

Научная статья

УДК 621.396.677

DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63



Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона. Часть 1. Модель двух 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: Эволюция сетей радиодоступа (СРД) 1G–4G за последние 40 лет показала, что возможности диаграммообразования (ДО) добавляют дополнительное пространственное измерение в традиционные методы мультиплексирования устройств. При формировании базовыми станциями gNB (gNodeB) и пользовательскими устройствами UE (User Equipment) узких диаграмм направленности антенны (ДНА) помимо частотного, временного и кодового разделения каналов появляется дополнительное пространственное измерение, реализующее пространственное мультиплексирование. Данная концепция известна уже достаточно давно, однако полноценная реализации ее возможностей на практике ожидается с широким распространением сверхплотных СРД диапазона миллиметровых волн (ММВ) пятого (5G) и последующих (B5G) поколений. Для управления ДНА может использоваться подход предварительного анализа обучающих последовательностей о текущей обстановке в радиоканале CSI (Channel State Information), однако его накладные расходы становятся неприемлемо высокими в условиях сверхплотного распределения устройств. Альтернативным подходом является ДО на основе позиционирования. Обоснованность, актуальность и перспективность данного подхода определяется тем фактом, что для сетей 5G, в отличие от предыдущих поколений, впервые формализованы требования к точности позиционирования UE до одного метра. Первоначальные исследования в области ДО на основе позиционирования уже проводились на протяжении последних лет, однако преимущественно для частных сценариев одной или нескольких радиолиний между gNB и стационарными UE. В настоящей работе впервые формализована и программно реализована научно-обоснованная методология управления ДНА стационарной gNB на основе позиционирования подвижного UE для сценария двух радиолиний. Проблемой практической реализации ДО является сложно прогнозируемый уровень помех вследствие взаимного влияния радиолиний с подвижными UE. При оценке мгновенного отношения сигнал/помеха в сценарии двух радиолиний между двумя стационарными gNB, которые осуществляют ДО на основе текущего местоположения подвижных UE в процессе их перемещения, необходимо учитывать взаимное влияние радиолиний друга на друга. В таком сценарии передатчик в одной радиолинии выступает одновременно и как источник полезного сигнала для одного подвижного приемника, и как источник мешающего сигнала для другого подвижного приемника. Задача оценки помех для такого сценария усложняется нелинейностью ДНА передатчика и/или приемника. Разработанная и программно реализованная в настоящей работе модель использует функции пакета расширения Phased Array System Toolbox Matlab. Результаты моделирования показывают существенный разброс (десятки дБ) мгновенного отношения сигнал/помеха в зависимости от территориального разнеса устройств и могут быть использованы при обосновании сценариев построения и функционирования сверхплотных СРД 5G/B5G.

Ключевые слова: диаграммообразование, позиционирование, сверхплотная сеть радиодоступа, диапазон миллиметровых волн, радиолиния, Phased Array System Toolbox

Источник финансирования: работа подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда по гранту № 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 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

Location Aware Beamforming in Millimeter-Wave Band Ultra-Dense Radio Access Networks.

Part 1. Model of Two Links

 Grigoriy Fokin, fokin.ga@sut.ru

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

Abstract: *The evolution of 1G to 4G radio access networks (RANs) over the past 40 years has shown that beamforming (BF) capabilities add an additional spatial dimension to traditional device multiplexing methods. When base stations (gNodeB - gNB) and user equipment (UE) form narrow antenna radiation patterns (APPs), in addition to frequency, time and code division of channels, an additional spatial dimension appears that implements spatial multiplexing. This concept has been known for quite a long time, but the full implementation of its capabilities in practice is expected with the widespread adoption of millimeter wave (mmWave) ultra-dense networks (UDN) of the fifth (5G) and subsequent (B5G) generations. To control APP, the approach of preliminary analysis of training sequences about the current situation in the radio channel - CSI (Channel State Information) - can be used, but its overhead costs become unacceptably high in conditions of ultra-dense distribution of devices. An alternative approach is positioning-based BF. The validity, relevance and prospects of this approach are determined by the fact that for 5G networks, unlike previous generations, for the first time the requirements for UE positioning accuracy up to one meter are formalized. Initial research in the field of location-aware BF has already been carried out over the past years, however, mainly for particular scenarios of one or more radio links between gNBs and fixed UEs. In this work, for the first time, a scientifically based methodology for controlling the beam pattern of a stationary gNB based on the positioning of a mobile UE for a two-radio link scenario is formalized and implemented in software. The problem of practical implementation of BF is the difficulties to predict level of interference due to the mutual influence of radio links with mobile UEs. When estimating the instantaneous signal-to-interference ratio in a two-radio link scenario between two fixed gNBs that perform BF based on the current location of mobile UEs as they move, it is necessary to take into account the mutual influence of each other's radio links on each other. In such a scenario, a transmitter on one radio link acts both as a source of a wanted signal for one UE and as a source of an interfering signal for another UE. The task of assessing interference for such a scenario is complicated by the nonlinearity of the transmitter and/or receiver ARPs. The model developed and implemented in software in this work uses the functions of the Phased Array System Toolbox Matlab extension package. The simulation results show a significant scatter (tens of dB) of the instantaneous signal-to-interference ratio depending on the territorial separation of devices and can be used to justify scenarios for the construction and operation of 5G/B5G UDN.*

Keywords: *beamforming, positioning, ultra-dense radio access network, millimeter wave band, radio link, Phased Array System Toolbox*

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 1. Model of Two Links. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2023;9(4):44–63. DOI:10.31854/1813-324X-2023-9-4-44-63

1. Введение

1.1. Предпосылки развития диаграммообразования на основе позиционирования в сетях связи

Цифровые сети радиодоступа (СРД) 2G–3G дециметрового диапазона волн функционировали преимущественно со всенаправленными антеннами у пользовательских устройств (UE, аббр. от англ. User Equipment) и секторными антеннами у базовых станций. Методология построения сетей 2G GSM с частотно-временным разделением каналов

использует модель кластера, которая для поддержания требуемого уровня внутрисистемных помех устанавливает в первом приближении допустимый территориальный разнос приемопередающих устройств, использующих одинаковый частотно-временный ресурс. Методология функционирования сетей 3G UMTS с кодовым разделением каналов использует быстрое централизованное управление мощностью передатчиков для поддержания допустимого уровня внутрисистемных помех в своей и соседних сотах [1].

Использование пространственной обработки сигналов (ПОС) за счет многоэлементных антенных решеток (АР) на приемопередатчиках базовых станций получило распространение в сетях радиодоступа 4G LTE. Основными режимами работы при этом являлись разнесенная передача в канале «вниз» – DL (Downlink: gNB → UE) от базовой станции к UE, разнесенный прием в канале «вверх» UL – (Uplink: UE → gNB) от UE к базовой станции и ПОС в канале «вниз» в однопользовательском режиме – SU-MIMO (аббр. от англ. Single-User Multiple-Input and Multiple-Output). Реализовать АР с пространственной обработкой в портативных подвижных UE не позволял дециметровый диапазон волн. Для функционирования многопользовательской пространственной обработки – MU-MIMO (аббр. от англ. Multi-User MIMO) требуются системы massive MIMO с числом элементов АР, не менее числа устройств в данной соте; обычно под massive MIMO понимают систему с числом элементов от 64 и выше [1]. Системы massive MIMO могут работать как в режиме ПОС, так и в режиме диаграммообразования (ДО) – формирования узкого луча при работе на передачу и/или на прием. Возможность реализации таких систем в портативных подвижных UE становится возможной с переходом в диапазон миллиметровых волн (ММВ) в СРД пятого (5G) и последующих поколений B5G (Beyond 5G). Дополнительным стимулом к использованию режима ДО в каналах UL и DL является новая устройство-центрическая архитектура функционирования СРД, в том числе, непосредственная связь устройств друг с другом в режиме D2D (аббр. от англ. Device-to-Device) в сверхплотных сетях (UDN, аббр. от англ. Ultra Dense Network) [1].

Возможности ДО на передаче и приеме у стационарных базовых станций gNB и подвижных UE позволяют уплотнить приемопередатчики на уровне СРД и реализовать концепцию пространственного мультиплексирования (SDMA, аббр. от англ. Space-Division Multiple Access), а также компенсировать существенные потери при распространении радиоволн (РРВ) диапазона ММВ (аббр. от англ. mmWave – Millimeter-Wave) за счет более высоких коэффициентов усиления (КУ) диаграмм направленности антенн (ДНА) с узкими лучами. Однако вместе с новыми возможностями ДО устройств приводит и к новым вызовам при построении и функционировании сети радиодоступа, а также к новым проблемам управления образующими ее подвижными устройствами UE [2].

Если ранее задача управления мобильностью и радиоресурсами на уровне СРД, в том числе при поддержании допустимого уровня внутрисистемных помех, решалась частотно-территориальным планированием и централизованным управлением, то в сверхплотных СРД диапазона ММВ с устройство-центрической архитектурой ДО устройств в данной

соте и в соседних сотах является нетривиальной задачей и представляет собой актуальную научную проблему. Одним из инструментов ее решения является использование сетевого позиционирования, т. е. данных о местоположении устройств для реализации новых механизмов установления и ведения радиосвязи; в зарубежной литературе данный подход получил название LAC (аббр. от англ. Location-Aware Communication) [3]. Примером использования LAC в когнитивных СРД является совместное использование спектра первичными и вторичными источниками радиоизлучения за счет их предварительного позиционирования для исключения помех [4].

Таким образом, ДО на основе местоположения устройств, которое в зарубежных источниках называют LAB (аббр. от англ. Location Aware Beamforming), является актуальным направлением исследований для реализации пространственного уплотнения одновременных передач SDMA в сверхплотных СРД при переходе в диапазон ММВ с миниатюризацией устройств massive MIMO [5–7].

1.2. Проблема оценки помех в сверхплотных сетях радиодоступа с диаграммообразованием на основе позиционирования

Тенденция построения сверхплотных СРД заключается в существенном повышении плотности базовых станций gNB и UE по сравнению с сетями предыдущих поколений. Для UDN 5G/B5G поколений характерна плотность территориального распределения базовых станций gNB и подвижных UE – до одного устройства на 1 м². Следствием этого, с точки зрения организации радиосвязи, являются высокая вероятность наличия прямой видимости (LOS, аббр. от англ. Line of Sight) в радиолиниях gNB – UE и/или UE – UE на расстоянии от единиц до нескольких десятков метров, а также высокий уровень внутрисистемных помех из-за близкого расположения одновременно работающих приемопередающих устройств. Серьезной проблемой практической реализации UDN является поддержание допустимого уровня внутрисистемных помех. Компенсация внутрисистемных помех с пространственным уплотнением одновременных передач SDMA в сверхплотных СРД достигается адаптивным формированием ДНА для полезных и мешающих сигналов. Пространственная селекция сигналов при работе на передачу и прием выполняется следующим образом: для источников внутрисистемных помех (SNOI, аббр. от англ. Signal of No Interest) формируются нули ДНА в соответствующих направлениях, а для полезного сигнала (SOI, аббр. от англ. Signal of Interest) – ДНА с максимальным усилением. Условием ДО с провалами ДНА в направлениях SNOI и максимумами ДНА в направлении SOI служит предварительная осведомленность передающего и принимающего устройств, образующих радиолинию,

об относительных угловых расположениях друг друга. Определение направлений прихода AOA/DOA (аббр. от англ. Angle/Direction of Arrival) сигналов SOI/SNOI с последующим ДО на прием и передачу является составной частью ДО на основе местоположения LAB [8–16].

К преимуществам LAB по сравнению с ДО на основе традиционного подхода анализа данных о текущей обстановке в радиоканале (CSI, аббр. от англ. Channel State Information) относится возможность оперативно формировать луч на передачу и/или прием без необходимости предварительного анализа обучающих последовательностей, накладные расходы на обработку которых в условиях сверхплотного распределения как подвижных UE, так и стационарных базовых станций gNB становятся неприемлемо высокими. Дополнительной проблемой LAB на уровне СРД является сложность прогноза степени влияния внутрисистемных помех, обусловленных сверхплотным распределением устройств и их децентрализованным взаимодействием при переходе от сотово-центрической к устройство-центрической распределенной архитектуре. Предварительный анализ степени подавления помех за счет адаптивного ДО при случайном распределении устройств показывает, что сужение ширины ДНА по уровню половинной мощности в вертикальной и горизонтальной плоскостях приводит к существенному повышению радиопокрытия и подавлению помех [8–10].

Изложенные обстоятельства позволяют рассматривать ДО на основе позиционирования устройств, как актуальную научную проблему, значимость решения которой служит цели повышения эффективности построения и функционирования сверхплотной СРД диапазона ММВ 5G/B5G в условиях роста внутрисистемных помех вследствие повышения плотности одновременно работающих приемопередающих устройств до одного устройства на 1 м^2 без необходимости пропорционального увеличения частотно-временного ресурса.

1.3. Анализ состояния проблемы и постановка задачи исследования

Исследования в области ДО на основе позиционирования уже проводились на протяжении последних лет, однако преимущественно для сценария стационарных устройств [17–45]. Для подвижных устройств проблема оценки помех в радиолиниях с ДО осложняется зависимостью мгновенного отношения сигнал/помеха (SIR, Signal to Interference Ratio) от текущего пространственного разнеса устройств, а также нелинейностью ДНА [46–48].

Более десяти лет назад было опубликовано исследование под руководством T.S. Rappaport [17] по результатам измерений параметров радиоканала диапазона ММВ с использованием AP, работающих

в режиме ДО на передачу и прием, которые в целом подтвердили практическую реализуемость концепции LAB. В [18] авторы обосновали необходимость учета ДНА в горизонтальной и вертикальной плоскостях для пространственных сценариев UDN. Современное состояние, проблемы и перспективы использования систем massive MIMO в СРД систематизированы в [19]. В работе [20] впервые был введен термин так называемого трехмерного ДО (англ. 3D Beamforming) для сетей 5G; в частности, показан значительный эффект от управления лучом при его адаптации как по азимуту, так и по углу места. Один из первых программно-аппаратных прототипов гибридного ДО для сетей 5G с результатами экспериментальной апробации описан в [21]. В исследовании [22] помимо преимуществ многоантенных систем massive MIMO обозначены проблемы их практической реализации, в частности, накладные расходы, связанные с CSI. В работе [23] обозначены предпочтительные сценарии режимов работы многоантенных систем, включая SDMA и ДО. Целесообразность использования направлений прихода AOA/DOA и ухода AOD/DOD (аббр. от англ. Angle/Direction of Departure) в многоэлементных AP исследуется в [24]. Фундаментальный обзор по известным моделям и методам диаграммообразования в системах радиосвязи диапазона ММВ, включая ДО по местоположению, представлен в [25]. Модели радиоканала миллиметровых волн, включая широкий спектр сценариев LOS, предпочтительных для систем LAB, систематизированы под руководством T.S. Rappaport в [26]. Фундаментальный обзор моделей и методов пространственной обработки сигналов в MIMO системах диапазона ММВ, в том числе, на основе CSI, представлен в [27]. Перспективы практического использования систем massive MIMO, включая карманный радар, описаны в [28]. Проблемы управления лучом в сверхплотных СРД 5G/B5G сформулированы в [29, 30].

Одним из первых исследований по ДО на основе местоположения является [31], где погрешность местоположения устройства на плоскости связывается с шириной луча в горизонтальной плоскости. Анализируя состояние проблемы в области LAB особо стоит отметить цикл работ под руководством R.W. Heath [32–36], в которых вопросы управления лучом исследуются для сценариев движения устройств в отдельной радиолинии. Работы [37–43] связаны тем обстоятельством, что в них комплексно исследуется влияние плотности приемопередающих устройств на уровень внутрисистемных помех СРД, образованной совокупностью радиолиний из устройств, работающих в режиме ДО. Стоит отметить появление не только публикаций, но и зарубежных патентов в области ДО на основе местоположения [44, 45].

Проведенный анализ состояния проблемы в области LAB по открытым зарубежным источникам

показал, что для комплексной разработки методологии управления ДНА на основе позиционирования устройств диапазона ММВ сверхплотных СРД необходимо учитывать совокупность условий построения сетей и сценариев функционирования устройств 5G/B5G, в том числе: а) точность и скорость позиционирования устройств; б) конфигурацию AP стационарных и подвижных UE; в) точность и скорость ДО и/или определения направления прихода сигнала; г) географическую протяженность, подвижность и плотность подвижных и стационарных устройств.

Также проведенный анализ показал целесообразность разработки моделей LAB для сценариев: а) отдельной радиолинии; б) двух радиолиний; в) совокупности радиолиний одной соты; г) совокупности сот СРД.

Настоящее исследование посвящено формализации и программной реализации научно-обоснованной методологии управления ДНА на основе позиционирования подвижных устройств UE базовыми станциями gNB сверхплотных СРД 5G/B5G диапазона ММВ для сценария двух радиолиний.

Объектом исследования является сверхплотная СРД 5G/B5G.

Предметом исследования является комплекс моделей и методов управления ДНА на основе позиционирования устройств диапазона ММВ сверхплотной СРД 5G/B5G.

Методом исследования является имитационное моделирование в специальном программном обеспечении Matlab с функциями [49–58] пакета расширения Phased Array System Toolbox [59].

Целью исследования является разработка методологии управления ДНА на основе позиционирования устройств диапазона ММВ сверхплотных СРД 5G/B5G.

В настоящей работе впервые формализована и программно реализована научно-обоснованная методология управления ДНА стационарной базовой станции на основе позиционирования UE диапазона ММВ в составе сверхплотных СРД 5G/B5G для сценария двух радиолиний при условии движения устройств UE.

Материал исследования организован далее следующим образом. В разделе 2 выполнена формализация модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования. Раздел 3 содержит описание программной реализации модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования, которая доступна в [60]. Результаты оценки помех в модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования систематизированы в разделе 4. Выводы и направления дальнейших исследований сформулированы в разделе 5.

2. Формализация модели двух радиолиний с диаграммообразованием на основе позиционирования

2.1. Постановка задачи моделирования двух радиолиний с диаграммообразованием на основе позиционирования

Формализуем порядок работы имитационной модели для исследования показателей функционирования двух радиолиний с ДО на основе позиционирования. Рисунок 1 иллюстрирует сценарий оценки помех для двух радиолиний с ДО на основе позиционирования.

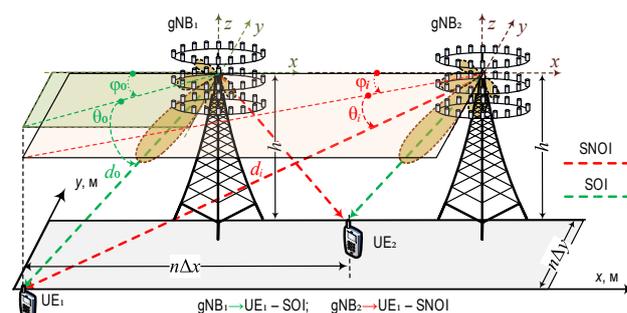


Рис. 1. Сценарий работы имитационной модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования

Fig. 1. Simulation Model Operation Scenario of Two Radio Links with Location-Aware Beamforming

Имитационная модель воспроизводит работу двух стационарных базовых станций gNB₁ и gNB₂ и двух подвижных пользовательских устройств UE₁ и UE₂. Базовые станции gNB работают на передачу в режиме адаптивного ДО на основе позиционирования UE с прямоугольной AP (URA, аббр. от англ. Uniform Rectangular Array); UE при этом работают на прием с ненаправленными антеннами. Первая радиолиния SOI организована между gNB₁ и UE₁, вторая – между gNB₂ и UE₂. При одновременной работе в одном диапазоне частот данные радиолинии создают друг другу взаимные помехи: первая радиолиния SNOI получается вследствие боковых лепестков gNB₁ в направлении UE₂, вторая – вследствие боковых лепестков gNB₂ в направлении UE₁. Необходимость исследования работы двух радиолиний с ДО на основе позиционирования обусловлена нелинейностью диаграммы направленности URA. Для оценки мгновенного отношения SIR при движении UE с учетом коэффициентов усиления AP на базовых станциях gNB необходимо учитывать взаимное мгновенное территориальное распределение передатчика gNB и приемника UE сигналов и помех в радиолиниях SOI и SNOI. Подробно концепция ДО на основе позиционирования в сверхплотных СРД диапазона ММВ изложена в [1, 2]. Далее формализуем сценарии оценки помех для двух радиолиний с ДО на основе позиционирования.

2.2. Сценарии оценки помех в модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования

Рисунок 2 иллюстрирует сценарии движения устройств при оценке помех для двух радиолиний с ДО на основе позиционирования. Территориальное распределение двух радиолиний SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ и $gNB_2 \rightarrow UE_2$ и двух радиолиний SNOI $gNB_1 \rightarrow UE_2$ и $gNB_2 \rightarrow UE_1$ задается расстоянием между базовыми станциями gNB , расстоянием между базовыми станциями gNB и UE , а также территориальным разнесом между UE .

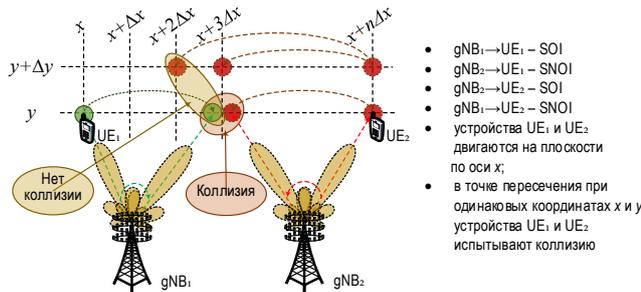


Рис. 2. Сценарии движения устройств в модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования

Fig. 2. Scenarios for Device Movement in the Model of Two Radio Links with Location-Aware Beamforming

Для исследования уровня внутрисистемных помех вследствие взаимного влияния радиолиний SOI и SNOI сценарии территориального распределения и движения задается сеткой точек вероятных местоположений UE на плоскости с территориальным разнесом Δx по оси x и территориальным разнесом Δy по оси y . UE могут двигаться по дороге/тротуару (по оси x) как в одном направлении с заданным территориальным разнесом Δx по оси x и территориальным разнесом Δy по оси y , так и в разных направлениях (навстречу друг другу) с заданным территориальным разнесом Δy по оси y . Исходя из направленности лучей ДНА базовых станций gNB в радиолиниях SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ и $gNB_2 \rightarrow UE_2$, а также влияния боковых лепестков лучей ДНА gNB в радиолиниях SNOI $gNB_1 \rightarrow UE_2$ и $gNB_2 \rightarrow UE_1$ можно сделать следующие качественные выводы. Во-первых, если устройства UE_1 и UE_2 оказываются в некоторой точке пересечения на плоскости без территориального разнеса Δx по оси x и без территориальным разнеса Δy по оси y , то в данной точке местоположения UE наблюдается так называемая коллизия, когда SIR резко снижается. В случае, если между устройствами UE_1 и UE_2 есть территориальный разнос Δx по оси x или территориальный разнос Δy по оси y , то явной коллизии по критерию SIR не наблюдается.

ДО базовых станций gNB в радиолиниях SOI осуществляется на основе текущего местоположения UE так, что максимум ДНА (AF , аббр. от англ. Array Factor) основного лепестка-луча gNB_1 ориентиро-

ван на UE_1 , а максимум AF gNB_2 – на UE_2 . Соответствующий местоположению UE коэффициент усиления ДНА базовой станции gNB в текущий момент времени k вычисляется из направляющего вектора согласно [47]:

$$AF(k) = \mathbf{w}^T \mathbf{v}(k), \tag{1}$$

где \mathbf{w} – вектор комплексных весовых коэффициентов AP ; $(\cdot)^T$ – оператор транспонирования; $\mathbf{v}(k) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ – направляющий вектор-столбец комплексных весовых коэффициентов; N – число элементов прямоугольной AP .

Выполним оценку помех на входе приемного UE_1 в радиолинии SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ при одновременной работе радиолинии SNOI $gNB_2 \rightarrow UE_1$ (см. рисунок 1). Мгновенное $SIR(k)$ в текущий момент времени k для модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования можно оценить по формуле:

$$SIR(k) = \frac{SOI(k)}{SNOI(k)} = \frac{|AF_0(k)|^2 P_0 / L_0(k)}{|AF_i(k)|^2 P_i / L_i(k)}, \tag{2}$$

где P_0 – мощность полезного сигнала от передатчика обслуживающей базовой станции gNB_1 в радиолинии SOI; P_i – мощность помехи от передатчика мешающей базовой станции gNB_2 в радиолинии SNOI; $L_0(k)$ – потери мощности полезного сигнала от передатчика обслуживающей базовой станции gNB_1 в радиолинии SOI при PPB в свободном пространстве на расстоянии $d_0(k)$ между gNB_1 и UE_1 в текущий момент времени k ; $L_i(k)$ – потери мощности помехи от передатчика мешающей базовой станции gNB_2 в радиолинии SNOI при PPB в свободном пространстве на расстоянии $d_i(k)$ между gNB_2 и UE_1 в текущий момент времени k ; $|AF_0(k)|^2$ – КУ полезного сигнала в радиолинии SOI, определяемый максимумом ДНА обслуживающей базовой станции gNB_1 в направлении $\{\varphi_0(k), \theta_0(k)\}$ на UE_1 в текущий момент времени k ; $|AF_i(k)|^2$ – КУ помехи в радиолинии SNOI, определяемый боковыми лепестками ДНА антенной решетки мешающей базовой станции gNB_2 в направлении $\{\varphi_i(k), \theta_i(k)\}$ на UE_1 в текущий момент времени k .

Рассмотрим далее в модели следующие сценарии оценки помех для двух радиолиний с ДО на основе позиционирования: а) два пользовательских устройства UE_1 и UE_2 движутся друг навстречу другу по оси x с постоянной скоростью без территориального разнеса Δy по оси y , UE_1 движется слева направо, а UE_2 движется справа налево, в таком случае коллизия наступает посередине траектории (см. рисунок 2); б) два пользовательских устройства UE_1 и UE_2 движутся друг навстречу другу по оси x с постоянной скоростью с заданным ненулевым территориальным разнесом Δy по оси y , UE_1 движется слева направо, а UE_2 движется справа налево, в таком случае явной коллизии не наступает; в) UE_1 стационарно, UE_2 движется

справа налево по оси x и снизу вверх по оси y (рисунок 3); г) UE₁ движется слева направо по оси x , UE₂ движется справа налево по оси x и снизу вверх по оси y (рисунок 4).

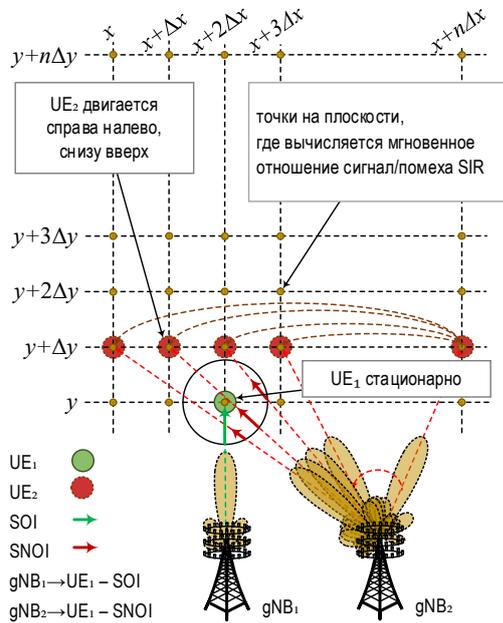


Рис. 3. Сценарий оценки помех для одной стационарной и одной подвижной радиосвязи с ДО на основе позиционирования

Fig. 3. Interference Assessment Scenario for One Fixed and One Mobile Radio Link with Location-Aware Beamforming

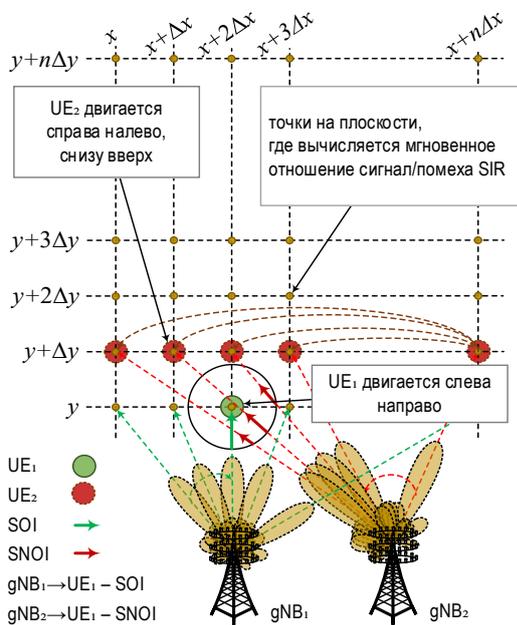


Рис. 4. Сценарий оценки помех для двух подвижных радиосвязей с ДО на основе позиционирования

Fig. 4. Interference Assessment Scenario for Two Mobile Radio Link with Location-Aware Beamforming

Текущий момент времени k в имитационной модели, которую представляют рисунки 1–4 соответствует набору вероятных местоположений UE, за-

даваемых n^2 точками на плоскости с шагом территориального разнеса $\Delta x = \Delta y$. Если в первых двух сценариях оценка SIR выполняется при движении UE₁ и UE₂ по оси x при фиксированном территориальном разнеса по оси y – то есть по набору точек траектории на линии, то в двух последних сценариях оценка SIR выполняется при варьировании территориального разнеса UE₁ и UE₂ как по оси x , так и по оси y – то есть по набору n точек и n траекторий на плоскости.

Данный подход позволяет воспроизвести в имитационной модели сценарий сверхплотного территориального распределения устройств, а также оценить допустимый территориальный разнос между ними по критерию мгновенного SIR в (2).

Отметим также, что в радиосвязи SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ в каждой точке вероятного местоположения UE₁ максимум ДНА обслуживающей базовой станции gNB_1 ориентирован на UE₁ в направлении $\{\varphi_0(k), \theta_0(k)\}$, где $\varphi_0(k)$ – азимут, а $\theta_0(k)$ – угол места между gNB_1 и UE₁ в текущий момент времени k . В то же время максимум ДНА базовой станции gNB_2 в каждой точке вероятного местоположения UE₂ ориентирован на UE₂, а в направлении $\{\varphi_i(k), \theta_i(k)\}$ на UE₁ помеховое влияние оказывают боковые лепестки ДНА gNB_2 , где $\varphi_i(k)$ – азимут, а $\theta_i(k)$ – угол места между gNB_2 и UE₁ в текущий момент времени k (см. рисунок 1).

Далее рассмотрим программную реализации имитационной модели двух радиосвязей с ДО на основе позиционирования.

3. Программная реализация модели двух радиосвязей с диаграммообразованием на основе позиционирования

3.1. Инициализация параметров модели

3.1.1. Инициализация параметров AP

Скрипт 1 содержит команды инициализации параметров URA на gNB . Моделирование радиосвязи выполняется на несущей частоте $f_c = 30$ ГГц (длина волны 10 мм) нижней границы диапазона ММВ. Выбор URA размерностью 8×8 из 64 элементов с шириной луча ДНА по уровню половинной мощности $\varphi_{3дБ} = \theta_{3дБ} = 12,8^\circ$ ранее был обоснован в [9, 10]. Рисунок 5 иллюстрирует параметры URA размером 8×8 , в частности: а) массив элементов AP; б) ДНА в 3D; в) ДНА в горизонтальной плоскости по углу азимута φ ; г) ДНА в вертикальной плоскости по углу места θ .

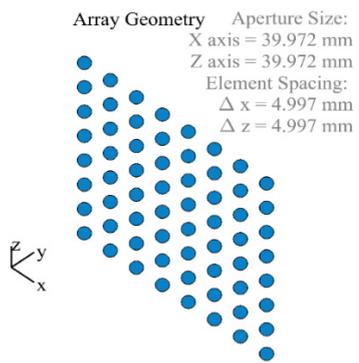
Формирование объекта URA осуществляется с использованием пакета расширения Phased Array System Toolbox (PAST) [59] специального программного обеспечения Matlab посредством встроенной функции-объекта `phased.URA` [49]. Данная функция формирует объект эквидистантной URA из набора 8×8 изотропных элементов (см. скрипт 1);

элементы находятся в узлах прямоугольной решетки в плоскости yz с расстоянием между друг другом в половину длины волны, а основное (boresight) направление излучения ориентировано вдоль положительного направления оси x (см. рисунок 5а). Таблица 1 содержит описание параметров объекта `phased.URA`.

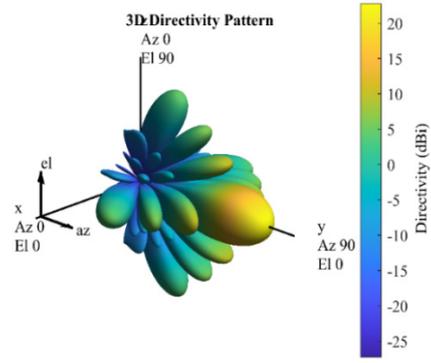
Скрипт 1. Инициализация параметров антенной решетки

```
fc = 30e9; % несущая частота, Гц
c = physconst('LightSpeed'); % скорость света, м/с
lambda = c/fc; % длина волны, м
drow = lambda/2; % расстояние между строками AP, м
dcol = lambda/2; % расстояние между столбцами AP, м
```

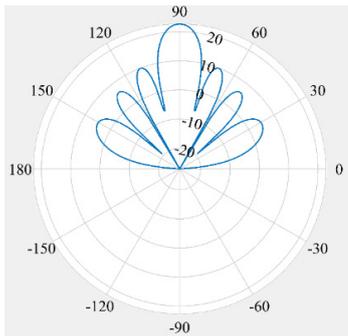
```
nrow = 8; % число строк в массиве AP, штук
ncol = 8; % число столбцов в массиве AP, штук
% формирование прямоугольной AP 8x8 URA1 на gNB1 и gNB2
URA1 = phased.URA(...
    'Size', [nrow ncol], ...
    'ElementSpacing', [drow dcol], ...
    'ArrayNormal', 'y');
URA1.Element.BackBaffled = true;
URA2 = phased.URA(...
    'Size', [nrow ncol], ...
    'ElementSpacing', [drow dcol], ...
    'ArrayNormal', 'y');
URA2.Element.BackBaffled = true;
% beamwidth(URA1,fc); % вычисление/построение ширины луча AP
% pattern(URA1,fc); % построение ДНА
% patternAzimuth(URA1,fc); % ДНА в горизонтальной плоскости
```



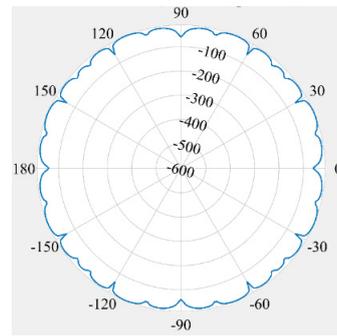
а) визуализация массива элементов AP



б) ДНА в 3D



в) ДНА в горизонтальной плоскости



г) ДНА в вертикальной плоскости

Рис. 5. Параметры прямоугольной AP 8x8

Fig. 5. URA 8x8 Parameters

ТАБЛИЦА 1. Параметры объекта `phased.URA`

TABLE 1. `phased.URA` Object Parameters

Параметр	Описание
Element	Модель элемента антенной решетки; по умолчанию используется модель изотропного излучателя
Size	Вектор размера 1x2, который задает размерность [nrow ncol] массива AP из числа строк nrow и числа столбцов ncol; индексация элементов прямоугольной AP осуществляется сначала по столбцам (сверху вниз) и затем по строкам – следующим столбцам (слева направо)
ElementSpacing	Вектор размера 1x2, который задает расстояния [drow dcol] между строками drow и столбцам dcol массива AP в метрах соответственно; если параметр ElementSpacing скаляр, то расстояние между строками равно расстоянию между столбцами
Lattice	Тип решетки может принимать значение 'Rectangular' и 'Triangular'; по умолчанию используется прямоугольный 'Rectangular' тип AP

Параметр	Описание
ArrayNormal	Направление нормали AP может принимать значения 'x', 'y', или 'z'. Элементы массива AP располагаются в плоскости, ортогональной выбранному направлению нормали AP. Основное (boresight) направление излучения элементов AP ориентировано вдоль нормали. По умолчанию принимает значение 'x'. При инициализации параметра ArrayNormal значением 'x', элементы массива AP лежат в плоскости 'yz'; основное (boresight) направление излучения ориентировано вдоль оси 'x'. При инициализации параметра ArrayNormal значением 'y', элементы массива AP лежат в плоскости 'xz'; основное (boresight) направление излучения ориентировано вдоль оси 'y'. При инициализации параметра ArrayNormal значением 'z', элементы массива AP лежат в плоскости 'xy'; основное (boresight) направление излучения ориентировано вдоль оси 'z'.
Taper	Матрица, вектор или скаляр комплексных весовых коэффициентов для применения к элементам AP

Для оценки и визуализации параметров AP могут использоваться следующие функции пакета PAST [59]. Функция `beamwidth` [50] служит для построения ширины луча ДНА по заданному уровню; например, ширина луча ДНА рассматриваемой URA по уровню половинной мощности минус 3 дБ в горизонтальной и вертикальной плоскости одинакова и равна $\varphi_{3\text{дБ}} = \theta_{3\text{дБ}} = 12,8^\circ$. Функция `viewArray` [51] позволяет визуализировать геометрическое расположение элементов массива AP в пространстве (см. рисунок 5а). Функция `pattern` [52] используется для построения ДНА в пространстве (см. рисунок 5б). `patternAzimuth` [53] вызывается для построения ДНА в горизонтальной плоскости по азимуту (см. рисунок 5с). Функция `patternElevation` [54] позволяет построить ДНА в вертикальной плоскости по углу места (см. рисунок 5д).

Далее рассмотрим параметры территориального распределения устройств, образующих две радиолинии.

3.1.2. Инициализация параметров территориального распределения

Скрипт 2 содержит команды инициализации параметров территориального распределения базовых станций gNB_1 и gNB_2 и двух подвижных пользовательских устройств UE_1 и UE_2 . Для целей визуализации AP на объектах базовых станций располагается на объекте светофора `traffic_light_h`.

Скрипт 2. Инициализация параметров территориального распределения

```
%% инициализация параметров распределения gNB и UE
% коэффициенты 3D STL объекта светофора
traffic_light_h = [0; 0; 0];
% координаты URA, начальные азимуты и углы места
% координаты AP URA1 на gNB1
URA1_pos = [10; 0; 3] + traffic_light_h;
% координаты AP URA2 на gNB2
URA2_pos = [20; 0; 3] + traffic_light_h;
% инициализация траектории движения UE1, м
% шаг сетки местоположений UE1 и UE2 по оси x и y, м
dstep = 0.1;
% начальная точка траектории движения UE1 по оси x, м
dstart1 = 0;
% конечная точка траектории движения UE1 по оси x, м
dstop1 = 30;
% вектор точек траектории UE1 по оси x, м
UE1_x_vec = dstart1:dstep:dstop1;
% число точек траектории UE1 по оси x
UE1_x_vec_len=length(UE1_x_vec);
UE1_z = 1.5; % высота подвеса антенны UE1, м
UE1_y = 5; % координата y, по которой движется UE1, м
% инициализация траектории движения UE2, м
dstart2 = 30; % начальная точка траектории движения UE2, м
dstop2 = 0; % конечная точка траектории UE1 по оси x, м
% вектор точек траектории UE2 по оси x, м
UE2_x_vec=dstart2:-dstep:dstop2;
% число точек траектории UE2 по оси x
UE2_x_vec_len=length(UE2_x_vec);
UE2_z = 1.5; % высота подвеса антенны UE2, м
% UE2_y_vec=UE1_y; % сценарий без разноса по оси y
% координата y, по которой начинает двигаться UE2, м
UE2_y = 0;
% вектор точек траектории UE2 по оси y, м
UE2_y_vec=UE2_y:dstep:UE2_y+10.0;
% число точек траектории движения по оси y
UE2_y_vec_len=length(UE2_y_vec);
```

Пространственные координаты $[x; y; z]$ AP gNB_1 и gNB_2 фиксированы и содержатся в векторах столбцах `URA1_pos` и `URA2_pos`, соответственно; высоты подвеса AP одинаковы и равны $h = 3$ м (см. рисунок 1). Текущие координаты $[x; y; z]$ ненаправленных антенн UE_1 и UE_2 варьируются и содержатся в векторах столбцах `UE1_pos = [UE1_x; UE1_y; UE1_z]` и `UE2_pos = [UE2_x; UE2_y; UE2_z]`. Координаты z – высоты подвеса устройств `UE1_z = UE2_z` фиксированы и равны $h = 1,5$ м. Координата y устройства UE_1 фиксирована и равна `UE1_y = 5`. Координата y устройства UE_2 может варьироваться и задается вектором `UE2_y_vec` с шагом `dstep`. Координаты x устройств UE_1 и UE_2 варьируются и задаются векторами `UE1_x_vec` и `UE2_x_vec`, соответственно, с тем же шагом. При имитационном моделировании взаимного влияния двух радиолиний оценка помех выполняется в двойном цикле по набору точек на плоскости xy с шагом `dstep` по осям x и y .

3.1.3. Инициализация объектов диаграммообразования антенной решетки

Скрипт 3 содержит команды инициализации объектов ДО для антенных решеток URA1 и URA2, размещенных на базовых станциях gNB_1 и gNB_2 , соответственно.

Скрипт 3. Инициализация объектов диаграммообразования антенной решетки

```
% формирование объекта направляющего вектора
% для управления лучом AP
steervec_URA1 = ...
phased.SteeringVector('SensorArray', URA1); % для URA1
steervec_URA2 = ...
phased.SteeringVector('SensorArray', URA2); % для URA2
% формирование объекта вычисления КУ AP
% при ДО в зависимости от весов направляющего вектора
gain_URA1 = phased.ArrayGain('SensorArray', URA1,...
'WeightsInputPort', true);
gain_URA2 = phased.ArrayGain('SensorArray', URA2,...
'WeightsInputPort', true);
```

Для реализации ДО в радиолинии на основе текущего местоположения UE на базовой станции формируется функция-объект `steervec_URA1` направляющего вектора для управления лучом антенной решетки URA1 и функция-объект `steervec_URA2` направляющего вектора для управления лучом антенной решетки URA2. Формирование объекта направляющего вектора осуществляется с использованием пакета расширения PAST [59] посредством функции-объекта `phased.SteeringVector` [55]; таблица 2 содержит описание параметров. Данная функция формирует вектор комплексных весовых коэффициентов для управления ДНА.

Для вычисления усиления полезного сигнала в радиолинии SOI и помехи в радиолинии SNOI на базовой станции формируется объект `gain_URA1` оценки КУ антенной решетки URA1 и объект `gain_URA2` оценки КУ антенной решетки URA2. Формирование объекта оценки КУ осуществляется с

использованием пакета расширения PAST [59] посредством объекта phased.ArrayGain [56], который вычисляет КУ в дБи для инициализированной AP в заданном угловом направлении. Таблица 3 содержит описание параметров phased.ArrayGain.

ТАБЛИЦА 2. Параметры объекта phased.SteeringVector

TABLE 2. phased.SteeringVector Object Parameters

Параметр	Описание
SensorArray	Объект AP пакета расширения Phased Array System Toolbox, например, объект линейной эквидистантной AP phased.ULA (по умолчанию) или объект прямоугольной эквидистантной AP phased.URA
PropagationSpeed	Скорость распространения сигнала, по умолчанию равна скорости света physconst('LightSpeed')
IncludeElementResponse	Опция учета отклика индивидуальных элементов в направляющем векторе комплексных весовых коэффициентов AP; может принимать значение false или true; в режиме false (по умолчанию) направляющий вектор вычисляется, исходя из того, что все элементы AP являются изотропными излучателями
NumPhaseShifterBits	Число бит квантования для фазовращателя; при инициализации данного параметра 0 (по умолчанию) квантование для фазовращателя не выполняется
EnablePolarization	Опция учета поляризации; может принимать значение false или true; в режиме false (по умолчанию) поляризация не учитывается

ТАБЛИЦА 3. Параметры объекта phased.ArrayGain

TABLE 3. phased.ArrayGain Object Parameters

Параметр	Описание
SensorArray	Объект AP пакета расширения Phased Array System Toolbox, например, объект линейной эквидистантной AP phased.ULA (по умолчанию) или объект прямоугольной эквидистантной AP phased.URA
PropagationSpeed	Скорость распространения сигнала, по умолчанию равна скорости света physconst('LightSpeed')
WeightsInputPort	Опция учета вектора комплексных весовых коэффициентов для оценки КУ; может принимать значение false или true; в режиме false (по умолчанию) КУ вычисляется по заданному направлению [азимут; угол места] в пространстве; в режиме true КУ вычисляется по паре направляющих векторов комплексных весовых коэффициентов, сформированных в направлении [азимут; угол места]

Опишем далее основные вычислительные процедуры имитационной модели для исследования взаимного влияния двух радиолоний.

3.2. Вычислительные процедуры имитационной модели

Скрипт 4 содержит вычислительные процедуры основного цикла имитационной модели двух радиолоний с ДО на основе позиционирования, которая реализует вычисление мгновенного SIR в формализованных ранее сценариях оценки помех.

Скрипт 4. Вычислительные процедуры имитационной модели двух радиолоний

```

% вектор SIR для UE1
URA1UE1_SIR_vec = zeros(1,UE2_x_vec_len);
% вектор SIR для UE2
URA2UE2_SIR_vec = zeros(1,UE2_x_vec_len);
% матрица SIR UE1
URA1UE1_SIR_mtx = zeros(UE2_y_vec_len, UE2_x_vec_len);
% матрица SIR UE2
URA2UE2_SIR_mtx = zeros(UE2_y_vec_len, UE2_x_vec_len);
for UE2_y_idx=1:UE2_y_vec_len % цикл по координате y
    for d=1:UE2_x_vec_len % цикл по координате x
        if UE1_x_vec_len==1
            UE1_x = UE1_x_vec;
        else
            UE1_x = UE1_x_vec(d);
        end
        UE2_x = UE2_x_vec(d);
        UE2_y = UE2_y_idx;
        % текущие координаты UE
        UE1_pos = [UE1_x; UE1_y; UE1_z];
        UE2_pos = [UE2_x; UE2_y; UE2_z];
        % оценка расстояния для вычисления
        % потерь и углов между URA и UE
        [URA1 UE1_range, URA1 UE1_angle] = ...
            rangeangle(URA1_pos,UE1_pos);
        [URA2 UE2_range, URA2 UE2_angle] = ...
            rangeangle(URA2_pos,UE2_pos);
        [URA1 UE2_range, URA1 UE2_angle] = ...
            rangeangle(URA1_pos,UE2_pos);
        [URA2 UE1_range, URA2 UE1_angle] = ...
            rangeangle(URA2_pos,UE1_pos);
        % азимуты и углы места от URA
        % до UE для направляющего вектора
        URA1 UE1_az=URA1 UE1_angle(1)+180;
        URA1 UE1_el=-URA1 UE1_angle(2);
        URA2 UE2_az=URA2 UE2_angle(1)+180;
        URA2 UE2_el=-URA2 UE2_angle(2);
        URA1 UE2_az=URA1 UE2_angle(1)+180;
        URA1 UE2_el=-URA1 UE2_angle(2);
        URA2 UE1_az=URA2 UE1_angle(1)+180;
        URA2 UE1_el=-URA2 UE1_angle(2);
        % вычисление направляющих векторов
        % SOI для AP gNB1 и gNB2
        sv_URA1= steervc_URA1(fc,...
            [URA1 UE1_az;URA1 UE1_el]); % gNB1-UE1
        sv_URA2= steervc_URA2(fc,...
            [URA2 UE2_az;URA2 UE2_el]); % gNB2-UE2
        % вычисление КУ для оценки отношения SIR
        % gNB1-UE1 SOI
        gain_URA1 UE1 = gain_URA1(fc,...
            [URA1 UE1_az; URA1 UE1_el],sv_URA1);
        % gNB2-UE2 SOI
        gain_URA2 UE2 = gain_URA2(fc,...
            [URA2 UE2_az; URA2 UE2_el], sv_URA2);
        % gNB1-UE2 SNOI
        gain_URA1 UE2 = gain_URA1(fc,...
            [URA1 UE2_az; URA1 UE2_el], sv_URA1);
        % gNB2-UE1 SNOI
        gain_URA2 UE1 = gain_URA2(fc,...
            [URA2 UE1_az; URA2 UE1_el], sv_URA2);
        % заполнение вектора SIR для UE1
        URA1UE1_SIR_vec(d)=(gain_URA1 UE1 -
            fspl(URA1 UE1_range, lambda)) ...
            - (gain_URA2 UE1 -
            fspl(URA2 UE1_range, lambda));
        % заполнение вектора SIR для UE2
        URA2UE2_SIR_vec(d)=(gain_URA2 UE2 -
            fspl(URA2 UE2_range, lambda))...
            - (gain_URA1 UE2 -
            fspl(URA1 UE2_range, lambda));
    end % for d=1:dist_vec_len
% матрица SIR для UE1 и UE2
URA1UE1_SIR_mtx(UE2_y_idx, :) = URA1UE1_SIR_vec;
URA2UE2_SIR_mtx(UE2_y_idx, :) = URA2UE2_SIR_vec;
end % for UE2_y_idx=1:UE2_y_vec_len
    
```

Основной цикл имитационной модели реализует перебор вероятных местоположений UE₁ и UE₂ на плоскости по координате x и координате y согласно заданному ранее сценарию территориального распределения. Внутри цикла анализ производится для заданных координат URA1_pos и URA2_pos базовых станций gNB₁ и gNB₂ и текущего (мгновенного) местоположения UE1_pos и UE2_pos пользовательских устройств UE₁ и UE₂.

Вначале производится вычисление расстояний d₀, азимутов φ₀ и углов места θ₀ для двух радиолиний SOI gNB₁ → UE₁ и gNB₂ → UE₂; вместе с этим производится оценка расстояний d_i, азимутов φ_i и углов места θ_i для двух радиолиний SNOI gNB₁ → UE₂ и gNB₂ → UE₁ (см. рисунок 1). Данные вычисления выполняются с использованием пакета расширения PAST [59] функцией rangeangle [57].

Далее на основе известных на базовых станциях gNB₁ и gNB₂ направлений азимутов URA1 UE1_az, URA2 UE2_az и углов места URA1 UE1_e1, URA2 UE2_e1 выполняется вычисление направляющих векторов комплексных весовых коэффициентов sv_URA1 и sv_URA2 антенных решеток для двух радиолиний SOI gNB₁ → UE₁ и gNB₂ → UE₂, соответственно.

Затем по заданным векторам sv_URA1, sv_URA2 и известным направлениям азимутов URA1 UE1_az, URA2 UE2_az и углов места URA1 UE1_e1, URA2 UE2_e1 выполняется оценка КУ полезных сигналов gain_URA1 UE1 и gain_URA2 UE2 в радиолиниях SOI gNB₁ → UE₁ и gNB₂ → UE₂, соответственно. Одновременно по заданным векторам sv_URA1, sv_URA2 и текущим направлениям азимутов URA1 UE2_az, URA2 UE1_az и углов места URA1 UE2_e1, URA2 UE1_e1 выполняется оценка КУ помех в радиолиниях SNOI gNB₁ → UE₂ и gNB₂ → UE₁, соответственно.

Затем по вычисленным расстояниям выполняется оценка потерь при PPB в свободном пространстве (FSPL, аббр. от англ. Free Space Path Loss) с использованием пакета расширения PAST [59] функцией fsp1 [58].

Итоговая оценка SIR выполняется согласно формуле (2) при условии одинаковых мощностей передачи P₀ = P_i базовых станций:

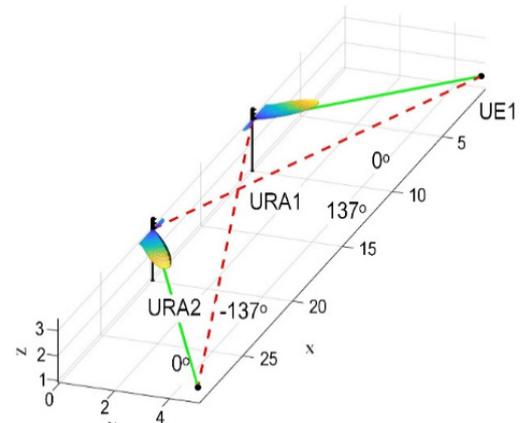
$$SIR(k) = \frac{SOI(k)}{SNOI(k)} = \frac{AF_0(k)/L_0(k)}{AF_i(k)/L_i(k)}. \quad (3)$$

В имитационной модели вычисление по формуле (3) выполняется в децибелах, поэтому деление заменяется вычитанием (см. скрипт 4). Проанализируем далее результаты оценки помех в модели двух радиолиний с ДО на основе позиционирования для формализованных сценариев.

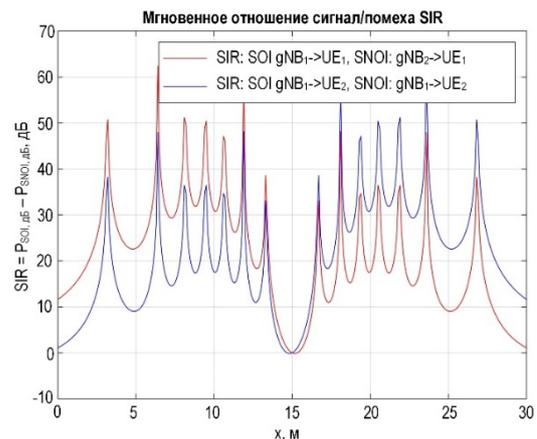
4. Результаты оценки помех в модели двух радиолиний с диаграммообразованием на основе позиционирования

4.1. Оценка помех в сценарии без территориального разнеса подвижных устройств

Рисунок 6 иллюстрирует сценарий и результаты оценки мгновенного значения SIR при движении UE друг навстречу другу без разнеса по оси y.



а) Сценарий без разнеса по оси y



б) SIR без разнеса по оси y

Рис. 6. Оценка помех в сценарии без разнеса по оси y

Fig. 6. Interference Assessment in a Scenario without y-Spacing

Антенная решетка URA₁ базовой станции gNB₁ размещена в точке с пространственными координатами (10, 0, 3) м; антенная решетка URA₂ базовой станции gNB₂ размещена в точке с координатами (20, 0, 3) м (см. рисунок 6а). Высота подвеса ненаправленных антенн устройств UE₁ и UE₂ равна 1,5 м. Устройство UE₁ движется на плоскости по оси x слева направо из точки (0, 5) м в точку (30, 5) м с шагом Δx = 0,1 м; устройство UE₂ движется на плоскости по оси x справа налево из точки (30, 5) м в точку (0, 5) м также с аналогичным шагом (см. рисунок 6а).

Анализ графиков мгновенного SIR как функции текущего местоположения UE₁ и UE₂ на оси x, представленных на рисунке 6б, позволяет сделать следующие выводы:

– зависимости SIR для радиолинии SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ и $gNB_2 \rightarrow UE_2$ симметричны относительно точки пересечения устройств UE в центре с координатой $x = 15$ м вследствие одинаковых мощностей передачи на базовых станциях gNB_1 и gNB_2 , одинаковых антенных решетках URA_1 и URA_2 , а также равномерности траекторий движения UE ;

– нелинейный характер зависимости мгновенного SIR обусловлен нелинейной диаграммой направленности URA при оценке влияния помех радиолинии $SNOI$ $gNB_2 \rightarrow UE_1$ на радиолинию SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ и оценке влияния помех радиолинии $SNOI$ $gNB_1 \rightarrow UE_2$ на радиолинию SOI $gNB_2 \rightarrow UE_2$;

– минимальное значение мгновенного $SIR = 0$ дБ при равенстве мощности полезного сигнала P_{SOI} и мощности помехи P_{SNOI} наблюдается в точке пересечения UE_1 и UE_2 в центре с координатой $x = 15$ м вследствие ориентации лучей базовых станций gNB_1 и gNB_2 в одну точку при ненулевой ширине ДНА по уровню половинной мощности; в частности, для моделируемой прямоугольной АР $\varphi_{3дБ} = \theta_{3дБ} = 12,8^\circ$;

– в начале траектории движения UE мгновенное $SIR > 10$ дБ; с удалением UE от обслуживающих их базовых станций SIR в среднем уменьшается, при этом его минимальные значения наблюдаются в конце траектории движения UE при максимальном их удалении от обслуживающих gNB , что обуславливает необходимость переключения лучей UE с одной обслуживающей базовой станции gNB на другую.

4.2. Оценка помех в сценарии с фиксированным территориальным разнесом подвижных устройств

Рисунок 7 иллюстрирует сценарий и результаты оценки мгновенного значения SIR при UE на плоскости с фиксированным разнесом по оси y . Антенные решетки URA_1 и URA_2 на базовых станциях gNB_1 и gNB_2 , соответственно, размещены аналогично рисунку 6а; высота подвеса ненаправленных антенн UE равна 1,5 м; UE_1 движется на плоскости по оси x слева направо из точки (0, 5) м в точку (30, 5) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м аналогично рисунку 6а. Далее формализуем сценарий фиксированного разнеса по оси y : UE_2 движется по оси x справа налево из точки (30, 6) м в точку (0, 6) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м и разнесом $\Delta y = 1$ м по оси y относительно траектории UE_1 (см. рисунок 7а); UE_2 движется по оси x справа налево из точки (30, 7) м в точку (0, 7) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м и разнесом $\Delta y = 2$ м по оси y относительно траектории UE_1 (см. рисунок 7с); UE_2 движется по оси x справа налево из точки (30, 8) м в точку (0, 8) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м и разнесом $\Delta y = 3$ м по оси y относительно траектории UE_1 (см. рисунок 7е).

Анализ графиков мгновенного SIR как функции текущего местоположения UE_1 и UE_2 на оси x , представленных на рисунках 7б, 7д, 7е, позволяет для

радиолиний SOI сделать вывод о том, что минимальное значение мгновенного $SIR = 0$ дБ смещается из центра траектории вправо в сторону начала движения UE_2 по оси x .

Таким образом, подтверждается наличие неочевидной зависимости SIR от территориального разнеса устройств UE_1 и UE_2 по оси y . Для установления такой зависимости рассмотрим далее оценку помех в сценарии с варьируемым территориальным разнесом подвижных UE_1 и UE_2 по оси y .

4.3. Оценка помех в сценарии с варьируемым территориальным разнесом подвижных устройств

4.3.1. Сценарий одного стационарного и одного подвижного устройства

Рисунок 8 иллюстрирует результаты оценки мгновенного SIR в сценарии с варьируемым территориальным разнесом одного стационарного и одного подвижного устройства. Антенные решетки URA_1 и URA_2 на базовых станциях gNB_1 и gNB_2 , соответственно, размещены аналогично рисунку 6а. Высота подвеса ненаправленных антенн устройств UE_1 и UE_2 равна 1,5 м. Устройство UE_1 стационарно и располагается на плоскости в точке с координатами (10, 5, 1,5) м – напротив обслуживающей базовой станции gNB_1 с координатами (10, 0, 3) м. Устройство UE_2 движется по оси x справа налево из точки (30, 0) м в точку (0, 0) м с шагом $\Delta x = 0,1$ м при координате $y = 0$ м; затем выполняется инкремент разнеса Δy по оси y и устройство UE_2 продолжает движение по оси x справа налево: так, например, при $\Delta y = 0,1$ м UE_2 продолжит движение из точки (30, 0,1) м в точку (0, 0,1) м с тем же шагом Δx . Моделирование варьируемого территориального разнеса по оси y выполняется на интервале от 0 до 10 м с шагом $\Delta y = 0,1$ м.

Анализ карт мгновенного SIR как функции текущего взаимного местоположения UE_1 и UE_2 на рисунке 8 позволяет сделать следующие выводы:

– карты SIR в радиолиниях SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ (см. рисунок 8а) и $gNB_2 \rightarrow UE_2$ (см. рисунок 8б) неочевидны и определяются электронным сканированием нелинейными ДНА прямоугольных АР на gNB по текущему местоположению UE ; более удобной трактовке поддаются области, в которых SIR оказывается выше заданного порога (см. рисунок 8с–8ф);

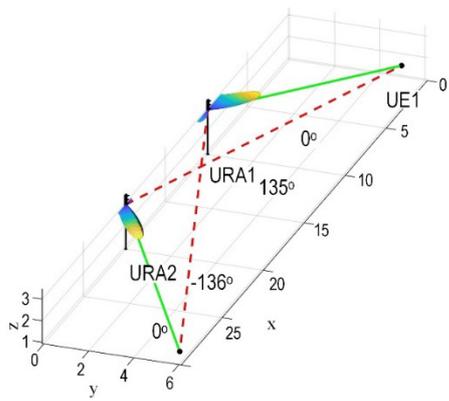
– область допустимых помех с $SIR > 10$ дБ в радиолинии SOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$ (см. рисунок 8с) в целом отражает стационарный характер размещения UE_1 , когда напротив UE_1 в точке с координатами (10, 5, 1,5) располагается обслуживающая базовая станция gNB_1 в точке с координатами (10, 0, 3) м ориентирует свой луч на UE_1 ;

– область допустимых помех с $SIR > 10$ дБ в радиолинии SOI $gNB_2 \rightarrow UE_2$ (см. рисунок 8д) в целом также отражает помеховое влияние стационарной

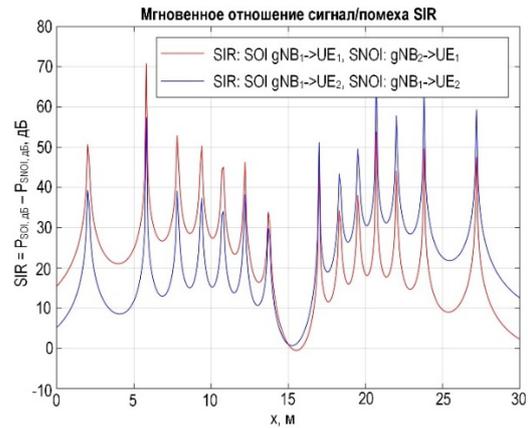
радиолинии SNOI $gNB_1 \rightarrow UE_1$: области, где SIR опускаются ниже заданного порога, находятся по оси y напротив мешающей базовой станции gNB_1 , при этом форма областей с $SIR < 10$ дБ отражает форму ДНА прямоугольной AP, мешающей gNB_1 в горизонтальной плоскости;

– при увеличении порогового SIR с 10 до 20 дБ области допустимых помех ожидаемо уменьшаются;

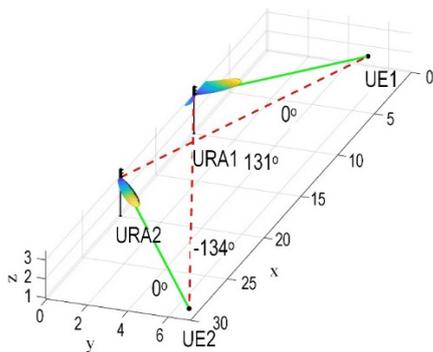
– области допустимых помех с мгновенным SIR могут служить для обоснования территориального разнеса устройств и потенциальных областей переключения лучей обслуживающих базовых станций.



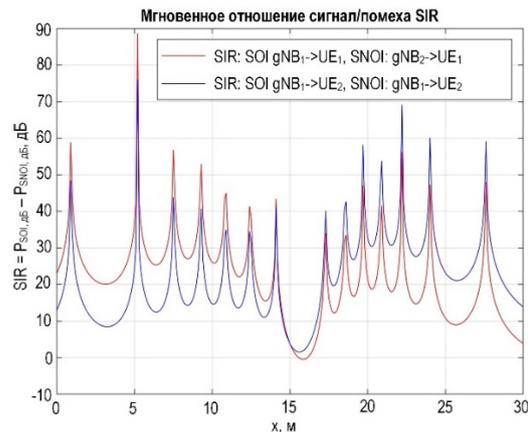
а) Сценарий с $\Delta y = 1$ м



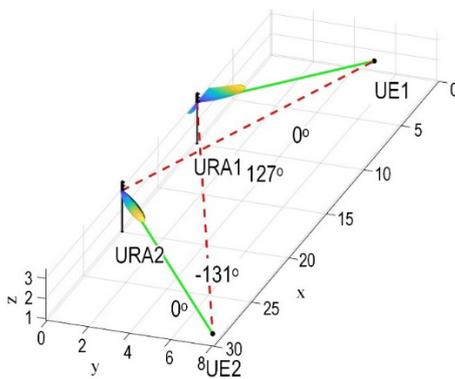
б) SIR с $\Delta y = 1$ м



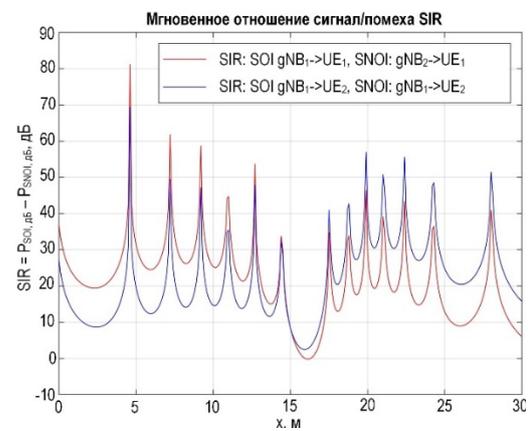
с) Сценарий с $\Delta y = 2$ м



д) SIR с $\Delta y = 2$ м



е) Сценарий с $\Delta y = 3$ м



ф) SIR с $\Delta y = 3$ м

Рис. 7. Оценка помех в сценарии с фиксированным разнесом по оси y

Fig. 7. Interference Assessment in a Fixed y -Spacing Scenario

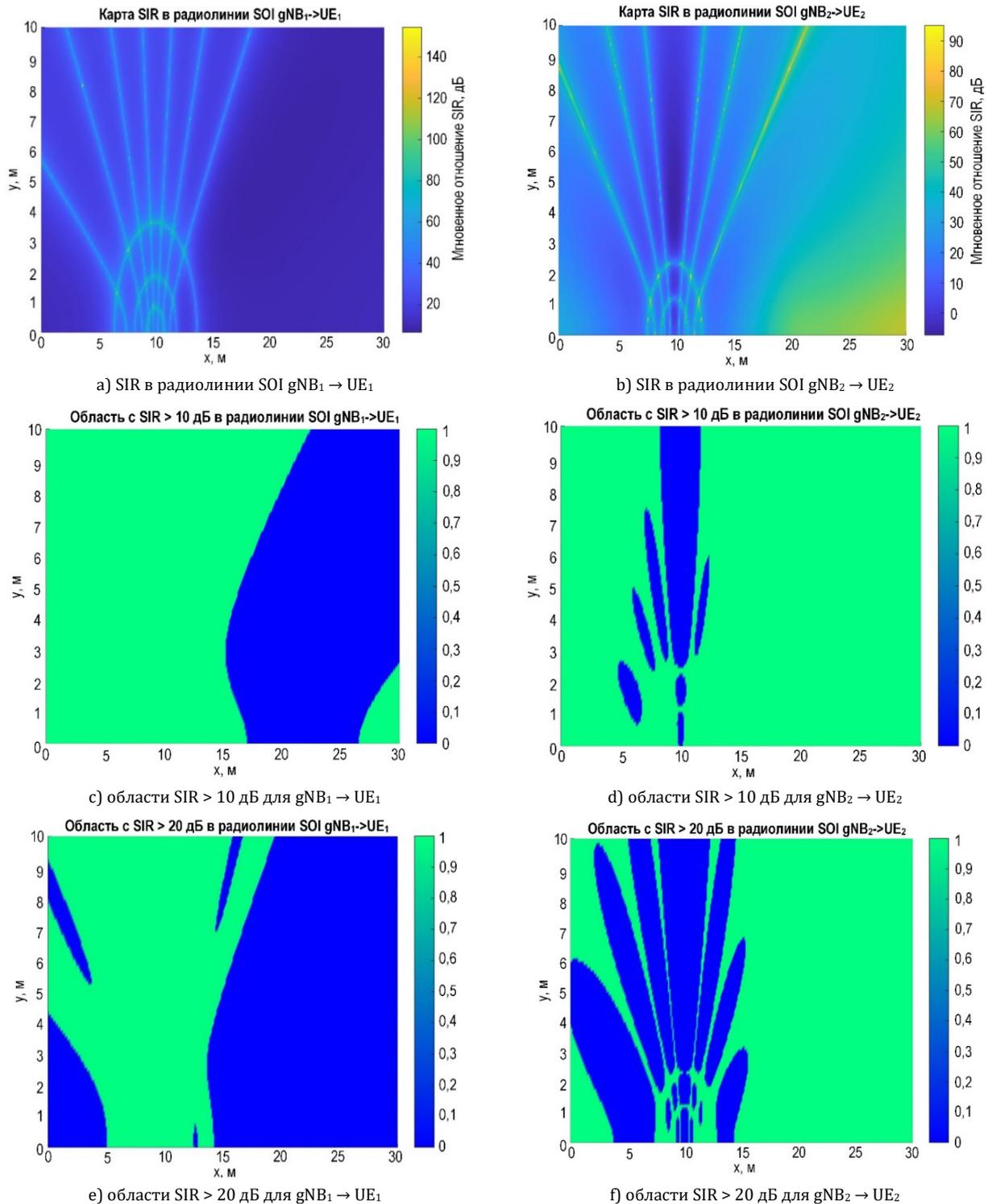


Рис. 8. Оценка помех в сценарии с варьируемым разномом одного стационарного и одного подвижного устройства

Fig. 8. Interference Assessment in a Scenario with Varying Separation of One Fixed and One Mobile Device

4.3.2. Сценарий двух подвижных устройств

Рисунок 9 иллюстрирует результаты оценки мгновенного SIR в сценарии с варьируемым территориальным разномом двух подвижных устройств.

Размещение антенных решеток URA₁ и URA₂ на gNB₁ и gNB₂, соответственно, а также сценарий дви-

жения UE₁ на плоскости по оси x слева направо из точки (0, 5) м в точку (30, 5) м с шагом Δx = 0,1 м соответствует описанному ранее сценарию, представленному на рисунке 6. Сценарий движения устройства UE₂ на плоскости справа налево и снизу вверх соответствует описанному ранее сценарию, представленному на рисунке 7.

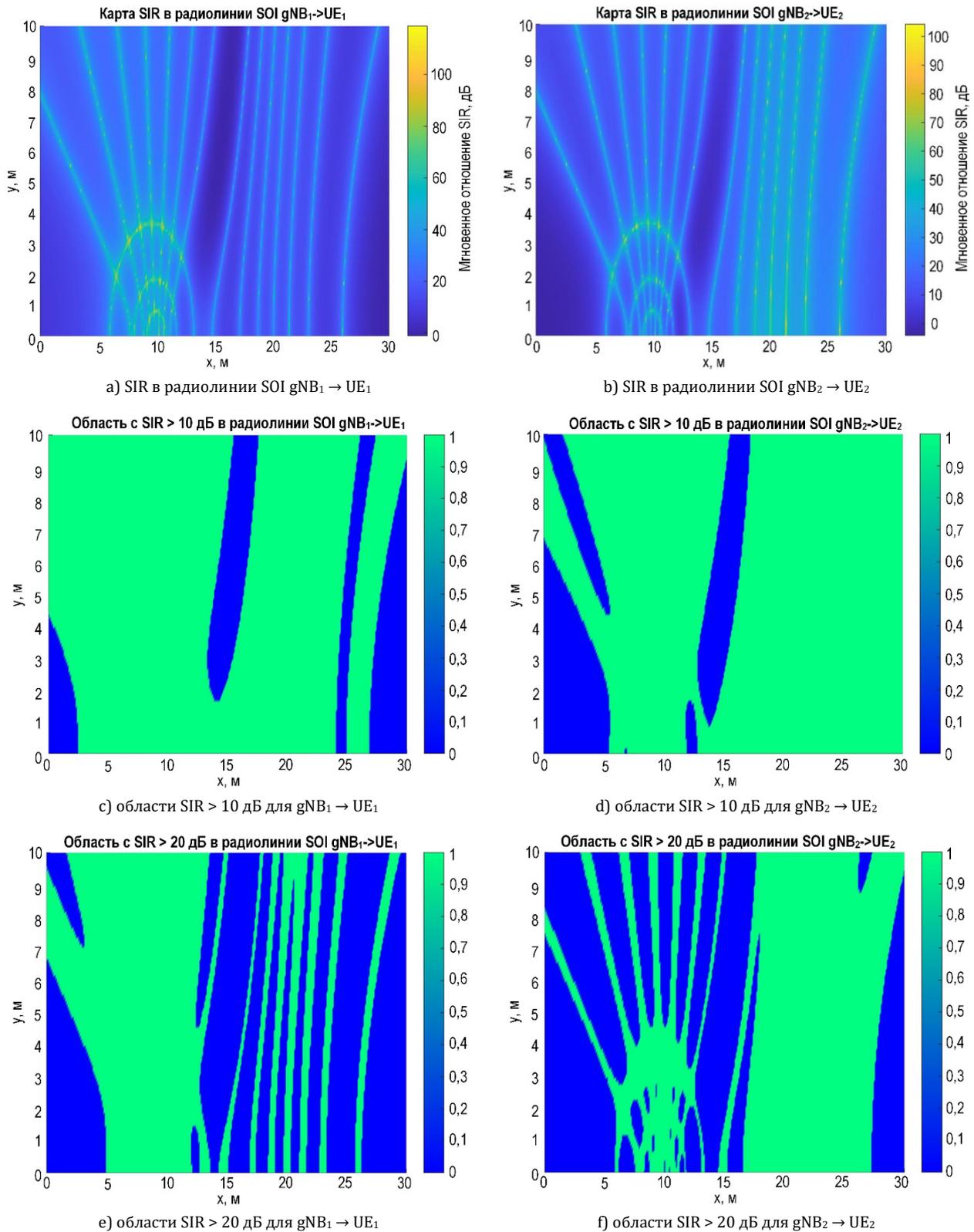


Рис. 9. Оценка помех в сценарии с варьируемым разносом двух подвижных устройств

Fig. 9. Interference Assessment in a Scenario with Varying Separation between Two Mobile Devices

Сравнивая рисунки 9б и 7б, можно сделать вывод о том, что мгновенное значение SIR в радиолинии SOI gNB₂ → UE₂ на траектории движения UE₂ по оси x справа налево из точки (30, 6) м в точку (0, 6) м

относительно траектории движения UE₁ по оси x слева направо из точки (0, 5) м в точку (30, 5) м, есть срез рисунка 9б при фиксированном разносе Δy = 1 м (рисунок 10).

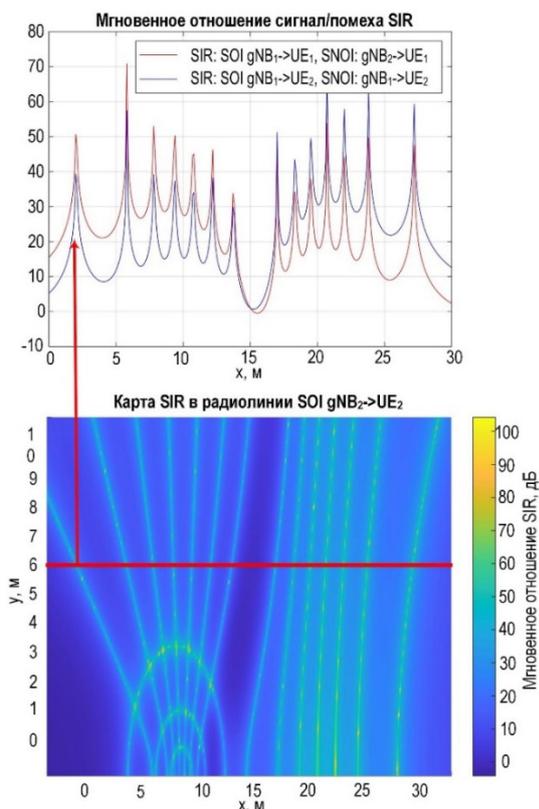


Рис. 10. Мгновенное значение SIR на траектории при фиксированном разnose как срез карты SIR с варьируемым разnoseм

Fig. 10. Instantaneous SIR Value along the Trajectory at a Fixed Spacing as a Slice of the SIR Map with Variable Spacing

Анализ карт мгновенного SIR как функции текущего взаимного местоположения подвижных устройств UE₁ и UE₂ на рисунке 9 позволяет сделать следующие выводы:

– области допустимых помех в радиолиниях SOI gNB₁ → UE₁ и gNB₂ → UE₂ различаются вследствие того, что устройство UE₁ двигается слева направо с фиксированной координатой $y = 5$ м, а UE₂ – справа налево с варьируемой координатой y ; вместе с тем для обеих радиолиний различимы обла-

сти допустимых помех вблизи обслуживающих базовых станций, выходя за пределы которых пороговое отношение SIR оказывается ниже требуемого, что в очередной раз служит основанием для переключения лучей обслуживающих базовых станций примерно на середине траектории движения устройств;

– при увеличении порогового SIR с 10 до 20 дБ области допустимых помех в обоих радиолиниях уменьшаются так, что инициировать процедуру переключения луча (с предпочтительным использованием более узкой ДНА) необходимо до того, как устройства достигнут середины траектории движения.

5. Выводы

Результаты моделирования показали существенный разброс (десятки дБ) мгновенного SIR в зависимости от территориального разноса устройств. Разработанная математическая и имитационная модель оценки мгновенного SIR для частного случая двух UE и двух стационарных устройств радиодоступа, оборудованных адаптивными антеннами, которые осуществляют ДО на основе текущего местоположения подвижных устройств в процессе их перемещения показала, что для эффективного решения проблемы управления ДНА необходимо выделить и проводить исследования и разработки на четырех уровнях абстракции: 1) сценарий отдельной радиолинии; 2) сценарий взаимного влияния двух радиолиний; 3) сценарий совокупности радиолиний одной соты; 4) сценарий совокупности сот СРД.

Разработанная модель оценки внутрисистемных помех доступна по ссылке [60].

Настоящее исследование является первым этапом разработки комплекса моделей управления ДНА на основе позиционирования устройств диапазона ММВ сверхплотных СРД. Следующим этапом исследования является разработка модели учета взаимного влияния совокупности радиолиний одной соты и совокупности сот СРД.

Список источников

1. Фокин Г.А. Концепция диаграммообразования на основе позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2022. № 10. С. 1–7.
2. Диаграммообразование на основе позиционирования в сверхплотных сетях радиодоступа миллиметрового диапазона // Российский научный фонд. URL: <https://rscf.ru/project/22-29-00528> (дата обращения 10.09.2023)
3. Фокин Г.А., Кучерявый А.Е. Сетевое позиционирование в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 9. С. 51–58. DOI:10.34832/ELSV.2020.10.9.006
4. Фокин Г.А. Использование методов сетевого позиционирования в экосистеме 5G // Электросвязь. 2020. № 11. С. 29–37. DOI:10.34832/ELSV.2020.12.11.002
5. Фокин Г.А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. Дис. ... докт. техн. наук. СПб.: СПбГУТ, 2021. 499 с.
6. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования. СПб.: СПбГУТ, 2020. 558 с.
7. Фокин Г.А. Технологии сетевого позиционирования 5G. М.: Горячая Линия – Телеком, 2021. 456 с.
8. 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
9. Фокин Г.А. Модели диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа 5G. Часть 1. Оценка помех // Первая мила. 2021. № 3(95). С. 66–73. DOI:10.22184/2070-8963.2021.95.3.66.73
10. Фокин Г.А. Модели диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа 5G. Часть 2. Оценка разноса устройств // Первая мила. 2021. № 4(96). С. 66–73. DOI:10.22184/2070-8963.2021.96.4.66.72

11. Фокин Г.А. Процедуры выравнивания лучей устройств 5G NR // Электросвязь. 2022. № 2. С. 26–31. DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.003
12. 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
13. 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
14. Фокин Г.А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 1. Конфигурация сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 2. С. 48–63. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-48-63
15. Фокин Г.А. Модель технологии сетевого позиционирования метровой точности 5G NR. Часть 2. Обработка сигналов PRS // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. № 3. С. 80–99. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-80-99
16. Фокин Г.А., Лазарев В.О. Программный модуль для оценки взаимного влияния радиолиний двух адаптивных антенн при диаграммообразовании. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2021662103 от 14.07.2021. Оубл. 22.07.2021.
17. Rappaport T.S., Gutierrez F., Ben-Dor E., Murdock J.N., Qiao Y., Tamir J.I. Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. Vol. 61. Iss. 4. PP. 1850–1859. DOI:10.1109/TAP.2012.2235056
18. Nam Y.-H., Ng B.L., Sayana K., Li Y., Zhang J., Kim Y., et al. Full-dimension MIMO (FD-MIMO) for next generation cellular technology // IEEE Communications Magazine. 2013. Vol. 51. Iss. 6. PP. 172–179. DOI:10.1109/MCOM.2013.6525612
19. Lu L., Li G.Y., Swindlehurst A.L., Ashikhmin A., Zhang R. An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2014. Vol. 8. Iss. 5. PP. 742–758. DOI:10.1109/JSTSP.2014.2317671
20. Razavizadeh S.M., Ahn M., Lee I. Three-Dimensional Beamforming: A new enabling technology for 5G wireless networks // IEEE Signal Processing Magazine. 2014. Vol. 31. Iss. 6. PP. 94–101. DOI:10.1109/MSP.2014.2335236
21. 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
22. Larsson E.G., Edfors O., Tufvesson F., Marzetta T.L. Massive MIMO for next generation wireless systems // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. Iss. 2. PP. 186–195. DOI:10.1109/MCOM.2014.6736761
23. Sun S., Rappaport T.S., Heath R.W., Nix A., Rangan S. MIMO for millimeter-wave wireless communications: beamforming, spatial multiplexing, or both? // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. Iss. 12. PP. 110–121. DOI:10.1109/MCOM.2014.6979962
24. Han S., I C.-I., Xu Z., Rowell C. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G // IEEE Communications Magazine. 2015. Vol. 53. Iss. 1. PP. 186–194. DOI:10.1109/MCOM.2015.7010533
25. Kutty S., Sen D. Beamforming for Millimeter Wave Communications: An Inclusive Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18. Iss. 2. PP. 949–973. DOI:10.1109/COMST.2015.2504600
26. Rappaport T.S., Xing Y., MacCartney G.R., Molisch A.F., Mellios E., Zhang J. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks – With a Focus on Propagation Models // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol. 65. Iss. 12. PP. 6213–6230. DOI:10.1109/TAP.2017.2734243
27. Heath R.W., González-Prelcic N., Rangan S., Roh W., Sayeed A.M. An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2016. Vol. 10. Iss. 3. PP. 436–453. DOI:10.1109/JSTSP.2016.2523924
28. Björnson E., Sanguinetti L., Wymeersch H., Hoydis J., Marzetta T.L. Massive MIMO is a reality – What is next? Five promising research directions for antenna arrays // Digital Signal Processing. 2019. Vol. 94. PP. 3–20. DOI:10.1016/j.dsp.2019.06.007
29. Heng Y., Andrews J.G., Mo J., Va V., Ali A., Ng B.L., et al. Six Key Challenges for Beam Management in 5.5G and 6G Systems // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 7. PP. 74–79. DOI:10.1109/MCOM.001.2001184
30. Bang J., Chung H., Hong J., Seo H., Choi J., Kim S. Millimeter-Wave Communications: Recent Developments and Challenges of Hardware and Beam Management Algorithms // IEEE Communications Magazine. 2021. Vol. 59. Iss. 8. PP. 86–92. DOI:10.1109/MCOM.001.2001010
31. Maiberger R., Ezri D., Erlihson M. Location based beamforming // Proceedings of the 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel (Eilat, Israel, 17–20 November 2010). IEEE, 2010. PP. 000184–000187. DOI:10.1109/EEEI.2010.5661954
32. Alkhateeb A., Ayach O.El., Leus G., Heath R.W. Channel Estimation and Hybrid Precoding for Millimeter Wave Cellular Systems // IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing. 2014. Vol. 8. Iss. 5. PP. 831–846. DOI:10.1109/JSTSP.2014.2334278
33. Va V., Zhang X., Heath R.W. Beam Switching for Millimeter Wave Communication to Support High Speed Trains // Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall, Boston, USA, 06–09 September 2015). IEEE, 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390855
34. Va V., Heath R.W. Basic Relationship between Channel Coherence Time and Beamwidth in Vehicular Channels // Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference (VTC2015-Fall, Boston, USA, 06–09 September 2015). IEEE, 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390852
35. Va V., Choi J., Heath R.W. The Impact of Beamwidth on Temporal Channel Variation in Vehicular Channels and Its Implications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2017. Vol. 66. Iss. 6. PP. 5014–5029. DOI:10.1109/TVT.2016.2622164
36. Va V., Shimizu T., Bansal G., Heath R.W. Beam design for beam switching based millimeter wave vehicle-to-infrastructure communications // Proceedings of the International Conference on Communications (ICC, Kuala Lumpur, Malaysia, 22–27 May 2016). IEEE, 2016. DOI:10.1109/ICC.2016.7511414

37. 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
38. 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
39. 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
40. 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
41. 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. DOI:10.1109/PIMRC.2019.8904367
42. 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
43. 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
44. Velazquez S.R., Broadstone S.R., Chiang A.M. Communication system using geographic position data. Patent U.S., no. 20040104839. 2004.
45. Wu W.R., Wang, Y.K. Localization-based beamforming scheme for systems with multiple antennas. Patent U.S., no. 9755797. 2017.
46. Gross F. *Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB*. McGraw-Hill Professional, 2005. 288 p.
47. Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons, 2016. 1104 p.
48. Mailloux R.J. *Phased Array Antenna Handbook*. Artech House, 2017. 691 p.
49. phased.URA. Uniform rectangular array // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura-system-object.html> (дата обращения 19.09.2023)
50. beamwidth. Beamwidth of antenna // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/beamwidth.html> (дата обращения 19.09.2023)
51. viewArray. View array geometry // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.viewarray.html> (дата обращения 19.09.2023)
52. pattern. Plot URA array pattern // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.pattern.html> (дата обращения 19.09.2023)
53. patternAzimuth. Plot URA array directivity or pattern versus azimuth // MathWorks. URL: <https://uk.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.patternazimuth.html> (дата обращения 19.09.2023)
54. patternElevation. Plot URA array directivity or pattern versus elevation // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.patternerelevation.html> (дата обращения 19.09.2023)
55. phased.SteeringVector. Sensor array steering vector // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.steeringvector-system-object.html> (дата обращения 19.09.2023)
56. phased.ArrayGain. Sensor array gain // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.arraygain-system-object.html> (дата обращения 19.09.2023)
57. rangeangle. Range and angle calculation // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/rangeangle.html> (дата обращения 19.09.2023)
58. fspl. Free space path loss // MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/fspl.html> (дата обращения 19.09.2023)
59. Phased Array System Toolbox. MathWorks. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased> (дата обращения 19.09.2023)
60. LAB Link Level Simulator with Phased Array System Toolbox // GitHub. URL: https://github.com/grihafokin/LAB_link_level_past_rus (дата обращения 19.09.2023)

References

1. Fokin G.A. Concept of Location-Aware Beamforming in 5G Networks. *Vestnik Ssviazy*. 2022;10:1–7.
2. Russian Science Foundation. *Location aware beamforming in mm-wave band ultra-dense radio access networks*. URL: <https://rscf.ru/en/project/22-29-00528> [Accessed 10.09.2023]
3. Fokin G.A., Koucheryavy A.E. Network positioning in the 5G ecosystem. *Electrosvyaz*. 2020;9:51–58. DOI:10.34832/ELSV.2020.10.9.006
4. Fokin G.A. Utilization of Network Positioning Methods in the 5G Ecosystem. *Elektrosvyaz*. 2020;11:29–37. DOI:10.34832/ELSV.2020.12.11.002
5. Fokin G.A. *A Set of Models and Methods for Positioning Devices in Fifth-Generation Networks*. D.Sc Thesis. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications Publ.; 2021. 499 p.
6. Fokin G.A. *Technologies of Network Positioning*. St. Petersburg: The Bonch-Bruевич State University of Telecommunications Publ.; 2020. 558 p.
7. Fokin G.A. *5G Network Positioning Technologies*. Moscow: Hot Line - Telecom Publ.; 2021. 456 p.
8. 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

9. 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
10. 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
11. Fokin G.A. Beam alignment procedures for 5G NR devices. *Elektrosvyaz*. 2022;2:26–31. DOI:10.34832/ELSV.2022.27.2.003
12. 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
13. 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
14. Fokin G. Simulation Model of 5G NR PRS Network Positioning Technology with Meter Accuracy. Part 1. PRS Signals Configuration. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2022;8(2):48–63. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-48-63
15. Fokin G. Simulation Model of 5G NR Network Positioning Technology with Meter Accuracy. Part 2. PRS Signals Processing. *Proc. of Telecommun. Univ.* 2022;8(3):80–99. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-3-80-99
16. Fokin G.A., Lazarev V.O. *Software Module for Assessing the Mutual Influence of Radio Links of Two Adaptive Antennas During Beamforming*. Patent RF, no. 2021662103, 14.07.2021.
17. Rappaport T.S., Gutierrez F., Ben-Dor E., Murdock J.N., Qiao Y., Tamir J.I. Broadband Millimeter-Wave Propagation Measurements and Models Using Adaptive-Beam Antennas for Outdoor Urban Cellular Communications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013;61(4):1850–1859. DOI:10.1109/TAP.2012.2235056
18. Nam Y.-H., Ng B.L., Sayana K., Li Y., Zhang J., Kim Y., et al. Full-dimension MIMO (FD-MIMO) for next generation cellular technology. *IEEE Communications Magazine*. 2013;51(6):172–179. DOI:10.1109/MCOM.2013.6525612
19. Lu L., Li G.Y., Swindlehurst A.L., Ashikhmin A., Zhang R. An Overview of Massive MIMO: Benefits and Challenges. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2014;8(5):742–758. DOI:10.1109/JSTSP.2014.2317671
20. Razavizadeh S.M., Ahn M., Lee I. Three-Dimensional Beamforming: A new enabling technology for 5G wireless networks. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2014;31(6):94–101. DOI:10.1109/MSP.2014.2335236
21. 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
22. Larsson E.G., Edfors O., Tufvesson F., Marzetta T.L. Massive MIMO for next generation wireless systems. *IEEE Communications Magazine*. 2014;52(2):186–195. DOI:10.1109/MCOM.2014.6736761
23. Sun S., Rappaport T.S., Heath R.W., Nix A., Rangan S. MIMO for millimeter-wave wireless communications: beamforming, spatial multiplexing, or both? *IEEE Communications Magazine*. 2014;52(12):110–121. DOI:10.1109/MCOM.2014.6979962
24. Han S., I C.-I., Xu Z., Rowell C. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G. *IEEE Communications Magazine*. 2015;53(1):186–194. DOI:10.1109/MCOM.2015.7010533
25. Kutty S., Sen D. Beamforming for Millimeter Wave Communications: An Inclusive Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016;18(2):949–973. DOI:10.1109/COMST.2015.2504600
26. Rappaport T.S., Xing Y., MacCartney G.R., Molisch A.F., Mellios E., Zhang J. Overview of Millimeter Wave Communications for Fifth-Generation (5G) Wireless Networks – With a Focus on Propagation Models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2017;65(12):6213–6230. DOI:10.1109/TAP.2017.2734243
27. Heath R.W., González-Prelcic N., Rangan S., Roh W., Sayeed A.M. An Overview of Signal Processing Techniques for Millimeter Wave MIMO Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2016;10(3):436–453. DOI:10.1109/JSTSP.2016.2523924
28. Björnson E., Sanguinetti L., Wymeersch H., Hoydis J., Marzetta T.L. Massive MIMO is a reality – What is next? Five promising research directions for antenna arrays. *Digital Signal Processing*. 2019;94:3–20. DOI:10.1016/j.dsp.2019.06.007
29. Heng Y., Andrews J.G., Mo J., Va V., Ali A., Ng B.L., et al. Six Key Challenges for Beam Management in 5.5G and 6G Systems. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(7):74–79. DOI:10.1109/MCOM.001.2001184
30. Bang J., Chung H., Hong J., Seo H., Choi J., Kim S. Millimeter-Wave Communications: Recent Developments and Challenges of Hardware and Beam Management Algorithms. *IEEE Communications Magazine*. 2021;59(8):86–92. DOI:10.1109/MCOM.001.2001010
31. Maiberger R., Ezri D., Erlihson M. Location based beamforming. *Proceedings of the 26th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel, 17–20 November 2010, Eilat, Israel*. IEEE; 2010. p.000184–000187. DOI:10.1109/EEEL.2010.5661954
32. Alkhateeb A., Ayach O.El., Leus G., Heath R.W. Channel Estimation and Hybrid Precoding for Millimeter Wave Cellular Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*. 2014;8(5):831–846. DOI:10.1109/JSTSP.2014.2334278
33. Va V., Zhang X., Heath R.W. Beam Switching for Millimeter Wave Communication to Support High Speed Trains. *Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference, VTC2015-Fall, 06–09 September 2015, Boston, USA*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390855
34. Va V., Heath R.W. Basic Relationship between Channel Coherence Time and Beamwidth in Vehicular Channels. *Proceedings of the 82nd Vehicular Technology Conference, VTC2015-Fall, 06–09 September 2015, Boston, USA*. IEEE; 2015. DOI:10.1109/VTCFall.2015.7390852
35. Va V., Choi J., Heath R.W. The Impact of Beamwidth on Temporal Channel Variation in Vehicular Channels and Its Implications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2017;66(6):5014–5029. DOI:10.1109/TVT.2016.2622164
36. Va V., Shimizu T., Bansal G., Heath R.W. Beam design for beam switching based millimeter wave vehicle-to-infrastructure communications. *Proceedings of the International Conference on Communications, ICC, 22–27 May 2016, Kuala Lumpur, Malaysia*. IEEE; 2016. DOI:10.1109/ICC.2016.7511414
37. 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

38. 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
39. 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
40. 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
41. 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. DOI:10.1109/PIMRC.2019.8904367
42. 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
43. 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
44. Velazquez S.R., Broadstone S.R., Chiang A.M. *Communication system using geographic position data*. Patent U.S., no. 20040104839, 2004.
45. Wu W.R., Wang, Y.K. *Localization-based beamforming scheme for systems with multiple antennas*. Patent U.S., no. 9755797, 2017.
46. Gross F. *Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB*. McGraw-Hill Professional; 2005. 288 p.
47. Balanis C.A. *Antenna theory: analysis and design*. John Wiley & Sons; 2016. 1104 p.
48. Mailloux R.J. *Phased Array Antenna Handbook*. Artech House; 2017. 691 p.
49. MathWorks. *phased.URA. Uniform rectangular array*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura-system-object.html> [Accessed 10.09.2023]
50. MathWorks. *beamwidth. Beamwidth of antenna*. URL: <https://www.mathworks.com/help/antenna/ref/beamwidth.html> [Accessed 10.09.2023]
51. MathWorks. *viewArray. View array geometry*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.view-array.html> [Accessed 10.09.2023]
52. MathWorks. *pattern. Plot URA array pattern*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.pattern.html> [Accessed 10.09.2023]
53. MathWorks. *patternAzimuth. Plot URA array directivity or pattern versus azimuth*. URL: <https://uk.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.patternazimuth.html> [Accessed 10.09.2023]
54. MathWorks. *patternElevation. Plot URA array directivity or pattern versus elevation*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.ura.pattern-elevation.html> [Accessed 10.09.2023]
55. MathWorks. *phased.SteeringVector. Sensor array steering vector*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.steeringvector-system-object.html> [Accessed 10.09.2023]
56. MathWorks. *phased.ArrayGain. Sensor array gain*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/phased.arraygain-system-object.html> [Accessed 10.09.2023]
57. MathWorks. *rangeangle. Range and angle calculation*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/rangeangle.html> [Accessed 10.09.2023]
58. MathWorks. *fspl. Free space path loss*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ref/fspl.html> [Accessed 10.09.2023]
59. MathWorks. *Phased Array System Toolbox*. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased> [Accessed 10.09.2023]
60. GitHub. *LAB Link Level Simulator with Phased Array System Toolbox*. URL: https://github.com/grihafokin/LAB_link_level_past_rus [Accessed 10.09.2023]

Статья поступила в редакцию 19.07.2023; одобрена после рецензирования 29.08.2023; принята к публикации 04.09.2023.

The article was submitted 19.07.2023; approved after reviewing 29.08.2023; accepted for publication 04.09.2023.

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>