вертикальной $\theta_{3dB(i,k)}$ плоскостях существенно влияет на зону покрытия AP сектора s_i данным лучом, что, в свою очередь, определяет уровень принятого сигнала не только в точке \hat{x}_k , на которую ориентирован данный луч, но и в

окрестности данной точки. Зона покрытия лучом, который сориентирован в точку \hat{x}_k , количественно характеризуется кортежем из четырех углов $\varphi_{(i,k)}, \theta_{(i,k)}, \varphi_{3dB(i,k)}, \theta_{3dB(i,k)}$. Если для настройки ориентации луча достаточно оценки координат \hat{x}_k , то для настройки ширины луча, необходимой для радиопокрытия заданной точки \hat{x}_k , AP сектора s_i необходимо знать неопределенность σ местоположения \hat{x}_k . Далее формализуем функции модуля управления шириной луча по неопределенности местоположения устройства.

2.3.2. Модуль управления шириной луча по местоположению устройства

Рисунок 5 иллюстрирует порядок настройки ширины луча в горизонтальной $\varphi_{3dB(i,k)}$ и вертикальной $\theta_{3dB(i,k)}$ плоскостях по оценке местоположения \hat{x}_k пользовательского устройства UE_k и его неопределенности σ для AP сектора s_i [14]. Показана зона обслуживания одного сектора s_i базовой станции gNB_j и оценка координат \hat{x}_k пользовательского устройства UE_k, неопределенность местоположения которой характеризуется параметром σ .

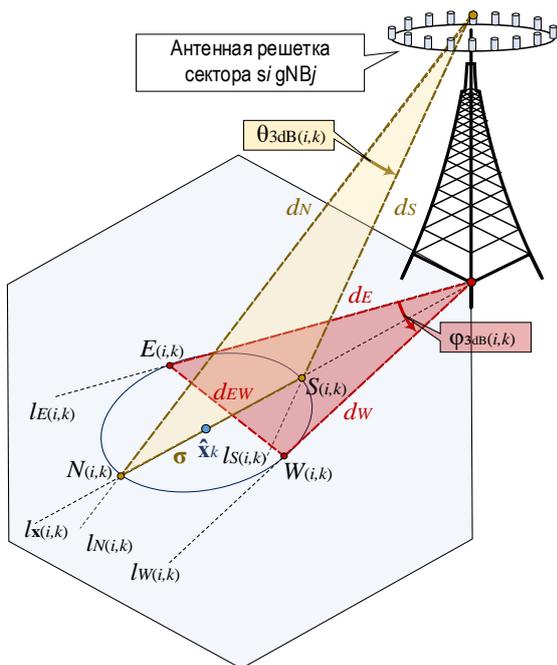


Рис. 5. Настройка ширины луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях

Fig. 5. Beamwidth Tuning in the Horizontal and Vertical Planes

Будем полагать, что ориентация AP сектора s_i в глобальной системе координат определяется относительно центра сектора s_i следующим образом (см. рисунок 5): север (North) – сверху; юг (South) – снизу; запад (West) – слева; восток (East) – справа.

Рассмотрим два луча $l_{E(i,k)}$ и $l_{W(i,k)}$, исходящие из точки s_i^H проекции центра сектора s_i в горизонтальной плоскости и касательные точки на окружности неопределенности местоположения UE_k

диаметра σ с центром в точке \hat{x}_k . Обозначим касательную точку луча $l_{E(i,k)}$ и окружности неопределенности местоположения UE_k через $E_{(i,k)}$ (восток), а касательную точку луча $l_{W(i,k)}$ и окружности неопределенности местоположения UE_k через $W_{(i,k)}$ (запад). Угол между двумя лучами l_E и l_W в горизонтальной плоскости представляет собой ширину AP сектора s_i по азимуту $\varphi_{3dB(i,k)}$ для пользовательского устройства UE_k.

Рассмотрим теперь луч $l_{x(i,k)}$, исходящий из точки s_i^H проекции центра сектора s_i в горизонтальной плоскости, и проходящий через точку \hat{x}_k оценки местоположения UE_k. Данный луч $l_{x(i,k)}$ пересекает окружность неопределенности местоположения UE_k в точках $N_{(i,k)}$ (север) и $S_{(i,k)}$ (юг). Проведем два луча $l_{N(i,k)}$ и $l_{S(i,k)}$, исходящие из точки s_i^V сектора s_i в вертикальной плоскости, и касательные к окружности неопределенности местоположения UE_k диаметра σ с центром в точке \hat{x}_k в вертикальной плоскости. Обозначим касательную точку луча $l_{N(i,k)}$ и окружности неопределенности местоположения UE_k через $N_{(i,k)}$ (север), а касательную точку луча $l_{S(i,k)}$ и окружности неопределенности местоположения UE_k через $S_{(i,k)}$ (юг). Угол между двумя лучами l_N и l_S в вертикальной плоскости представляет собой ширину луча AP сектора s_i по углу места $\theta_{3dB(i,k)}$ для пользовательского устройства UE_k.

Таким образом, из приведенного на рисунке 5 порядка настройки ширины луча можно сделать качественный вывод о том, что необходимая и достаточная для радиопокрытия пользовательского устройства UE_k ширина луча по уровню половинной мощности HPBW непосредственно определяется погрешностью σ оценки его координат \hat{x}_k . Количественную оценку требуемой ширины луча можно выполнить по теореме косинусов из анализа двух треугольников.

Рассмотрим на рисунке 5 треугольник в горизонтальной плоскости, образованный сторонами d_E, d_W и d_{EW} . Ширину луча в горизонтальной плоскости $\varphi_{3dB(i,k)}$ для направленной радиолинии (i,k) между AP сектора s_i и пользовательским устройством UE_k с учетом равенства сторон $d_E = d_W$ можно определить выражением:

$$\varphi_{3dB(i,k)} = \arccos\left(1 - \frac{d_{EW}^2}{2d_E^2}\right). \quad (1)$$

Рассмотрим треугольник в вертикальной плоскости, образованный сторонами d_N, d_S и σ (см рисунок 5). Ширину луча в вертикальной плоскости $\theta_{3dB(i,k)}$ для направленной радиолинии (i,k) между AP сектора s_i и пользовательским устройством UE_k можно определить выражением:

$$\theta_{3dB(i,k)} = \arccos\left(\frac{d_N^2 + d_S^2 - \sigma^2}{2d_N d_S}\right). \quad (2)$$

Из анализа порядка настройки ширины луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях (см. рисунок 5) следует, что ориентация и ширина диаграммы направленности AP адаптируется к текущему местоположению $\hat{\mathbf{x}}_k$ и его неопределенности σ . С точки зрения влияния удаленности UE и неопределенности его местоположения характер адаптации можно охарактеризовать следующим образом: 1) чем ближе пользовательское устройство UE_k располагается к обслуживаемому сектору s_i , тем шире получится луч; и наоборот, чем дальше UE_k располагается от s_i , например, на границе обслуживаемого сектора, тем уже получится луч; 2) чем меньше неопределенность σ оценки координат $\hat{\mathbf{x}}_k$, тем уже в горизонтальной и вертикальной плоскостях будет луч; и наоборот, чем больше неопределенность σ оценки координат $\hat{\mathbf{x}}_k$, тем шире в горизонтальной и вертикальной плоскостях будет луч. Далее формализуем алгоритм работы модуля управления шириной луча по местоположению для совокупности радиолиний.

2.3.4. Алгоритм управления шириной луча по местоположению устройства

Управление шириной луча по местоположению осуществляется для совокупности направленных радиолиний (i, k) в каждом секторе s_i базовой станции $gNB_j, j = 1, \dots, 7$ модели сверхплотной СРД (см. рисунок 1). Каждая направленная радиолиния (i, k) количественно характеризуется кортежем из четырех углов $\varphi_{(i,k)}, \theta_{(i,k)}, \varphi_{3dB(i,k)}, \theta_{3dB(i,k)}$. Технологически минимальная ширина ДНА по уровню половинной мощности HPBW определяется конструктивом и размерностью AP, поэтому для имитационной модели необходимо инициализировать минимальную ширину луча в горизонтальной φ_{3dBmin} и вертикальной θ_{3dBmin} плоскостях. Так, для эквидистантной прямоугольной AP (URA, аббр. от англ. Uniform Rectangular Array) известна следующая оценка ширины луча диаграммы направленности по уровню половинной мощности в горизонтальной и вертикальной плоскостях [26–29]:

$$HPBW_H = HPBW_V \approx \frac{1,772}{N - 1} \text{ рад}, \quad (3)$$

где N – число элементов AP вдоль оси Ox и вдоль оси Oy при расстоянии между элементами в половину длины волны. Например, при размерности 32×32 ширина луча ДНА будет составлять $\varphi_{3dB} = \theta_{3dB} = 3,3^\circ$.

Скрипт 1 содержит процедуры алгоритма работы модуля диаграммообразования на основе позиционирования [14].

Входными данными алгоритма являются: набор $i \in \mathbb{I}$ секторов s_i ; набор $k \in \mathbb{K}$ оценок координат $\hat{\mathbf{x}}_k$ пользовательских устройств UE_k ; неопределенность σ оценок координат; минимальная ширина луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях $\varphi_{3dBmin} = \theta_{3dBmin} = 3^\circ$.

Скрипт 1. Алгоритм модуля диаграммообразования LAB

```

1  Входные параметры:  $\mathbb{I}, \mathbb{K}, \sigma, \varphi_{3dBmin}, \theta_{3dBmin}$ 
2  Выходные параметры:  $L_{(j,i,k)}, \varphi_{(i,k)}, \theta_{(i,k)}, \varphi_{3dB(i,k)}, \theta_{3dB(i,k)}$ 
3  Цикл по сотам  $j$  в наборе  $\mathbb{J}$ 
4      Цикл по секторам  $i$  в наборе  $\mathbb{I}$ 
5          Цикл по устройствам  $k$  в наборе  $\mathbb{K}$ 
6              // Инициализация направленных радиолиний набора  $L_{(j,i,k)}$ 
7              Оценка расстояний  $gNB_{js_i} \rightarrow UE_k$  в 2D
8              // Вычисление касательных к окружности неопределенности
9               $[W_{(i,k)}, E_{(i,k)}, N_{(i,k)}, S_{(i,k)}] = f \left( \begin{matrix} s_i^H, s_i^V, \hat{\mathbf{x}}_k, \sigma, l_{x(i,k)}, \dots \\ l_{E(i,k)}, l_{W(i,k)}, l_{N(i,k)}, l_{S(i,k)} \end{matrix} \right)$ 
10             // Настройка ширины луча в горизонтальной плоскости
11              $d_E = s_i^H \xrightarrow{H} E_{(i,k)}; d_W = s_i^H \xrightarrow{H} W_{(i,k)}; d_E = d_W$ 
12              $d_{EW} = W_{(i,k)} \xrightarrow{H} E_{(i,k)}$ 
13              $\varphi_{3dB(i,k)} = \arccos \left( 1 - \frac{d_{EW}^2}{2d_E^2} \right)$ 
14              $\varphi_{3dB(i,k)} = \max(\varphi_{3dB(i,k)}, \varphi_{3dBmin})$ 
15             // Настройка ширины луча в вертикальной плоскости
16              $d_N = s_i^V \xrightarrow{V} N_{(i,k)}$ 
17              $d_S = s_i^V \xrightarrow{V} S_{(i,k)}$ 
18              $\theta_{3dB(i,k)} = \arccos \left( \frac{d_N^2 + d_S^2 - \sigma^2}{2d_N d_S} \right)$ 
19              $\theta_{3dB(i,k)} = \max(\theta_{3dB(i,k)}, \theta_{3dBmin})$ 
20             Завершение цикла по устройствам  $k$  в наборе  $\mathbb{K}$ 
21             Завершение цикла по секторам  $i$  в наборе  $\mathbb{I}$ 
22             Завершение цикла по сотам  $j$  в наборе  $\mathbb{J}$ 

```

Выходными данными алгоритма является набор $L_{(j,i,k)}$ совокупности направленных радиолиний модели сверхплотной СРД между i секторами из набора $i \in \mathbb{I}$ и k пользовательскими устройствами UE_k с оценками координат $\hat{\mathbf{x}}_k$ из набора $k \in \mathbb{K}$ для каждой базовой станции gNB_j из набора $j \in \mathbb{J}$. Для каждой радиолинии $gNB_{js_i} \rightarrow UE_k$ из набора $L_{(j,i,k)}$ совокупности направленных радиолиний записывается кортеж из четырех углов $\varphi_{(i,k)}, \theta_{(i,k)}, \varphi_{3dB(i,k)}, \theta_{3dB(i,k)}$.

Строки 3–5 начинают, а строки 20–22 завершают цикл алгоритма (скрипт 1) по сотам j в наборе \mathbb{J} , секторам i в наборе \mathbb{I} и точкам ОК устройств k в наборе \mathbb{K} , соответственно. При инициализации каждой направленной радиолинии (i, k) для UE_k в секторе s_i соты базовой станции gNB_j выполняется оценка расстояний между точкой проекции центра сектора s_i^H в горизонтальной плоскости и точкой ОК $\hat{\mathbf{x}}_k$ устройства UE_k :

$$d_{2D(i,k)} = \|s_i^H - \hat{\mathbf{x}}_k\|, \quad (4)$$

где $s_i^H = [x_i, y_i, z_i]$ – координаты точки проекции центра сектора s_i в горизонтальной плоскости, т. е. $z_i = 0$; $\hat{\mathbf{x}}_k = [\hat{x}_k, \hat{y}_k, \hat{z}_k]$ – оценка координат пользовательского устройства UE_k ; $\|\cdot\|$ – оператор нормы вектора в евклидовом пространстве, определяемый выражением:

$$\|s_i^H - \hat{\mathbf{x}}_k\| = \sqrt{(x_i - \hat{x}_k)^2 + (y_i - \hat{y}_k)^2 + (z_i - \hat{z}_k)^2}. \quad (5)$$

Далее выполняется вычисление касательных точек $W_{(i,k)}, E_{(i,k)}, N_{(i,k)}, S_{(i,k)}$, полученных в результате касания окружности неопределенности местоположения лучами $l_{E(i,k)}, l_{W(i,k)}, l_{N(i,k)}, l_{S(i,k)}$, соответственно. Оценка значений $\varphi_{3dB(i,k)}$ и $\theta_{3dB(i,k)}$ выполняется при ограничении на минимальную ширину луча $\varphi_{3dBmin}, \theta_{3dBmin}$.

Последовательность оценки $\varphi_{3dB(i,k)}$ включает построение треугольника из отрезков d_W, d_E и d_{EW} . Отрезок d_E получается в результате соединения точки s_i^H с точкой $E_{(i,k)}$ лучом $l_{E(i,k)}$: $s_i^H \xrightarrow{H} E_{(i,k)}$; оператор $(\cdot) \xrightarrow{H} (\cdot)$ обозначает соединение ребра через две вершины в горизонтальной плоскости.

Аналогично отрезок d_W получается в результате соединения точки s_i^H с точкой $W_{(i,k)}$ лучом $l_{W(i,k)}$: $s_i^H \xrightarrow{H} W_{(i,k)}$.

Отрезок d_{EW} получается в результате соединения точки $W_{(i,k)}$ с точкой $E_{(i,k)}$: $d_{EW} = W_{(i,k)} \xrightarrow{H} E_{(i,k)}$. Далее по полученным сторонам треугольника d_W, d_E и d_{EW} выполняется оценка $\varphi_{3dB(i,k)}$, согласно (1).

Последовательность оценки $\theta_{3dB(i,k)}$ включает построение треугольника из отрезков d_N, d_S и σ :

- отрезок d_N получается в результате соединения точки s_i^V с точкой $N_{(i,k)}$ лучом $l_{N(i,k)}$: $s_i^V \xrightarrow{V} N_{(i,k)}$;
- отрезок d_S получается в результате соединения точки s_i^V с точкой $S_{(i,k)}$ лучом $l_{S(i,k)}$: $s_i^V \xrightarrow{V} S_{(i,k)}$;

Далее по полученным сторонам треугольника d_N, d_S и σ выполняется оценка $\theta_{3dB(i,k)}$, согласно (2). После чего формализуем функции модуля формирования направленных радиолиний в модели сверхплотной СРД.

2.3.5. Модуль формирования направленных радиолиний с LAB

Диаграммообразование LAB осуществляется для совокупности направленных радиолиний (i, k) в каждом секторе s_i базовой станции gNB_j модели сверхплотной СРД (см. рисунок 1).

Каждая направленная радиолиния (i, k) сектора s_i количественно характеризуется кортежем из четырех углов $\varphi_{(i,k)}, \theta_{(i,k)}, \varphi_{3dB(i,k)}, \theta_{3dB(i,k)}$. Далее назовем такой кортеж трафиковым лучом (i, k) . Набор трафиковых лучей $L_{(i,k)}$ представляет собой исходные данные для модуля оценки бюджета направленных радиолиний и последующей их классификации на направленные радиолинии SOI и направленные радиолинии помех SNOI.

Введем *ограничения и допущения работы модуля формирования направленных радиолиний при организации узких трафиковых лучей* в настоящей имитационной модели: 1) каждая базовая станция

gNB_j обслуживает три неперекрывающихся сектора s_i ; при этом каждый сектор s_i обслуживается своей AP; 2) в каждом секторе s_i обслуживаются K пользовательских устройств UE_k посредством индивидуальных трафиковых лучей из набора $L_{(i,k)}$; 3) на секторах s_i базовых станций gNB_j предполагается обеспечение радиопокрытия в каждом секторе s_i соты gNB_j; 4) каждый сектор s_i соты gNB_j осведомлен об оценке \hat{x}_k текущего местоположения пользовательского устройства UE_k в своей зоне обслуживания; 5) AP каждого сектора s_i соты gNB_j образована из достаточно большого числа излучающих элементов N^2 , которое значительно больше числа K пользовательских устройств UE_k, обслуживаемых в данном секторе s_i ; 6) каждое пользовательское устройство UE_k может быть обслужено достаточно узким отдельным трафиковым лучом, формируемым AP сектора s_i ; 7) каждый отдельный трафиковый луч задается кортежем $\varphi_{(i,k)}, \theta_{(i,k)}, \varphi_{3dB(i,k)}, \theta_{3dB(i,k)}$ и характеризуется ориентацией и шириной в заданном секторе s_i ; 8) анализ показателей пространственного уплотнения одновременных передач SDMA для совокупности направленных радиолиний по критерию SINR производится для набора одновременно работающих трафиковых лучей $L_{(i,k)}$ каждого сектора s_i ; 9) трафиковые лучи на каждое пользовательское устройство UE_k из набора $L_{(j,i,k)}$, всех сот сети активируются одновременно во всех секторах s_i всех базовых станций gNB_j; 10) в каждом узком луче радиолинии gNB_j_{s_i} → UE_k передача ведется с максимальной мощностью, т. е. адаптация мощности в трафиковом канале «вниз» не используется; 11) ориентация луча AP каждого сектора s_i осуществляется на известную сети точку оценки координат \hat{x}_k пользовательского устройства UE_k.

Далее формализуем функции модуля оценки бюджета потерь в направленных радиолиниях модели сверхплотной СРД.

2.3.6. Модуль оценки бюджета направленных радиолиний с LAB

Оценим уровень сигнала, принятого в точке истинного (*true*) местоположения x_k пользовательского устройства UE_k, при ориентации луча на точку оценки (*estimate*) местоположения \hat{x}_k пользовательского устройства UE_k. Далее для краткости обозначим сектор s_i символом i , индекс точки x_k символом k_t (*true*), а индекс точки \hat{x}_k символом k_e (*estimate*). Будем полагать, что UE_k располагается в дальней зоне излучения AP сектора s_i . Тогда мощность сигнала $P_{(i,k_e,k_t)}^{RX}$, принятого UE_k в точке x_k истинного местоположения с индексом k_t от луча сектора s_i , ориентированного в точку \hat{x}_k оценки местоположения с индексом k_e можно оценить по формуле [17]:

$$P_{(i,k_e,k_t)}^{RX} = P_s^{TX} - L_{(i,k_t)}^{PL} + \underbrace{A_{(i,k_e,k_t)}^{AZ} + A_{(i,k_e,k_t)}^{EL}}_{\text{ДНА}} + G_s^{TX} + \underbrace{B_{(i,k_e,k_t)}^{AZ} + B_{(i,k_e,k_t)}^{EL}}_{\text{КУ при ДО}} + G_s^{BF}, \quad (6)$$

где P_s^{TX} – максимальная мощность передачи всей AP, расположенной в центре сектора s_i ; $L_{(i,k_t)}^{PL}$ – потери при РРВ в пространстве между точкой s_i и точкой \mathbf{x}_k с индексом k_t ; $A_{(i,k_e,k_t)}^{AZ}$ и $A_{(i,k_e,k_t)}^{EL}$ – ДНА антенной решетки сектора s_i в горизонтальной и вертикальной плоскостях, определенные в (10) и (11), соответственно; G_s^{TX} – максимальный коэффициент усиления (КУ) одного элемента AP, расположенной в центре сектора s_i ; G_s^{BF} – максимальный КУ при диаграммообразовании (ДО); $B_{(i,k_e,k_t)}^{AZ}$ и $B_{(i,k_e,k_t)}^{EL}$ – оценка КУ AP в точке \mathbf{x}_k с индексом k_t при диаграммообразовании на точку $\hat{\mathbf{x}}_k$ с индексом k_e [16]:

$$B_{(i,k_e,k_t)}^{AZ} = 10 \log_{10} \left[\text{sinc} \left(\frac{\varphi_{(i,k_t)} - \varphi_{(i,k_e)}}{1,13 \cdot \varphi_{3\text{dB}(i,k_e)}} \right)^2 \right], \quad (7)$$

$$B_{(i,k_e,k_t)}^{EL} = 10 \log_{10} \left[\text{sinc} \left(\frac{\theta_{(i,k_t)} - \theta_{(i,k_e)}}{1,13 \cdot \theta_{3\text{dB}(i,k_e)}} \right)^2 \right]. \quad (8)$$

Из анализа (6–8) следует, что мощность принятого сигнала вычисляется из набора параметров, которые масштабируют мощность передачи AP.

Нормированный коэффициент ослабления сигнала в точке k_t по сравнению с точкой k_e , на которую ориентирован луч, можно выразить формулой:

$$F_{(i,k_e,k_t)} = \left(10^{\frac{A_{(i,k_e,k_t)}^{AZ} + A_{(i,k_e,k_t)}^{EL}}{10}} \right)^2, \quad (9)$$

где $A_{(i,k_e,k_t)}^{AZ}$ и $A_{(i,k_e,k_t)}^{EL}$ – диаграмма направленности AP в дБ в горизонтальной (по азимуту AZ) и вертикальной (по углу места EL) плоскостях, наблюдаемая в точке \mathbf{x}_k с индексом k_t при ориентации луча от центра сектора s_i в точку $\hat{\mathbf{x}}_k$ с индексом k_e . ДНА в горизонтальной и вертикальной плоскостях, наблюдаемые по азимуту $\varphi_{(i,k_t)}$ и углу места $\theta_{(i,k_t)}$ в точке \mathbf{x}_k с индексом k_t при ориентации луча по азимуту $\varphi_{(i,k_e)}$ и углу места $\theta_{(i,k_e)}$ в точку $\hat{\mathbf{x}}_k$ с индексом k_e , можно определить выражениями [20, 21]:

$$A_{(i,k_e,k_t)}^{AZ} = -\min \left[12 \left(\frac{\varphi_{(i,k_t)} - \varphi_{(i,k_e)}}{\varphi_{3\text{dB}(i,k_e)}} \right), A_{\min}^{AZ} \right], \quad (10)$$

$$A_{(i,k_e,k_t)}^{EL} = -\min \left[12 \left(\frac{\theta_{(i,k_t)} - \theta_{(i,k_e)}}{\theta_{3\text{dB}(i,k_e)}} \right), A_{\min}^{EL} \right], \quad (11)$$

где A_{\min}^{AZ} и A_{\min}^{EL} – ограничение на уровень боковых лепестков по азимуту и углу места, соответственно. Из анализа выражений (10) и (11) следует, что максимум ДНА получится при $\varphi_{(i,k_t)} = \varphi_{(i,k_e)}$ и $\theta_{(i,k_t)} = \theta_{(i,k_e)}$, т. е. тогда, когда точка $\hat{\mathbf{x}}_k$ с индексом k_t ОК UE_k, используемая при настройке ориентации и

ширины луча, совпадает с точкой \mathbf{x}_k с индексом k_t истинного местоположения UE_k. При этом значения ширины луча по азимуту $\varphi_{3\text{dB}(i,k_e)}$ и углу места $\theta_{3\text{dB}(i,k_e)}$ выступают масштабирующими параметрами диаграммы направленности: чем шире луч, тем большую территорию он покрывает и, следовательно, слабее оказывается влияние ориентации по азимуту и углу места.

Рисунок 6 иллюстрирует сценарий оценки бюджета потерь в направленных радиоприемах с прямой видимостью (LOS, аббр. от англ. Line-of-Sight) согласно 3GPP TR 38.901 [31] для микросоты улиц городского каньона (UMi, аббр. от англ. Urban Micro – Street Canyon). Оценка потерь в радиоприемах LOS выполняется по формуле [31]:

$$L_{(i,k_t)}^{PL} = 32,4 + 21\lg(d_{3D}) + 20\lg(f_c), \quad (12)$$

где d_{3D} – 3D расстояние между центром сектора s_i базовой станции gNB и местоположением UE_k с учетом высоты h_{gNB} подвеса AP сектора s_i и высоты h_{UE} антенны UE_k; d_{2D} – 2D расстояние между gNB и UE_k; f_c – несущая частота в Гц.

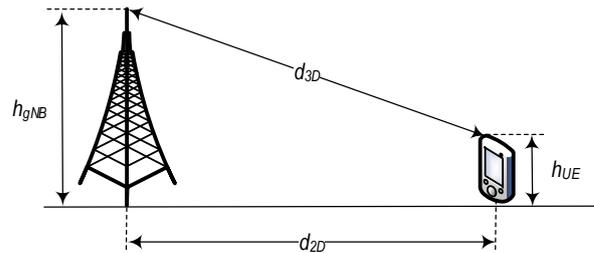


Рис. 6. Сценарий оценки бюджета потерь в направленных радиоприемах LOS

Fig. 6. Scenario for Directional Link Budget Estimate in LOS

Оценка расстояния между точкой центра сектора s_i в пространстве и точкой ОК $\hat{\mathbf{x}}_k$ устройства UE_k в пространстве можно оценить по формуле:

$$d_{3D(i,k)} = \|\mathbf{s}_i^V - \hat{\mathbf{x}}_k\|, \quad (13)$$

где $\mathbf{s}_i^V = [x_i, y_i, z_i]$ – координаты точки центра сектора s_i в пространстве.

Далее формализуем функции модуля оценки SINR по совокупности радиоприемов SOI/SNOI.

2.3.7. Модуль оценки SINR по совокупности радиоприемов SOI/SNOI

В имитационной модели анализируется набор из точек $k_e \in \mathbb{K}_e$ ОК $\hat{\mathbf{x}}_k$ пользовательского устройства UE_k и набор из точек $k_t \in \mathbb{K}_t$ истинных местоположений \mathbf{x}_k пользовательского устройства UE_k. Ориентация луча каждого сектора s_i на каждое пользовательское устройство UE_k в имитационной модели осуществляется по точкам $\hat{\mathbf{x}}_k$ оценок координат UE_k из набора $k_e \in \mathbb{K}_e$.

Оценка уровня принимаемого SOI в имитационной модели осуществляется по точкам $k_t \in \mathbb{K}_t$ и

$k_e \in \mathbb{K}_e$ из набора $L_{(1,i,k)}$ в трех секторах центральной соты базовой станции gNB_1 . Оценка уровня принимаемых помех SNOI в ИМ также осуществляется по точкам $k_t \in \mathbb{K}_t$ и $k_e \in \mathbb{K}_e$ из набора $L_{(1,i,k)}$ в трех секторах центральной соты базовой станции gNB_1 . При этом в каждой точке истинных местоположений \mathbf{x}_k и оценок координат $\hat{\mathbf{x}}_k$ из набора $L_{(1,i,k)}$ учитывается вклад помех от одновременной работы трафиковых лучей направленных радиолоний SNOI из набора $L_{(j,i,k)}$, от всех остальных сот и секторов рассматриваемой модели сверхплотной сети радиодоступа.

В результате моделирования получаем два набора значений $SINR_{(1,i,k_e,k_t)}$ и $SINR_{(1,i,k_e,k_e)}$.

Набор значений $SINR_{(1,i,k_e,k_t)}$ рассчитывается в трех секторах центральной соты базовой станции

gNB_1 для точек \mathbf{x}_k истинных местоположений пользовательских устройств UE_k из набора $k_t \in \mathbb{K}_t$ при ориентации трафиковых лучей на точки $\hat{\mathbf{x}}_k$ оценок координат UE_k из набора $k_e \in \mathbb{K}_e$.

Набор значений $SINR_{(1,i,k_e,k_e)}$ рассчитывается в трех секторах центральной соты базовой станции gNB_1 для точек $\hat{\mathbf{x}}_k$ оценок UE_k из набора $k_e \in \mathbb{K}_e$ при ориентации лучей на точки $\hat{\mathbf{x}}_k$ оценок координат UE_k из набора $k_e \in \mathbb{K}_e$.

При одновременной работе трафиковых лучей всех направленных радиолоний из набора $L_{(j,i,k)}$, рассматриваемой модели сверхплотной СРД отношение $SINR_{(1,i,k_e,k_t)}$ можно оценить в виде (14), где $P_{(1,i,k_e,k_t)}^{RX}$ – мощность принятого SOI (6) для трех секторов центральной соты базовой станции gNB_1 ; P_N – мощность шума.

$$SINR_{(1,i,k_e,k_t)} = \frac{P_{(1,i,k_e,k_t)}^{RX}}{\underbrace{\sum_{k' \neq k_e} P_{(1,i,k',k_t)}^{RX}}_{\text{помехи внутри своего сектора}} + \underbrace{\sum_{k_e} \sum_{i' \neq i} P_{(1,i',k_e,k_t)}^{RX}}_{\text{помехи внутри своей соты}} + \underbrace{\sum_{k_e} \sum_i \sum_{j \neq 1} P_{(j,i',k_e,k_t)}^{RX}}_{\text{помехи от соседних сот}} P_N} \quad (14)$$

Рассмотрим слагаемые помех SNOI в знаменателе (14). Первое слагаемое определяет суммарный вклад помех от направленных радиолоний из набора $L_{(1,i,k')}$, $k' \neq k$ внутри своего сектора центральной соты базовой станции gNB_1 . Второе слагаемое определяет суммарный вклад помех от направленных радиолоний из набора $L_{(1,i',k)}$ других секторов $s_{i'}$, $i' \neq i$ своей соты базовой станции gNB_1 . Третье слагаемое определяет суммарный вклад помех от направленных радиолоний из набора $L_{(j,i,k)}$ трех секторов s_j , окружающих сот базовых станций gNB_j , $j = 2, \dots, 7$.

Из выражения (14) следует, что каждый луч является источником помех для других направленных радиолоний как в своем секторе соты, так и в других секторах других сот. В ИМ оценка SINR выполняется для трех сценариев с учетом помех: внутри своего сектора (Sector) – сценарий S , внутри своего сектора и своей соты (Cell) – сценарий $S + C$ и внутри своего сектора, своей соты и окружающих сот модели сети (Network) – сценарий $S + C + N$.

Пропускную способность (ПС) в имитационной модели выполняется в точках \mathbf{x}_k истинных местоположений пользовательских устройств UE_k из набора $k_t \in \mathbb{K}_t$ при ориентации трафиковых лучей на точки $\hat{\mathbf{x}}_k$ оценок координат UE_k из набора $k_e \in \mathbb{K}_e$. Нормированную ПС в канале «вниз» в бит/с/Гц для направленных радиолоний из набора $L_{(1,i,k)}$ в трех секторах центральной соты базовой станции gNB_1 можно оценить по формуле [18]:

$$T_{(1,i,k_e,k_t)} = \log_2(1 + SINR_{(1,i,k_e,k_t)}). \quad (15)$$

Метрика SINR может выступать косвенной характеристикой допустимого пространственного уплотнения одновременных передач и зависит от ряда факторов. В настоящей имитационной модели отношение сигнал/(шум + помеха) исследуется в зависимости от: 1) погрешности позиционирования σ ; 2) радиуса соты R ; 3) числа K пользовательских устройств в одном секторе.

Формализуем далее процедуры работы имитационной модели совокупности радиолоний с диаграммообразованием LAB.

2.4. Процедуры работы имитационной модели совокупности радиолоний с LAB

Рисунок 7 иллюстрирует последовательность процедур работы имитационной модели совокупности радиолоний с диаграммообразованием LAB для заданного сценария территориального развертывания.

Началом работы имитационной модели является процедура инициализации территориального плана гексагональной модели сверхплотной СРД, которая реализует территориальное развертывание семи базовых станций gNB_j , $j = 1, \dots, 7$, каждая с тремя секторами s_j ; внутри каждого сектора распределяются K устройств UE_k , в точках ОК $\hat{\mathbf{x}}_k$ из набора $k_e \in \mathbb{K}_e$. Число пользовательских устройств K в каждом секторе не может быть больше числа элементов AP N^2 . В результате получается набор $L_{(j,i,k_e)}$. В ИМ реализовано равномерное распределение UE_k на площади каждого сектора s_j .

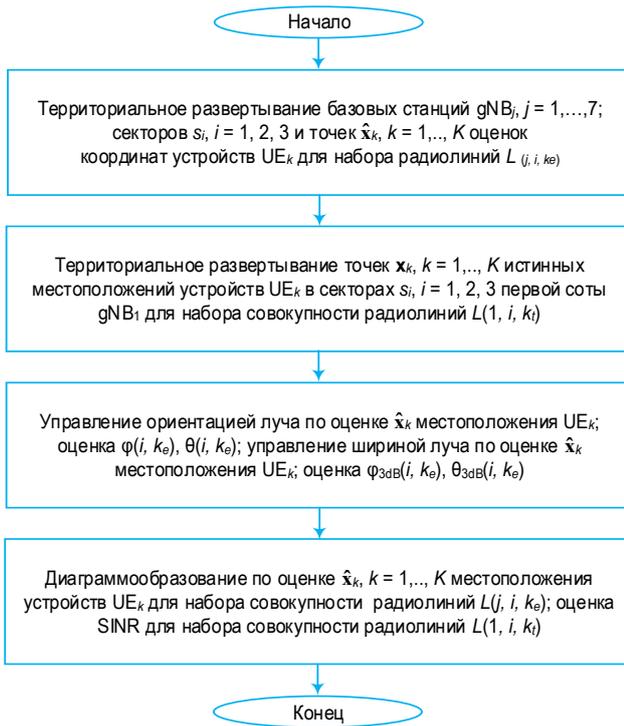


Рис. 7. Процедуры модели диаграммообразования LAB
Fig. 7. Location-Aware Beamforming Model Procedures

Далее в ИМ инициализируется сценарий территориального развертывания пользовательских устройств UE_k , в точках истинных местоположений x_k из набора $k_t \in \mathbb{K}_t$ в трех секторах центральной соты первой базовой станции gNB_1 (см. рисунок 1). Каждая точка x_k находится в круге неопределенности местоположения с центром в точке \hat{x}_k и радиусом $\sigma/2$ (см. рисунок 3). В результате получается набор $L_{(1,i,k_t)}$. Направленные радиолинии окружающих сот базовых станций $gNB_j, j = 2, \dots, 7$ служат для моделирования помех от соседних сот.

После инициализации территориального плана модули управления лучом реализуют процедуры вычисления ориентации и ширины лучей по точкам ОК \hat{x}_k из набора $k_e \in \mathbb{K}_e$. В результате получается совокупность $L_{(j,i,k_e)}$ направленных радиолиний, каждая из которых характеризуется кортежем из четырех углов $\varphi_{(i,k)}, \theta_{(i,k)}, \varphi_{3dB(i,k)}, \theta_{3dB(i,k)}$.

После настройки ориентации и ширины луча в модели выполняется формирование направленных радиолиний и оценки бюджета направленных радиолиний для полезного сигнала SOI и помех SNOI.

В заключении имитационная модель реализует вычисление отношения сигнал/(шум + помеха) $SINR_{(1,i,k_e,k_t)}$ по формуле (14) для точек x_k истинных местоположений пользовательских устройств UE_k из набора $k_t \in \mathbb{K}_t$ при ориентации трафиковых лучей на точки \hat{x}_k ОК UE_k из набора $k_e \in \mathbb{K}_e$. Также в трех секторах центральной соты gNB_1 рассчитывается набор значений $SINR_{(1,i,k_e,k_e)}$ для точек \hat{x}_k оценок координат пользовательских устройств UE_k из

набора $k_e \in \mathbb{K}_e$ при ориентации лучей на точки \hat{x}_k из набора $k_e \in \mathbb{K}_e$. Дополнительно может быть выполнена оценка нормированной ПС $T_{(i,k_e,k_t)}$ по (15).

Формализуем далее параметры сценария имитационной модели совокупности радиолиний с диаграммообразованием LAB.

2.5. Сценарий имитационного моделирования совокупности радиолиний с LAB

Таблица 2 содержит параметры сценария ИМ совокупности радиолиний с LAB.

ТАБЛИЦА 2. Параметры сценария ИМ
TABLE 2. Simulation Model Scenario Parameters

Символ	Описание	Значение
-	территориальный план gNB	гексагональная сетка
J	число базовых станций gNB	7
I	число секторов на каждой gNB	3 (с ориентацией по азимуту 120°)
K	максимальное число одновременно работающих устройств в каждом секторе	64
R	максимальный размер соты	100 м
N^2	число элементов AP в каждом секторе	32×32
$ I $	общее число секторов	$J \cdot I = 21$
$ \mathbb{K}_e $	максимальное число радиолиний SNOI из набора $k_e \in \mathbb{K}_e$	$J \cdot I \cdot K = 1344$
$ \mathbb{K}_t $	максимальное число радиолиний SOI из набора $k_t \in \mathbb{K}_t$	$1 \cdot I \cdot K = 192$
-	распределение точек \hat{x}_k ОК UE_k в каждом секторе	случайное равномерное расположение на площади каждого сектора s_i
-	распределение точек x_k истинных местоположений UE_k в каждом секторе	случайное расположение в окружности с центром \hat{x}_k и диаметром σ в прямоугольной системе координат
P_s^{TX}	максимальная мощность передачи AP каждого сектора	40 дБм
P_s^{\max}	максимальная мощность передачи на один элемент AP	P_s^{TX}/N^2 ; равномерное распределение мощности между элементами AP
G^{\max}	максимальный КУ	15 дБи [29]
A_{\min}^{AZ}	максимальный коэффициент подавления задних лепестков	25 дБ [18]
A_{\min}^{EL}	максимальный коэффициент подавления боковых лепестков	20 дБ [18]
B_s	ширина полосы частот сектора	80 МГц
f_s	несущая частота сектора	30 ГГц
h_{gNB}	высота подъема AP	15 м
h_{UE}	высота подъема точки \hat{x}_k	1,5 м
$L_{(i,k_t)}^{PL}$	потери РРВ в пространстве в радиолинии (i, k_t)	3GPP Umi-Street Canyon LOS [31]

Символ	Описание	Значение
G_S^{TX}	КУ одного элемента АР передатчика	3 дБи [16]
G_S^{BF}	максимальный КУ АР при диаграммообразовании	$10 \log_{10}(N^2)$ [16]
P_N	мощность шума	согласно ITU-R M.2412-0 [21] с коэффициентом шума 5 дБ и шириной полосы B_S
φ_{3dBmin}	минимальная ширина луча в горизонтальной плоскости (по азимуту)	3°
θ_{3dBmin}	минимальная ширина луча в вертикальной плоскости (по углу места)	3°
$\sigma/2$	неопределенность местоположения	{1 ... 10} м согласно PSL в 3GPP TS 22.261 [25]

Рисунок 8 иллюстрирует сценарий территориального распределения базовых станций gNB_j, j = 1, ..., 7, секторов s_i, точек \hat{x}_k оценок координат

UE_k в каждом секторе s_i каждой базовой станции gNB_j (синие точки) и распределение точек x_k истинных местоположений UE_k в каждом секторе центральной соты первой базовой станции gNB₁ (красные точки).

Территориальное распределение набора из семи J = 7 базовых станций gNB на плоскости выполняется по модели гексагональной решетки [5, 6]; особенностью правильного шестиугольника является равенство его стороны R и радиуса описанной окружности. Дальность радиопокрытия каждой gNB моделируется параметром стороны правильного шестиугольника R = 100 м; такая дальность соответствует сценарию сверхплотной СРД 5G в городе [21]. Каждая базовая станция gNB образована тремя I = 3 неперекрывающимися в горизонтальной плоскости секторами. Общее число секторов в модели СРД 5G равно |Π| = J · I = 21. Каждый сектор s_i оборудован АР из N² = 64 излучающих элементов.

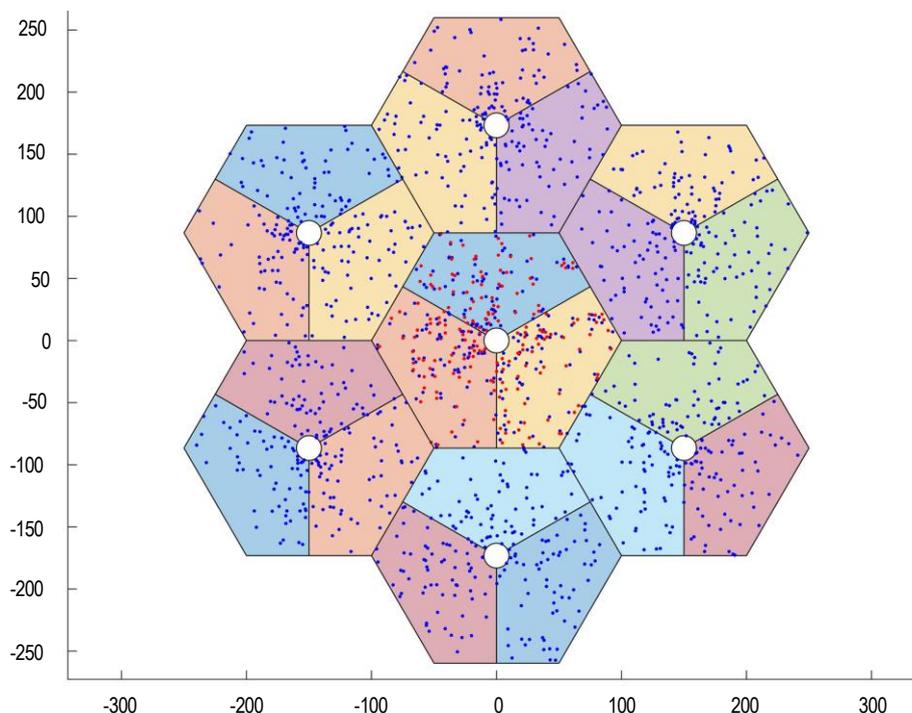


Рис. 8. Сценарий территориального распределения модели совокупности радиолиний

Fig. 8. Terrestrial Scenario of the Model of a Set of Radio Links

Для моделирования территориального распределения одновременно работающих в каждом секторе пользовательских устройств UE_k делается допущение о том, что каждый сектор s_i одновременно может обслужить максимальное их число K, которое ограничено сверху величиной N². Будем далее полагать, что общее число направленных радиолиний SNOI по всем секторам модели сети равно |K_e| = J · I · K = 1344. Набор радиолиний формируется в каждом секторе s_i случайным образом в полярных координатах с центром в точке центра сектора s_i.

Оценка SINR выполняется в центральной соте базовой станции gNB₁, где истинные местоположения x_k пользовательских устройств UE_k формируются случайным образом в окружности с центром \hat{x}_k и диаметром σ в прямоугольной системе координат. Таким образом, отношение сигнал/(шум + помехи) оценивается для |K_t| = 192 радиолиний SOI по фактическим местоположениям UE_k.

Рассмотрим параметры сценария ИМ (см. таблицу 2), определяющие оценку SINR. В каждом секторе моделируется передача на несущей частоте f_s = 30 ГГц с шириной полосы частот B_s = 80 МГц.

Общая максимальная мощность передатчика $P_s^{TX} = 40$ Вт, подводимая к АР, равномерно распределяется между всеми ее N^2 излучающими элементами, поэтому мощность, приходящая на один элемент, определяется как $P_s^{\max} = P_s^{TX}/N^2$.

В качестве модели РРВ используется специфицированный в 3GPP TR 38.901 [31] сценарий Umi-Street Canyon LOS/NLOS с наличием LOS. Согласно данному сценарию, высота подвеса АР равна $h_{gNB} = 15$ м с креплением, например, на столбе, а высота UE $h_{UE} = 1,5$ м.

При настройке ориентации и ширины луча в имитационной модели используется численное ограничение на ширину диаграммы направленности антенной решетки в горизонтальной φ_{3dBmin} и вертикальной θ_{3dBmin} плоскостях.

Технологические ограничения определяются методом диаграммообразования и конструктивным исполнением АР [29]. В настоящей имитационной модели принимаем минимальную ширину луча:

$$\varphi_{3dBmin} = \theta_{3dBmin} = 3^\circ.$$

3. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ СОВОКУПНОСТИ РАДИОЛИНИЙ С LAB

Программная реализация имитационной модели доступна по ссылке [32] и включает следующие отдельные программные модули.

3.1. Инициализация параметров имитационной модели

Скрипт 2 содержит команды инициализации параметров имитационной модели; все параметры (см. таблицу 2) записываются в структуру udn.

Скрипт 2. Инициализация параметров имитационной модели

```

udn.cell_num=7; % число сот
udn.sector_num=3; % число секторов
udn.UE_num=64; % число устройств на сектор соты
udn.rcell=100; % радиус соты, м
udn.accuracy=10; % диаметр зоны местоположения UE, м
udn.radius=10; % зона ограничения вокруг соты
udn.UE_h = 1.5; % высота антенны UE, м
udn.gNB_h = 15; % высота антенны gNB, м
udn.eff_h=udn.gNB_h-udn.UE_h; % эффективная высота, м
udn.txPowerDBm = 40; % мощность передачи, дБм
udn.txPower=(10.^((udn.txPowerDBm-30)/10)); % дБм→Вт
udn.Am = 25; % коэфф. подавления задних лепестков, дБ
udn.SLAv=20; % предельный уровень бок. лепестков, дБ
udn.GdB = 15; % коэфф. усиления АР малой соты, дБи
udn.G = 10^(udn.GdB/10); % КУ АР малой соты, раз
udn.Gtx=3; % коэффициент усиления элемента АР, дБи
udn.fc=30; % несущая частота, ГГц
udn.angle_min=3; % минимальное значение hpbw, градусы
udn.bw = 80e6; % ширина полосы 80 МГц
udn.rxNoiseFigure = 5; % коэфф. шума приемника UE, дБ
udn.rxNoisePowerdB = ... % мощность шума, дБ, Вт
-174 + 10*log10(udn.bw) + udn.rxNoiseFigure - 30;
udn.rxNoisePower = 10^(udn.rxNoisePowerdB/10);
udn.nrow = 32; % число элементов в строке АР
udn.ncol = 32; % число элементов в столбце АР
% мощность передачи одного элемента АР, Вт
udn.txPowerSE = udn.txPower/(udn.nrow*udn.ncol);
udn.Gbf=10*log10(udn.nrow*udn.ncol); % макс. КУ, дБ

```

3.2. Территориальное распределение базовых станций и секторов

Скрипт 3 содержит функцию lab_grid, реализующую гексагональный сценарий территориального распределения 7-ми сот, обслуживаемых трехсекторными базовыми станциями. Таблица 3 содержит формат и описание входных/выходных параметров функции lab_grid.

Скрипт 3. Территориальное распределение базовых станций и секторов

```

function [gNB, gNB_cell, gNB_sector]=lab_grid(r)
radius = 1; % область, недоступная для UE, м
% формирование гексагональной сетки с центральной
% сотой gNB в точке (0,0); центры соседних 6 сот
% определяются относительно центральной соты
gNB=[0 0]; % расположение центральной базовой станции
for theta=30:60:330
x= r*sqrt(3)*cosd(theta);
y= r*sqrt(3)*sind(theta);
gNB = [gNB; x y];
end
% границы всех сот базовых станций
for i=1:length(gNB)
xc = gNB(i,1);
yc = gNB(i,2);
xn = [(r+xc) (r/2+xc) (-r/2+xc) ...
(-r+xc) (-r/2+xc) (r/2+xc) (r+xc)];
yn = [yc (r*sqrt(3)/2+yc) (r*sqrt(3)/2+yc) ...
yc (-r*sqrt(3)/2+yc) (-r*sqrt(3)/2+yc) yc];
gNB_cell{i}=polyshape(xn,yn);
end
% границы секторов всех сот базовых станций
for i=1:length(gNB)
xc = gNB(i,1);
yc = gNB(i,2);
% сектор 1
x1 = [xc+3*r/4 xc+r/2 xc-r/2 xc-3*r/4 xc];
y1 = [yc+r*sqrt(3)/4 yc+r*sqrt(3)/2 ...
yc+r*sqrt(3)/2 yc+r*sqrt(3)/4 yc];
% сектор 2
x2 = [xc-3*r/4 xc-r xc-r/2 xc xc];
y2 = [yc+r*sqrt(3)/4 yc-yc-r*sqrt(3)/2 ...
yc-r*sqrt(3)/2 yc];
% сектор 3
x3 = [xc xc+r/2 xc+r xc+3*r/4 xc];
y3 = [yc-r*sqrt(3)/2 yc-r*sqrt(3)/2 ...
yc yc+r*sqrt(3)/4 yc];
% область, недоступная для UE, исключается
th = 0:pi/50:2*pi;
xunit = radius * cos(th) + xc;
yunit = radius * sin(th) + yc;
poly0 = polyshape(xunit(1:end-1),yunit(1:end-1));
% формирование полных секторов
poly1 = polyshape(x1,y1);
poly2 = polyshape(x2,y2);
poly3 = polyshape(x3,y3);
% используемая область секторов
gNB_sector{i,1} = subtract(poly1, poly0);
gNB_sector{i,2} = subtract(poly2, poly0);
gNB_sector{i,3} = subtract(poly3, poly0);
end
end

```

Сначала инициализируются координаты $x_{gNB_1} = (x_{gNB_1}, y_{gNB_1}) = (0,0)$ базовой станции gNB_1 , обслуживающей центральную соту. Координаты $x_{gNB_j} = (x_{gNB_j}, y_{gNB_j})$ остальных базовых станций $gNB_j, j = 2, \dots, 7$ формируются относительно gNB_1 .

Затем в цикле по числу базовых станций модели сети формируются границы сот в форме правильных шестиугольников. Форматом представления границ сот является массив `gNB_cell` ячеек размерности 1×7 , каждая из которых содержит описание многоугольника в виде объекта `polyshape` среды Matlab [33]. Функция `polyshape` формирует многоугольник, задаваемый вершинами на плоскости, и возвращает объект `polyshape`, который характеризуется вершинами, сплошными областями и отверстиями. Также в цикле по числу базовых станций формируются границы секторов в формате объектов `polyshape`.

ТАБЛИЦА 3. Параметры функции `lab_grid`
TABLE 3. Function `lab_grid` Parameters

Параметр	Формат	Описание
Входные параметры		
<code>r</code>	скаляр	радиус соты
Выходные параметры		
<code>gNB</code>	матрица 7×2	матрица координат базовых станций на плоскости
<code>gNB_cell</code>	массив ячеек 1×7	массив ячеек границ сот в формате координат вершин правильного шестиугольника на плоскости
<code>gNB_sector</code>	массив ячеек 7×3	массив ячеек границ секторов в формате координат вершин многоугольника сектора на плоскости

В имитационной модели делается допущение о том, что в области `poly0` непосредственной близости от расположения базовой станции, определяемой параметром `radius`, нахождение пользовательских устройств UE исключено, поэтому границы секторов `gNB_sector` формируются из границ полных секторов `poly1`, `poly2` и `poly3`, за исключением областей `poly0` с использованием функции `subtract` среды Matlab [34] (см. скрипт 3).

3.3. Территориальное распределение пользовательских устройств

Скрипт 4 содержит функцию `lab_deploy`, реализующую территориальное распределение UE внутри сот и секторов сформированной ранее модели сверхплотной сети. Таблица 4 содержит формат и описание выходных параметров функции `lab_deploy`.

ТАБЛИЦА 4. Выходные параметры функции `lab_deploy`
TABLE 4. Function `lab_deploy` Output Parameters

Параметр	Формат	Описание
<code>UE_est</code>	массив ячеек 7×3	массив ячеек ОК пользовательских устройств по набору сот и секторов
<code>UE_true</code>	массив ячеек 1×3	массив ячеек координат истинных местоположений UE в наборе секторов первой соты

```

Скрипт 4. Территориальное распределение UE
function [UE_est, UE_true]= ...
    lab_deploy(udn, gNB, gNB_sector)
UE_est{udn.cell_num,udn.sector_num}=[];
UE_true{1,udn.sector_num}=[];
for j=1:udn.cell_num % цикл по числу сот
    for i=1:udn.sector_num % цикл по числу секторов
        for k=1:udn.UE_num % цикл по числу устройств
            if i==1 % сектор 1
                theta=30:0.1:150;
            elseif i==2 % сектор 2
                theta=150:0.1:270;
            elseif i==3 % сектор 3
                theta=-90:0.1:30;
            end
            % для радиолиний UE_est во всех сотах
            c1=0;
            while c1<1
                key1 = randi([1, length(theta)]);
                % выбор r1 между 0-90 + udn.radius
                r1=(udn.rcell-udn.radius) ...
                    *rand(1,1)+udn.radius;
                theta1=theta(key1);
                % преобразование в прямоугольную СК
                x1=gNB(j,1)+r1*cosd(theta1);
                y1=gNB(j,2)+r1*sind(theta1);
                xy1=[x1,y1];
                % проверка нахождения в секторе
                if isinterior(gNB_sector{j,i},xy1)==1
                    c1=1;
                    UE_est1 = xy1;
                end
            end % while c1<1
            UE_est{j,i}=[UE_est{j,i}; UE_est1];
            if j==1 % для радиолиний gNB UE_link_true
                c2=0;
                while c2<1
                    % для равномерного распределения
                    ru2 = (udn.accuracy/2) ...
                        *sqrt(rand(1,1));
                    theta2 = 2*pi*rand(1,1);
                    x2=UE_est1(1)+ru2*cos(theta2);
                    y2=UE_est1(2)+ru2*sin(theta2);
                    xy2=[x2,y2];
                    if isinterior(...
                        gNB_sector{1,i},xy2)==1
                        c2=1;
                        UE_true2 = xy2;
                    end
                end % while c2<1
                UE_true{j,i}=[UE_true{j,i};UE_true2];
            end % if j==1
        end % цикл по числу устройств
    end % цикл по числу секторов
end % цикл по числу сот
    
```

3.4. Настройка ориентации луча по местоположению устройства

Скрипт 5 содержит функцию `lab_link`, реализующую настройку ориентации луча по азимуту и углу места в направленных радиолиниях по ОК и истинному местоположению UE. Таблица 5 содержит формат и описание выходных параметров функции `lab_link`.

Скрипт 5. Настройка ориентации луча по местоположению устройства

```

function [az_est, el_est, az_tru, el_tru] = ...
    lab_link(udn, gNB, UE_est, UE_tru)
az_est{udn.cell_num,udn.sector_num}=[];
el_est{udn.cell_num,udn.sector_num}=[];
    
```

```

az_tru{1,udn.sector_num}=[];
el_tru{1,udn.sector_num}=[];
for j=1:udn.cell_num % цикл по числу сот
    for i=1:udn.sector_num % цикл по числу секторов
        for k=1:udn.UE_num % цикл по числу устройств
            UE_loc_est = UE_est{j,i}(k,:);
            gNB_loc=[gNB(j,1),gNB(j,2)];
            dist2D_loc_est=norm(UE_loc_est-gNB_loc);
            % для gNB UE_loc_est
            % угол ориентации по азимуту
            steer_loc_est = ...
                evalsteer(i,UE_loc_est,gNB_loc);
            % угол наклона
            tilt_loc_est = ...
                atan2d(udn.eff_h, dist2D_loc_est);
            % заполнение массивов ориентаций луча
            az_est{j,i}=[az_est{j,i}; steer_loc_est];
            el_est{j,i}=[el_est{j,i}; tilt_loc_est];
            if j==1 % для gNB UE_loc_tru
                UE_loc_tru = UE_tru{j,i}(k,:);
                dist2D_loc_tru = ...
                    norm(UE_loc_tru-gNB_loc);
                % угол ориентации по азимуту
                steer_loc_true = ...
                    evalsteer(i,UE_loc_tru,gNB_loc);
                % угол наклона
                tilt_loc_true = ...
                    atan2d(udn.eff_h, dist2D_loc_tru);
                % заполнение массивов ориентаций луча
                az_tru{j,i} = ...
                    [az_tru{j,i}; steer_loc_true];
                el_tru{j,i} = ...
                    [el_tru{j,i}; tilt_loc_true];
            end % if j==1
        end % цикл по числу устройств
    end % цикл по числу секторов
end % цикл по числу сот
end
    
```

ТАБЛИЦА 5. Выходные параметры функции lab_link

TABLE 5. Function lab_link Output Parameters

Параметр	Формат	Описание
az_est	массив ячеек 7×3	массив ячеек ориентации направленных радиолоний по азимуту для ОК пользовательских устройств по набору сот и секторов
el_est	массив ячеек 7×3	массив ячеек ориентации направленных радиолоний по углу места для ОК пользовательских устройств по набору сот и секторов
az_tru	массив ячеек 1×3	массив ячеек ориентации направленных радиолоний по азимуту для координат истинных местоположений UE в наборе секторов первой соты
el_tru	массив ячеек 1×3	массив ячеек ориентации направленных радиолоний по углу места для координат истинных местоположений UE в наборе секторов первой соты

3.5. Настройка ширины луча по местоположению устройства

Скрипт 6 содержит функцию lab_hrbw, реализующую управление шириной луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях для направленных радиолоний по ОК пользовательских устройств. Таблица 6 содержит формат и описание выходных параметров функции lab_hrbw.

Скрипт 6. Настройка ширины луча по местоположению устройства

```

function [az_3dB, el_3dB] = ...
    lab_hrbw(udn, gNB_loc, UE_est)
% формирование массивов ширины луча
% по азимуту и углу места в радиолониях UE_est
az_3dB{udn.cell_num,udn.sector_num}=[];
el_3dB{udn.cell_num,udn.sector_num}=[];
for j=1:udn.cell_num % цикл по числу сот
    for i=1:udn.sector_num % цикл по числу секторов
        for k=1:udn.UE_num % цикл по числу устройств
            gNB_locj=[gNB_loc(j,1), gNB_loc(j,2)];
            UE_loc_est = [UE_est{j,i}(k,1), ...
                UE_est{j,i}(k,2)];
            dist2D_est=norm(UE_loc_est-gNB_locj);
            rc=udn.accuracy/2; % радиус окружности
            % вычисление az3dB в зоне местоположения
            % точки пересечения двух окружностей
            [xout,yout] = circirc(gNB_locj(1,1), ...
                gNB_locj(1,2), dist2D_est, ...
                UE_loc_est(1), UE_loc_est(2),rc);
            p1=[xout(1,1),yout(1,1)];
            p2=[xout(1,2),yout(1,2)];
            % расстояние точки-центр
            dp1=norm(gNB_locj-p1);
            dp2=norm(gNB_locj-p2);
            dpp=norm(p1-p2);
            % эффективное расстояние от центра
            dp1_eff=sqrt((dp1^2)+(udn.eff_h^2));
            dp2_eff=sqrt((dp2^2)+(udn.eff_h^2));
            az3dB=acosd(((dp1_eff^2)+(dp2_eff^2)- ...
                (dpp^2))/(2*dp1_eff*dp2_eff));
            if az3dB < udn.angle_min
                az3dB = udn.angle_min;
            end
            % вычисление el3dB в зоне местоположения
            theta = 0 : 0.01 : 2*pi;
            xc = UE_loc_est(1) + rc*cos(theta);
            yc = UE_loc_est(2) + rc*sin(theta);
            % самая ближняя/дальняя точка от gNB
            near=dist2D_est;
            far=near;
            for n=1:length(xc)
                point=[xc(1,n) yc(1,n)];
                tmp=norm(gNB_locj-point);
                if tmp<near
                    near=tmp;
                    nearestp=point;
                end
                if tmp>far
                    far=tmp;
                    farthestp=point;
                end
            end
            dpp=norm(farthestp-nearestp);
            near_eff=sqrt((near^2)+(udn.eff_h^2));
            far_eff=sqrt((far^2)+(udn.eff_h^2));
            el3dB = acosd(((near_eff^2)+ ...
                (far_eff^2)-(dpp^2))/(2*near_eff*far_eff));
            if el3dB < udn.angle_min
                el3dB = udn.angle_min;
            end
            az_3dB{j,i}=[az_3dB{j,i};az3dB];
            el_3dB{j,i}=[el_3dB{j,i};el3dB];
        end % цикл по числу устройств
    end % цикл по числу секторов
end % цикл по числу сот
end
    
```

ТАБЛИЦА 6. Выходные параметры функции lab_hpbw

TABLE 6. Function lab_hpbw Output Parameters

Параметр	Формат	Описание
az_3dB	массив ячеек 7×3	массив ячеек значений ширины луча направленных радиолиний в горизонтальной плоскости для ОК пользовательских устройств по набору сот и секторов
e1_3dB	массив ячеек 7×3	массив ячеек значений ширины луча направленных радиолиний в вертикальной плоскости для ОК пользовательских устройств по набору сот и секторов

3.6. Оценка SINR по совокупности направленных радиолиний

Программная реализация процедур функции lab_sinr, реализующей оценку отношения SINR по совокупности радиолиний SOI и SNOI для направленных радиолиний по ОК и истинным местоположениям UE, доступна по ссылке [32]. Таблица 7 содержит формат и описание выходных параметров из ячеек размера 1×3 функции lab_sinr.

Функция lab_sinr содержит программные модули, реализующие оценку SINR по формуле (14) и включает расчет мощности: 1) сигнала SOI в радиолиниях секторов первой соты; 2) помех SNOI от радиолиний внутри своего сектора; 3) помех SNOI от радиолиний других секторов внутри своей соты; 4) помех SNOI от радиолиний других сот сети.

ТАБЛИЦА 7. Выходные параметры функции lab_sinr

TABLE 7. Function lab_sinr Output Parameters

Параметр	Массив значений SINR для направленных радиолиний
SINR_S_est	по ОК пользовательских устройств в наборе секторов первой соты, учитывающих помехи только в своем секторе
SINR_S_tru	по истинным местоположениям UE в наборе секторов первой соты, учитывающих помехи только в своем секторе
SINR_SC_est	по ОК пользовательских устройств в наборе секторов первой соты, учитывающих помехи в своем секторе и в двух соседних секторах данной соты
SINR_SC_tru	по истинным местоположениям UE в наборе секторов первой соты, учитывающих помехи в своем секторе и в двух соседних секторах данной соты
SINR_SCN_est	по ОК пользовательских устройств в наборе секторов первой соты, учитывающих помехи в своем секторе, в 2-х соседних секторах данной соты и 18-ти секторах окружающих шести сот
SINR_SCN_tru	по истинным местоположениям UE в наборе секторов первой соты, учитывающих помехи в своем секторе, в 2-х соседних секторах данной соты и 18-ти секторах окружающих шести сот

3.7. Функции оценки бюджета направленных радиолиний

3.7.1. Оценка диаграммы направленности AP

Скрипт 7 содержит программную реализацию процедуры оценки ДНА в горизонтальной и вертикальной плоскостях по формулам (10) и (11).

Скрипт 7. Оценка диаграммы направленности AP

```
function ARP = ...
    evalbarp(steer_True, steer_Est, az3dB, Am, ...
            tilt_True, tilt_Est, e13dB, SLAV)
% ДНА в горизонтальной плоскости
A_H = 12*((steer_True-steer_Est)/az3dB).^2);
A_H=-(min(A_H,Am));
% ДНА в вертикальной плоскости
A_V=12*((tilt_True-tilt_Est)/e13dB).^2);
A_V=-(min(A_V,SLAV));
ARP = A_H + A_V; % совокупная ДНА
ARP(ARP<-Am) = - Am; % дБ
end
```

3.7.2. Оценка коэффициента усиления AP

Скрипт 8 содержит программную реализацию процедуры оценки КУ AP по формулам (7) и (8).

Скрипт 8. Оценка коэффициента усиления AP

```
function GAIN = ...
    evalgain(steer_True, steer_Est, az3dB, ...
            tilt_True, tilt_Est, e13dB, Gbf)
GAIN = 10*log10(sinc(((...
% КУ в горизонтальной плоскости
steer_True - steer_Est)/(1.13*az3dB)).^2))...
+ 10*log10(sinc(((...
% КУ в вертикальной плоскости
tilt_True - tilt_Est)/(1.13*e13dB)).^2))...
+ Gbf);
GAIN = real(GAIN);
end
```

3.7.3. Оценка потерь при PPB

Скрипт 9 содержит программную реализацию процедуры оценки потерь при PPB по формуле (12).

Скрипт 9. Оценка потерь при PPB

```
function PL = evalfrisp(gNB_loc, UE_loc, eff_h, fc)
dist2D=norm(gNB_loc-UE_loc); % 2D
dist3D=sqrt((eff_h)^2+(dist2D)^2); % 3D
% потери PPB в радиолинии gNB_loc-UE_loc в LOS, дБ
PL = 32.4 + 21*log10(dist3D) + 20*log10(fc);
end
```

Далее представлены результаты моделирования совокупности радиолиний с диаграммообразованием LAB по набору сценариев.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОВОКУПНОСТИ РАДИОЛИНИЙ С LAB

В настоящем разделе представлены результаты оценки SINR в модели совокупности радиолиний с диаграммообразованием LAB в зависимости от: 1) точности позиционирования σ ; 2) радиуса соты R ; 3) числа устройств в секторе K .

Оценка SINR выполняется для набора радиолиний: 1) $L_{(1,i,k_t)}$ по точкам истинных местоположений \mathbf{x}_k (сценарий UEtru) из набора $k_t \in \mathbb{K}_t$; 2) $L_{(j,i,k_e)}$

по точкам ОК \hat{x}_k (сценарий UE_{est}) из набора $k_e \in \mathbb{K}_e$. Результирующее значение SINR усредняется по набору радиолиний трех секторов центральной соты gNB₁. Оценка усредненного SINR приводится для трех сценариев с учетом помех: 1) сценарий S; 2) сценарий S + C; 3) сценарий S + C + N. Таблица 2 содержит остальные параметры сценария модели.

4.1. Оценка помех в зависимости от точности позиционирования

Рисунок 9а иллюстрирует зависимость SINR от точности позиционирования σ для числа пользователей $K = 64$ и радиуса соты $R = 100$ м.

Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы: 1) с уменьшением погрешности позиционирования σ с 10 до 1 м отношение SINR увеличивается примерно на 25 дБ; 2) для набора радиолиний $L_{(1,i,k_e)}$ по точкам истинных местоположений x_k (сценарий UE_{tru}) отношение SINR ожидаемо всегда ниже отношения SINR для набора радиолиний по точкам ОК \hat{x}_k (сценарий UE_{est}), так как ориентация луча в ИМ осуществляется по точкам \hat{x}_k ; 3) наибольшее отношение SINR ожидаемо наблюдается для сценария S; наименьшее отношение SINR ожидаемо наблюдается для сценария S + C + N; разница между этими двумя сценариями составляет порядка 5 дБ; 4) разница в отношении SINR для трех сценариев S, S + C и S + C + N не зависит от погрешности σ ; 5) повышение точности на 1 м увеличивает SINR на ~2-3 дБ.

Рисунок 9б иллюстрирует зависимость НРВW в горизонтальной φ_{3dB} и вертикальной θ_{3dB} плоскостях от точности позиционирования σ . Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы: 1) с уменьшением погрешности позиционирования σ с 10 до 1 м ширина луча в горизонтальной плоскости φ_{3dB} уменьшается с 14 ° до 3 °, а ширина луча в вертикальной плоскости θ_{3dB} уменьшается с 6 ° до 3 °; 2) требуемая ширина луча в вертикальной плоскости θ_{3dB} оказывается ниже требуемой ширины луча в горизонтальной плоскости φ_{3dB} .

4.2. Оценка помех в зависимости от размера соты

Рисунок 9с иллюстрирует зависимость SINR от размера соты R при точности позиционирования $\sigma = 3$ м для числа пользователей $K = 64$.

Анализ графиков при прочих равных условиях позволяет сделать следующие выводы: 1) с увеличением размера соты R от 20 до 300 м отношение SINR увеличивается примерно на 30 дБ для сценария S и сценария S + C; 2) для сценария S + C + N отношение SINR с увеличением размера соты сначала увеличивается, а при достижении некоторого порогового размера $R > 150$ м начинает уменьшаться.

Это можно объяснить тем, что адаптация ориентации и ширины луча в имитационной модели осуществляется по местоположению устройства внутри соты, размер которой варьируется.

Ранее уже отмечалось, что чем меньше σ , тем уже в горизонтальной и вертикальной плоскостях будет луч; и наоборот, чем больше σ , тем шире будет луч. Неопределенность местоположения в данном сценарии фиксирована и равна $\sigma = 3$ м, поэтому влияние на уровень помех должна оказывать удаленность пользовательского устройства.

Также ранее говорилось о том, что чем ближе UE_k располагается к обслуживаемому сектору s_i , тем шире получится луч; и наоборот, чем дальше UE_k располагается от s_i , например, на границе обслуживаемого сектора, тем уже получится луч. При увеличении размера соты R и фиксированном ограничении на минимальную ширину луча в горизонтальной φ_{3dBmin} и вертикальной θ_{3dBmin} плоскостях может наступить пороговая ситуация, когда адаптированный по местоположению UE_k луч окажется недостаточно узким для заданного удаления UE_k от s_i . Данную гипотезу косвенно подтверждает характер зависимости ширины луча НРВW от размера соты R .

Рисунок 9д иллюстрирует зависимость ширины луча НРВW от размера соты R при точности позиционирования $\sigma = 3$ м. Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы: 1) требуемая ширина луча в вертикальной плоскости θ_{3dB} оказывается ниже требуемой ширины луча в горизонтальной плоскости φ_{3dB} ; 2) с увеличением размера соты R с 20 до 300 м ширина луча в горизонтальной плоскости φ_{3dB} уменьшается с 8 ° до 3,5 °, а ширина луча в вертикальной плоскости θ_{3dB} уменьшается с 6 ° до 3 °; 3) при увеличении размера соты R с 20 до 100 м ширина луча в горизонтальной φ_{3dB} и вертикальной θ_{3dB} плоскостях уменьшается достаточно быстро; после значения $R = 100$ м скорость убывания НРВW заметно уменьшается; 4) установившаяся фиксированная ширина луча в вертикальной плоскости θ_{3dB} после некоторого порогового размера соты $R > 150$ м позволяет сформулировать гипотезу о том, что если бы ограничение на НРВW было бы меньше, то тенденция уменьшения θ_{3dB} могла бы сохраниться, а уровень SINR в сценарии S + C + N повторял бы характер аналогичной зависимости в сценариях S и S + C.

Подтверждением сформулированной гипотезы являются графики на рисунках 9е, 9ф, построенные при уменьшении ограничения на допустимую ширину луча НРВW в горизонтальной φ_{3dBmin} и вертикальной θ_{3dBmin} плоскостях с 3 ° до 1 °.

Анализ графиков на рисунке 9е позволяет сделать вывод о том, что с увеличением размера соты R от 20 до 300 м отношение SINR увеличивается примерно на 35 дБ для всех сценариев учета помех. Анализ графиков на рисунке 9ф показывает, что ширина луча в горизонтальной плоскости φ_{3dB} уменьшается с 8 ° до 2 °, а ширина луча в вертикальной плоскости θ_{3dB} уменьшается с 6 ° до 1 °.

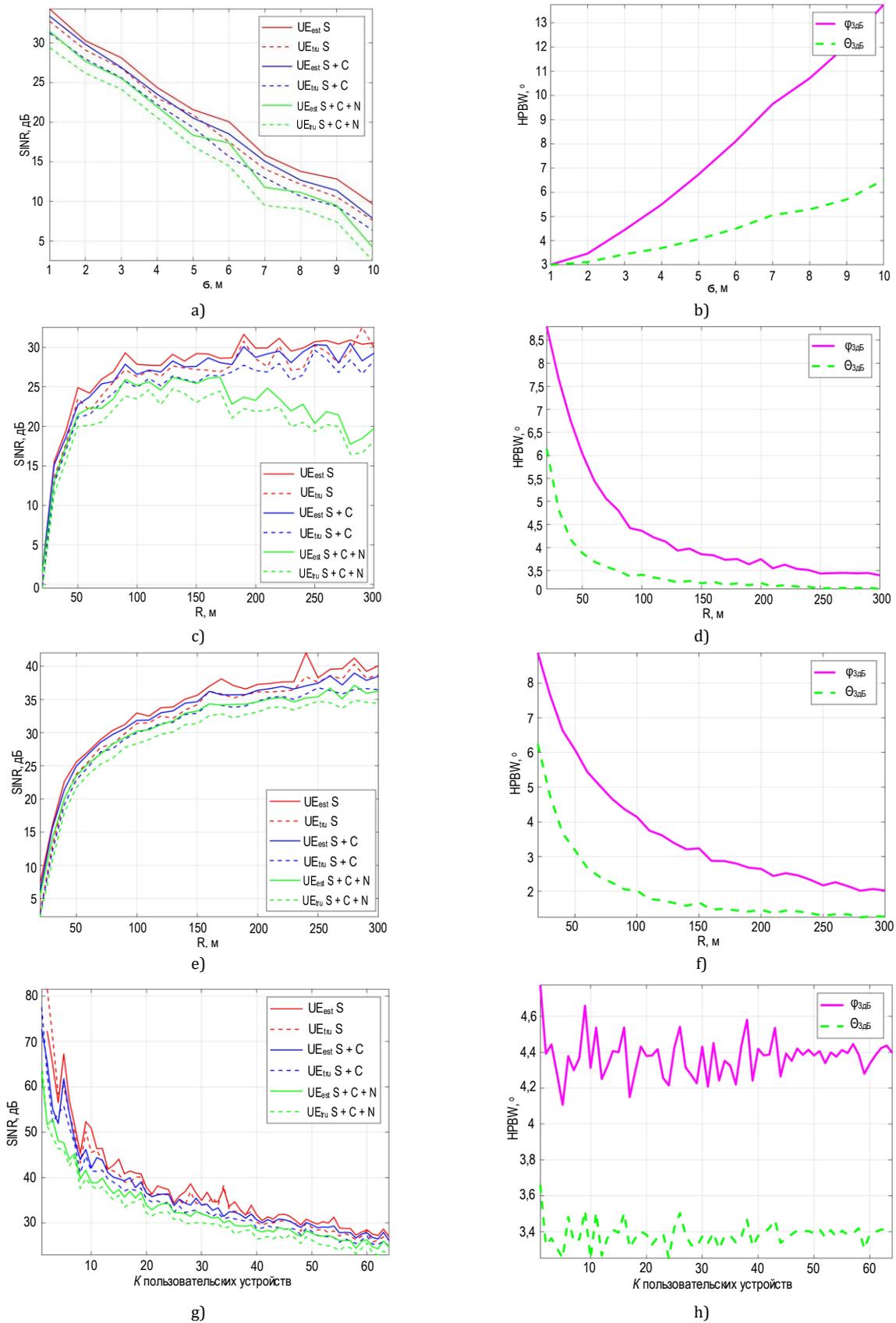


Рис. 9. Зависимость SINR (слева) и HPBW (справа) от точности позиционирования (a, b), размера соты (c, d), размера соты при HPBW_{min} = 1° (e, f) и числа устройств в секторе (g, h)

Fig. 9. SINR (a) and HPBW (b) Dependence on UE Location Accuracy (a, b), Cell Size (c, d), ell Size with HPBW_{min} = 1° (e, f), UE Number in Sector (g, h)

Сравнение графиков на рисунках 9с и 9е позволяет сделать вывод о том, что при увеличении R для сохранения характера зависимости SINR в сценарии $S + C + N$, аналогичного характеру зависимости SINR в сценариях S и $S + C$, допустимую ширину луча НРВW необходимо уменьшать с 3° до 1° . Сравнение графиков на рисунках 9д и 9ф позволяет сделать вывод о том, что с увеличением R разница между требуемой шириной луча в вертикальной $\theta_{3дВ}$ и горизонтальной $\varphi_{3дВ}$ плоскостях уменьшается с 3° при малом R до 1° при большом R .

Например, при $R = 20$ м на площади сектора $S = \sqrt{3}/2 R^2 \approx 346$ м² каждый из $K = 64$ UE занимает ~ 5 м², и для положительного SINR нужен луч в 1° .

4.3. Оценка помех в зависимости от числа устройств в секторе

Рисунок 9г иллюстрирует зависимость SINR от числа устройств в секторе K при размере соты $R = 100$ м и точности позиционирования $\sigma = 3$ м.

Анализ графиков (см. рисунки 9г, 9h) при прочих равных условиях позволяет сделать следующие выводы: 1) с увеличением числа пользовательских устройств K в секторе соты от 2 до 64 отношение SINR уменьшается для трех сценариев S , $S + C$ и $S + C + N$ примерно на 50 дБ; 2) разница в отношении SINR для сценариев S , $S + C$ и $S + C + N$ уменьшается с увеличением числа пользовательских устройств K в секторе соты.

Рисунок 9h иллюстрирует зависимость ширины луча НРВW в горизонтальной $\varphi_{3дВ}$ и вертикальной $\theta_{3дВ}$ плоскостях от числа устройств в секторе K при размере соты $R = 100$ м и точности позиционирования $\sigma = 3$ м. Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы: 1) требуемая ширина луча в горизонтальной $\varphi_{3дВ}$ и вертикальной $\theta_{3дВ}$ плоскостях не зависит от числа устройств в секторе K ; 2) требуемая ширина луча в вертикальной $\theta_{3дВ}$ плоскости ниже требуемой ширины луча в горизонтальной $\varphi_{3дВ}$ примерно на 1° .

5. ВЫВОДЫ

В настоящей работе представлено описание разработанной и доступной для верификации имитационной модели совокупности направленных радиолиний, работающих по принципу LAA.

Теоретическая значимость разработанной модели заключается в установлении влияния ориен-

тации и ширины луча базовой станции, а также погрешности определения местоположения пользовательского устройства на уровень пространственного уплотнения одновременных передач по критерию отношения сигнал/(шум + помеха).

Практическая значимость разработанной модели заключается в научном обосновании технических решений при построении и функционировании сверхплотных сетей радиодоступа диапазона миллиметровых волн с диаграммообразованием LAA пользовательских устройств.

Частными количественными результатами имитационного моделирования является установление зависимости отношения сигнал/(шум + помеха), а также требуемой ширины луча от точности позиционирования пользовательских устройств, размера соты и числа устройств в секторе.

С уменьшением погрешности позиционирования с 10 до 1 м отношение сигнал/(шум + помеха) увеличивается примерно на 25 дБ, а ширина луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях уменьшаются с 14° до 3° и с 6° до 3° , соответственно.

С увеличением размера соты от 20 до 300 м отношение SINR увеличивается примерно на 30 дБ при ограничении на ширину луча в 3° и примерно на 35 дБ при ограничении на ширину луча в 1° . В последнем случае ширина луча в горизонтальной плоскости $\varphi_{3дВ}$ уменьшается с 8° до 2° , а ширина луча в вертикальной плоскости $\theta_{3дВ}$ уменьшается с 6° до 1° . Исследование при двух ограничениях на ширину луча показало необходимость сужать луч при увеличении размера соты.

С увеличением числа пользовательских устройств в секторе соты от 2 до 64 отношение SINR уменьшается примерно на 50 дБ. При этом требуемая ширина луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях не зависит от числа пользовательских устройств в секторе соты.

Разработанная модель является *инструментом решения научной проблемы* диаграммообразования на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Установленная для совокупности направленных радиолиний взаимозависимость параметров размера соты, числа устройств и погрешности их позиционирования служит для научного обоснования допустимого по критерию SINR пространственного мультиплексирования.

Список источников

1. Фокин Г.А. Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Часть 1. Модель двух радиолиний // Труды учебных заведений связи. 2023. Т. 9. № 4. С. 44–63. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63
2. Фокин Г.А. Концепция диаграммообразования на основе позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2022. № 10. С. 1–7.
3. Фокин Г.А. Сценарии позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2020. № 3. С. 13–21.

4. Фокин Г.А. Моделирование сверхплотных сетей радиодоступа 5G с диаграммообразованием // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 5. С. 4–21. DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-5-4-21.
5. Фокин Г.А. Модели диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа 5G. Часть 1. Оценка помех // Первая миля. 2021. № 3(95). С. 66–73. DOI:10.22184/2070-8963.2021.95.3.66.73
6. Фокин Г.А. Модели диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа 5G. Часть 2. Оценка разноса устройств // Первая миля. 2021. № 4(96). С. 66–73. DOI:10.22184/2070-8963.2021.96.4.66.72
7. Фокин Г.А. Процедуры выравнивания лучей устройств 5G NR // Электросвязь. 2022. № 2. С. 26–31. DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.003
8. Фокин Г.А. Модели управления лучом в сетях 5G NR. Часть 1. Выравнивание лучей при установлении соединения // Первая миля. 2022. № 1(101). С. 42–49. DOI:10.22184/2070-8963.2022.101.1.42.49
9. Фокин Г. Модели управления лучом в сетях 5G NR. Часть 2. Выравнивание лучей при ведении радиосвязи // Первая миля. 2022. № 3(103). С. 62–69. DOI:10.22184/2070-8963.2022.103.3.62.68
10. Fazliu Z.L., Malandrino F., Chiasserini C.F., Nordio A. MmWave Beam Management in Urban Vehicular Networks // IEEE Systems Journal. 2021. Vol. 15. Iss. 2. PP. 2798–2809. DOI:10.1109/JSYST.2020.2996909
11. Andrews J.G., Zhang X., Durgin G.D., Gupta A.K. Are we approaching the fundamental limits of wireless network densification? // IEEE Communications Magazine. 2016. Vol. 54. Iss. 10. PP. 184–190. DOI:10.1109/MCOM.2016.7588290
12. Roh W., Seol J.-Y., Park J., Lee B., Lee J., Kim Y., et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. Iss. 2. PP. 106–113. DOI:10.1109/MCOM.2014.6736750
13. Chiaraviglio L., Turco S., Bianchi G., Blefari-Melazzi N. “Cellular Network Densification Increases Radio-Frequency Pollution”: True or False? // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2022. Vol. 21. Iss. 4. PP. 2608–2622. DOI:10.1109/TWC.2021.3114198
14. Chiaraviglio L., Rossetti S., Saida S., Bartoletti S., Blefari-Melazzi N. “Pencil Beamforming Increases Human Exposure to ElectroMagnetic Fields”: True or False? // IEEE Access. 2021. Vol. 9. PP. 25158–25171. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3057237
15. Thors B., Furuskär A., Colombi D., Törnevik C. Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO // IEEE Access. 2017. Vol. 5. PP. 19711–19719. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2753459
16. Awada A., Lobinger A., Enqvist A., Talukdar A., Viering I. A simplified deterministic channel model for user mobility investigations in 5G networks // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC, Paris, France, 21–25 May 2017). IEEE, 2017. DOI:10.1109/ICC.2017.7997079
17. Ali A., Karabulut U., Awada A., Viering I., Tirkkonen O., Barreto A.N., et al. System Model for Average Downlink SINR in 5G Multi-Beam Networks // Proceedings of the 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC, Istanbul, Turkey, 08–11 September 2019). IEEE, 2019. PP. 1–6. DOI:10.1109/PIMRC.2019.8904367
18. Yu B., Yang L., Ishii H. Load Balancing With 3-D Beamforming in Macro-Assisted Small Cell Architecture // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2016. Vol. 15. Iss. 8. PP. 5626–5636. DOI:10.1109/TWC.2016.2563430
19. Harada H., Prasad R. Simulation and Software Radio for Mobile Communications. Artech House, 2002. 448 p.
20. ITU-R M.2135-1 (12/2009) Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced.
21. ITU-R M.2412-0 (10/2017) Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020.
22. 3GPP TS 23.273 V18.2.0 (06/2023) 5G System (5GS) Location Services (LCS); Stage 2 (Release 18).
23. 3GPP TS 22.071 V17.0.0 (03/2022) Location Services (LCS); Service description; Stage 1 (Release 17).
24. 3GPP TS 23.032 V18.0.0 (06/2023) Universal Geographical Area Description (GAD) (Release 18).
25. 3GPP TS 22.261 V19.3.0 (06/2023) Service requirements for the 5G system; Stage 1 (Release 19).
26. Gross F. Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB. McGraw-Hill Professional, 2005. 288 p.
27. Balanis C.A. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons, 2016. 1104 p.
28. Mailloux R.J. Phased Array Antenna Handbook. Artech House, 2017. 691 p.
29. Hamdy M.N. Beamformers Explained. URL: www.commscope.com/globalassets/digizuite/542044-beamformer-explained-wp-114491-en.pdf (дата обращения 18.10.2023)
30. HBR 3.5 GHz 8x8 MIMO Panel Antenna. URL: <https://halberdbastion.com/products/antenna-catalogue/hbr-35-ghz-8x8-mimo-panel-antenna> (дата обращения 18.10.2023)
31. 3GPP TR 38.901 V17.0.0 (03/2022) Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 17).
32. Имитационная модель совокупности радиолиний с диаграммообразованием на основе позиционирования в сетях 5G // GitHub. URL: https://github.com/grihafokin/LAB_system_level_rus (дата обращения 18.10.2023)
33. polyshape. 2-D polygonal shapes // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyshape.html> (дата обращения 18.10.2023)
34. subtract. Difference of two polyshape objects // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyshape.subtract.html> (дата обращения 18.10.2023)

References

1. Fokin G. Location Aware Beamforming in Millimeter-Wave Band Ultra-Dense Radio Access Networks. Part 1. Model of Two Links. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):44–63. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63
2. Fokin G.A. Concept of Location-Aware Beamforming in 5G Networks. *Vestnik Ssviazy.* 2022;10:1–7.
3. Fokin G.A. Scenarios for Positioning in 5G Networks. *Vestnik Ssviazy.* 2020;3:13–21.
4. Fokin G.A. Simulation of ultra dense 5G radio access networks with beamforming. *T-Comm.* 2021;15(5):4–21. DOI:10.36724/2072-8735-2021-15-5-4-21

5. Fokin G.A. Beamforming models in ultra-dense 5G radio access networks. Part 1: Interference evaluation. *First mile*. 2021;3(95):66–73. DOI:10.22184/2070-8963.2021.95.3.66.73
6. Fokin G.A. Beamforming models in ultra-dense 5G radio access networks. Part 2: Device separation evaluation. *First mile*. 2021;4(96):66–73. DOI:10.22184/2070-8963.2021.96.4.66.72
7. Fokin G.A. Beam alignment procedures for 5G NR devices. *Elektrosvyaz*. 2022;2:26–31. DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.003
8. Fokin G.A. Beam management models in 5G NR networks. Part 1. Beam alignment during link establishment. *First mile*. 2022;1(101):42–49. DOI:10.22184/2070-8963.2022.101.1.42.49
9. Fokin G.A. Beam management models in 5G NR networks. Part 2. Beam alignment during radio communication. *First mile*. 2022;3(103):62–69. DOI:10.22184/2070-8963.2022.103.3.62.68
10. Fazliu Z.L., Malandrino F., Chiasserini C.F., Nordio A. MmWave Beam Management in Urban Vehicular Networks. *IEEE Systems Journal*. 2021;15(2):2798–2809. DOI:10.1109/JSYST.2020.2996909
11. Andrews J.G., Zhang X., Durgin G.D., Gupta A.K. Are we approaching the fundamental limits of wireless network densification? *IEEE Communications Magazine*. 2016;54(10):184–190. DOI:10.1109/MCOM.2016.7588290
12. Roh W., Seol J.-Y., Park J., Lee B., Lee J., Kim Y., et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: theoretical feasibility and prototype results. *IEEE Communications Magazine*. 2014;52(2):106–113. DOI:10.1109/MCOM.2014.6736750
13. Chiaraviglio L., Turco S., Bianchi G., Blefari-Melazzi N. “Cellular Network Densification Increases Radio-Frequency Pollution”: True or False? *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2022;21(4):2608–2622. DOI:10.1109/TWC.2021.3114198
14. Chiaraviglio L., Rossetti S., Saida S., Bartoletti S., Blefari-Melazzi N. “Pencil Beamforming Increases Human Exposure to ElectroMagnetic Fields”: True or False? *IEEE Access*. 2021;9:25158–25171. DOI:10.1109/ACCESS.2021.3057237
15. Thors B., Furuskär A., Colombi D., Törnevik C. Time-Averaged Realistic Maximum Power Levels for the Assessment of Radio Frequency Exposure for 5G Radio Base Stations Using Massive MIMO. *IEEE Access*. 2017;5:19711–19719. DOI:10.1109/ACCESS.2017.2753459
16. Awada A., Lobinger A., Enqvist A., Talukdar A., Viering I. A simplified deterministic channel model for user mobility investigations in 5G networks. *Proceedings of the International Conference on Communications, ICC, 21–25 May 2017, Paris, France*. IEEE; 2017. DOI:10.1109/ICC.2017.7997079
17. Ali A., Karabulut U., Awada A., Viering I., Tirkkonen O., Barreto A.N., et al. System Model for Average Downlink SINR in 5G Multi-Beam Networks. *Proceedings of the 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, 08–11 September 2019, Istanbul, Turkey*. IEEE; 2019. p.1–6. DOI:10.1109/PIMRC.2019.8904367
18. Yu B., Yang L., Ishii H. Load Balancing With 3-D Beamforming in Macro-Assisted Small Cell Architecture. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2016;15(8):5626–5636. DOI:10.1109/TWC.2016.2563430
19. Harada H., Prasad R. *Simulation and Software Radio for Mobile Communications*. Artech House, 2002. 448 p.
20. ITU-R M.2135-1 (12/2009) *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced*.
21. ITU-R M.2412-0 (10/2017) *Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020*.
22. 3GPP TS 23.273 V18.2.0 (06/2023) *5G System (5GS) Location Services (LCS); Stage 2 (Release 18)*.
23. 3GPP TS 22.071 V17.0.0 (03/2022) *Location Services (LCS); Service description; Stage 1 (Release 17)*.
24. 3GPP TS 23.032 V18.0.0 (06/2023) *Universal Geographical Area Description (GAD) (Release 18)*.
25. 3GPP TS 22.261 V19.3.0 (06/2023) *Service requirements for the 5G system; Stage 1 (Release 19)*.
26. Gross F. *Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB*. McGraw-Hill Professional; 2005. 288 p.
27. Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons; 2016. 1104 p.
28. Mailloux R.J. *Phased Array Antenna Handbook*. Artech House; 2017. 691 p.
29. Hamdy M.N. *Beamformers Explained*. URL: www.commscope.com/globalassets/digizuite/542044-beamformer-explained-wp-114491-en.pdf [Accessed 18.10.2023]
30. *HB Radiofrequency*. HBR 3.5 GHz 8x8 MIMO Panel Antenna. URL: <https://halberdbastion.com/products/antenna-catalogue/hbr-35-ghz-8x8-mimo-panel-antenna> [Accessed 18.10.2023]
31. 3GPP TR 38.901 V17.0.0 (03/2022) *Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 17)*.
32. *GitHub*. A simulation model of a population of radio lines with diagramming based on positioning in 5G networks. URL: https://github.com/grihafokin/LAB_system_level_rus [Accessed 18.10.2023]
33. *MathWorks*. polyshape. 2-D polygonal shapes. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyshape.html> [Accessed 18.10.2023]
34. *MathWorks*. subtract. Difference of two polyshape objects. URL: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyshape.subtract.html> [Accessed 18.10.2023]

Статья поступила в редакцию 14.10.2023; одобрена после рецензирования 29.10.2023; принята к публикации 02.11.2023.

The article was submitted 14.10.2023; approved after reviewing 29.10.2023; accepted for publication 02.11.2023.

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>