

ОЦЕНКА ПОМЕХ В СВЕРХПЛОТНЫХ СЕТЯХ РАДИОДОСТУПА 5G С ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЕМ

Г. А. Фокин

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

Адрес для переписки: grihafokin@gmail.com

Аннотация—В настоящей работе исследуется зависимость уровня внутрисистемных помех от ширины луча адаптивно формируемой диаграммы направленности антенны и территориального разнеса соседних устройств в сверхплотных сетях радиодоступа 5G. Результаты имитационного моделирования сети радиодоступа на основе 19 базовых станций с параметризацией коэффициента усиления антенной решетки шириной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости показывают, что при направлении луча базовой станции на пользовательское устройство и его сужении с 360° до 5° уровень внутрисистемных помех уменьшается на 15 дБ по сравнению со случаем ненаправленных антенн. Результаты имитационного моделирования сети радиодоступа на основе 19 трехсекторных базовых станций с прямоугольными антенными решетками из 64 элементов иллюстрируют существенное снижение уровня помех по сравнению со случаем ненаправленных антенн и для получения зон положительного отношения сигнал/помеха подтверждают необходимость территориального разнеса соседних устройств на величину в 10–20 % от дальности радиопокрытия. **Предмет исследования.** Статья посвящена моделированию сверхплотной сети радиодоступа 5G с базовыми станциями, оборудованными антенными решетками с возможностью адаптивного формирования луча на основе предварительного позиционирования пользовательского устройства. **Метод.** Математическое и имитационное моделирование совокупности одновременно работающих радиолиний в сверхплотной сети радиодоступа 5G позволяют оценить выигрыш в отношении сигнал/помеха при формировании луча на основе предварительного позиционирования по сравнению со случаем ненаправленных антенн для сценариев сужения ширины диаграммы направленности антенны и территориального разнеса соседних устройств. **Основные результаты.** Результатом исследования является установление зависимости уровня внутрисистемных помех от ширины формируемого луча для радиостанций, работающих в режиме адаптивного диаграммообразования в составе сверхплотных сетей радиодоступа 5G, а также получение в первом приближении оценок территориального разнеса одновременно работающих приемопередающих устройств. **Практическая значимость.** Установленная зависимость позволяет обосновывать практические рекомендации для территориального разнеса устройств, работающих в режиме адаптивного диаграммообразования при их сверхплотном распределении с учетом ширины формируемого луча.

Ключевые слова—диаграммообразование на основе позиционирования, сверхплотная сеть радиодоступа, базовая станция, пользовательское устройство, 5G, кластер, ширина луча.

Информация о статье

УДК 621.396.93

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 22.11.2020, принята к печати 23.12.2020.

Ссылка для цитирования: Фокин Г. А. Оценка помех в сверхплотных сетях радиодоступа 5G с диаграммообразованием // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 4. С. 35–59. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-4-35-59.

EVALUATION OF INTERFERENCE IN ULTRA-DENSE 5G RADIO ACCESS NETWORKS WITH BEAMFORMING

G. Fokin

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation
Corresponding author: grihafokin@gmail.com

Abstract—In this paper, we investigate the dependence of the level of intersystem interference on the beam width of the adaptively formed antenna radiation pattern and the territorial separation of neighboring devices in ultra-dense 5G radio access networks. The results of simulation modeling of a radio access network based on 19 base stations with the parameterization of the antenna array gain by the width of the radiation pattern in the horizontal plane show that when the base station beam is directed to the user device and narrowed from 360° to 5°, the level of intrasystem interference decreases by 15 dB compared with the case of omnidirectional antennas. The results of simulation of a radio access network based on 19 three-sector base stations with planar antenna arrays of 64 elements illustrate a significant reduction in the level of interference in comparison with the case of omnidirectional antennas and, in order to obtain zones of a positive signal-to-noise ratio, confirm the need for a territorial separation of neighboring devices by 10–20 % of the range of radio coverage.

Keywords—location-aware beamforming, ultra-dense radio access network, base station, user device, 5G, cluster, beamwidth.

Article info

Article in Russian.

Received 22.11.2020, accepted 23.12.2020.

For citation: Fokin G.: Evaluation of Interference in Ultra-Dense 5G Radio Access Networks with Beamforming // Telecom IT. 2020. Vol. 8. Iss. 4. pp. 35–59 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-4-35-59.

Введение

Сети пятого поколения на сегодняшний день рассматриваются как инфраструктурная основа для цифровой экономики [1], поэтому вопросы построения и функционирования экосистемы 5G представляются, несомненно, актуальными. Отличительной чертой перспективных сетей пятого поколения является сверхплотное территориальное распределение образующих их устройств радиодоступа – базовых станций BS (*Base Station*) и подвижных пользовательских устройств UE (*User Equipment*) с плотностью до одного устройства на 1 м² [2, 3, 4].

Сверхплотная сеть радиодоступа (СПД) UDN (*Ultra-Dense Network*) характеризуется высокой вероятностью наличия прямой видимости LOS (*Line Of Sight*)

в радиолиниях BS–UN и/или UN–UN на расстоянии в несколько десятков метро^{1,2}, а также высоким уровнем внутрисистемных помех вследствие близкого расположения одновременно работающих приемопередающих устройств [5, 6].

Для компенсации внутрисистемных помех и повышения пространственного уплотнения одновременных передач в режиме многостанционного доступа с пространственным мультиплексированием SDMA (*Space Division Multiple Access*) [7] в сетях 5G, в отличие от сетей радиодоступа предыдущих поколений, планируется гораздо более широко использовать адаптивное трехмерное диаграммообразование (ДО) 3D Beamforming (3D BF) [8, 9, 10] как в каналах «вниз» (BS→UN), так и в каналах «вверх» UL (UN→BS); последнее стало возможным благодаря реализации многоэлементных антенных решеток (АР) в портативных устройствах за счет перехода в диапазон миллиметровых волн [11, 12, 13, 14].

С точки зрения отдельно взятой радиолинии BS–UN или UN–UN [15, 16] адаптивное формирование диаграмм направленности антенн (ДНА) позволяет реализовать пространственную селекцию сигналов в режиме передачи и приема следующим образом: осведомленность о текущих передачах мешающих сигналов потенциальных источников внутрисистемных помех SNOI (*Signal Of No Interest*) позволяет сформировать в соответствующих направлениях провалы ДНА как при работе на передачу, так и при работе на прием.

Если паре передающего и принимающего устройства, образующих радиолинию, известны относительные угловые расположения друг друга, они могут сформировать ДНА с максимальным усилением в направлении приема/передачи полезного сигнала SOI (*Signal Of Interest*). Диаграммообразование с провалами в направлениях SNOI и максимумами в направлении SOI позволяют повысить вероятность успешного радиоприема при работе в общем радиоканале и, таким образом, способствует пространственному уплотнению одновременных передач SDMA.

Традиционным средством осведомленности сетевых устройств является информированность передатчика и приемника о текущей обстановке в радиоканале CSI (*Channel State Information*), которая накапливается в результате периодического анализа обучающих последовательностей в радиоэфире (зачастую при работе в ненаправленном режиме). Недостатком подхода, основанного на сборе CSI, являются накладные расходы на передачу и прием обучающих последовательностей, а также инерционность самого процесса обучения.

Актуальным направлением для ДО в сверхплотных СРД 5G является подход, основанный на предварительном позиционировании соседних устройств LAB (*Location Aware Beamforming*), которые могут выступать как SOI, так и SNOI [17, 18, 19]; определив направление прихода AoA/DoA (*Angle/Direction of Arrival*) сигналов и помех, можно адаптивно сформировать ДНА на прием и/или передачу. В ряде исследований было установлено, что трехмерное адаптивное ДО 3D BF на основе позиционирования соседних устройств по азимуту и углу места позволяет существенно повысить показатели функционирования СРД.

¹ Report ITU-R M.2135-1. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced. ITU. – 2009.

² Report ITU-R M.2412-0. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. ITU. – 2017.

В [16] показано, что совокупная пропускная способность в сети повышается пропорционально сужению луча в вертикальной плоскости по закону $1/(\theta_{3dB})^2$, где θ_{3dB} – ширина ДНА по уровню половинной мощности (по уровню минус 3 дБ) $HPBW_V$ (*Half-Power Beamwidth, Vertical*) в вертикальной плоскости. Реализованная далее имитационная модель (ИМ) устанавливает зависимость степени подавления уровня внутрисистемных помех ISR (*Interference Suppression Rate*) от ширины ДНА в горизонтальной плоскости (2D) по закону $1/(\phi_{3dB})^2$, где ϕ_{3dB} – ширина ДНА по уровню половинной мощности $HPBW_H$ (*Horizontal*) в горизонтальной плоскости.

В работе [6] показано, что известная проблема, когда уровень помех для близкорасположенного к базовой станции пользовательского устройства начинает существенно уменьшаться при перемещении последнего к границе радиопокрытия, может быть частично решена за счет вертикального диаграммообразования на основе предварительного позиционирования устройства.

В [8] исследуется степень подавления внутрисистемных помех за счет адаптивного ДО при случайном распределении устройств в трехмерном сценарии 3D; установлено, что при сужении ширины ДНА повышается радиопокрытие, совокупная пропускная способность и степень подавления помех; моделирование сценария ДО при $\phi_{3dB} = 8^\circ$ и $\theta_{3dB} = 8^\circ$ и сравнение со случаем ненаправленных сеансов радиосвязи (*Omni Directional*) без ДО при $\phi_{3dB} = 65^\circ$ и $\theta_{3dB} = 32^\circ$ показало повышение радиопокрытия с 66 до 99 %; также в работе сделан акцент на определяющем влиянии ДО в горизонтальной плоскости. Реализованная в настоящей работе ИМ устанавливает далее количественную зависимость подавления внутрисистемных помех $ISR(\phi_{3dB})$ от ширины ДНА в горизонтальной плоскости $HPBW_H$ при случайном распределении устройств на плоскости.

В [9] сделан акцент на необходимости пространственного моделирования совокупности радиолиний в СРД 5G в связи с уплотнением территориального распределения устройств и, как следствие, сокращением расстояния между устройствами от нескольких десятков до единиц метров; при этом допущение о моделировании на плоскости 2D при определенных условиях становится недостаточным, и приводит к необходимости учета как азимута, так и угла места соседних устройств в пространстве 3D. Выполненный в настоящей работе анализ территориального разнесения устройств в зависимости от параметра $HPBW_H(\phi_{3dB})$ и $HPBW_V(\theta_{3dB})$ в условиях сверхплотного их распределения в первом приближении подтверждает необходимость учета ширины ДНА как в горизонтальной ϕ_{3dB} , так и в вертикальной θ_{3dB} плоскостях.

В [10] подчеркивается важность предварительного позиционирования пользовательских устройств в многопользовательских сценариях при формировании ДНА базовой станцией, так как для многоантенных систем massive MIMO накопление сведений о состоянии канала CSI становится затруднительным ввиду значительного увеличения элементов AP.

Термин LAA упоминается в ряде работ [17, 18, 19] и подразумевает формирование комплексных весовых коэффициентов на каждом элементе AP передающего и принимающего устройства на основании известных направлений AoA/DoA сигналов и помех.

Для анализа сверхплотных СРД средствами математического и имитационного моделирования широкое распространение получили два подхода [20]. *Первый* подход предполагает случайное распределение устройств на плоскости

по точечному процессу Пуассона PPP (*Poisson Point Process*), характеризуется параметром плотности устройств, которая определяет вероятность нахождения заданного числа устройств на заданной площади, и широко используется при исследовании самоорганизующихся сетей радиосвязи. *Второй* подход моделирует территориальное распределение устройств гексагональной решеткой на плоскости, и широко используется при исследовании сотовых сетей радиосвязи.

С точки зрения геометрического фактора снижения точности GDOP (*Geometrical Dilution of Precision*), используемого при оценке эффективности топологии опорных устройств в задачах позиционирования, регулярная гексагональная структура представляется более предпочтительной моделью для определения местоположения (МП) соседних устройств [21]. Несмотря на то, что распределение устройств в СРД отлично от структуры гексагональной решетки, данная модель поддается аналитическому моделированию и широко используется для оценки уровня подавления внутрисистемных помех ISR [22].

Уровень внутрисистемных помех, как метрика для оценки эффекта от использования адаптивного диаграммообразования в сверхплотных СРД, является достаточно распространенной [5, 6] и является предметом исследования в настоящей работе.

Целью настоящего исследования является оценка возможностей пространственного уплотнения одновременных передач в сверхплотных СРД, образованных устройствами с адаптивно формируемыми ДНА. Для достижения поставленной цели в работе далее решаются следующие частные задачи:

а) установление зависимости уровня внутрисистемных помех от ширины луча адаптивно формируемой ДНА приемопередающего устройства в сверхплотных СРД 5G;

б) оценка территориального разноса соседних устройств в первом приближении от ширины луча адаптивно формируемой ДНА в сверхплотных СРД 5G.

Материал организован далее следующим образом. В разделе 2 формализована математическая модель и сценарий для оценки зависимости уровня помех от ширины луча ДНА приемопередающего устройства в СРД 5G. В разделе 3 представлена ИМ, сценарий и результаты оценки помех. В разделе 4 формализована математическая модель оценки территориального разноса соседних устройств в первом приближении от ширины луча адаптивно формируемой ДНА в горизонтальной и вертикальной плоскостях. В разделе 5 представлена ИМ, сценарий и результаты оценки территориального разноса на уровень помех. Раздел 6 содержит выводы и направления дальнейших исследований.

Математическая модель оценки помех в СРД 5G

Рассмотрим сценарий оценки внутрисистемных помех в сверхплотной сети радиодоступа 5G по модели гексагональной структуры на примере канала «вверх» UL (рис. 1).

Допустим, базовые станции BS оборудованы AP с возможностью адаптивного ДО и осведомлены о текущем МП пользовательских устройств UE; UE ведут передачу в ненаправленном режиме Omni, BS ведут прием в направленном режиме (*Directional*) с ДО (*Beamforming*); анализ внутрисистемных помех ведется для радиолинии SOI $U_0 \rightarrow B_0$; остальные радиолинии $U_i \rightarrow B_i$, $i = 1, \dots, N$ работающие одновременно в соседних сотах, являются для данной радиолинии источниками

внутрисистемных помех SNOI, где N – общее число соседних сот, являющихся источниками внутрисистемных помех для радиолинии SOI $U_0 \rightarrow B_0$. Обозначим через d_0 расстояние между B_0 и U_0 , а через d_i расстояния между B_0 и другими U_i , ведущими передачу одновременно с U_0 в соседних сотах.

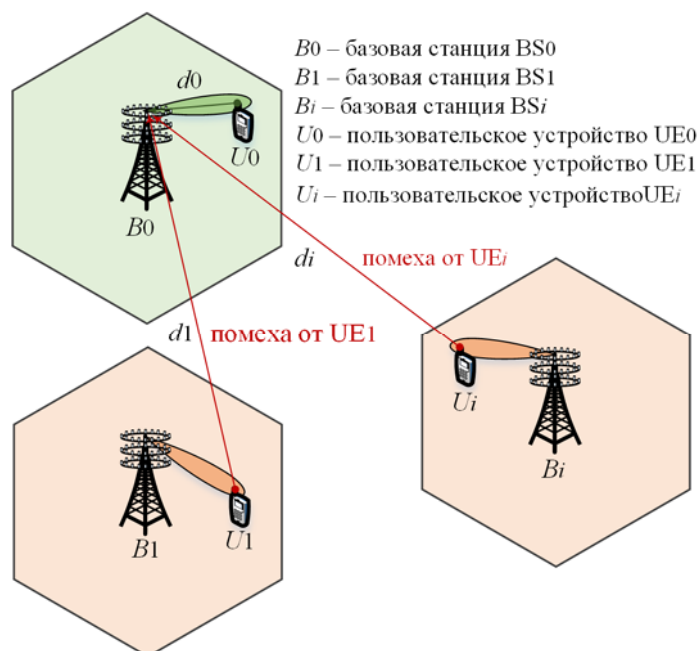


Рис. 1. Сценарий оценки помех в канале вверх сети радиодоступа

Традиционный подход к построению однородной гексагональной структуры предполагает следующие допущения: все БС имеют одинаковые значения эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ), одинаковые антенны и высоты их подвеса; у каждой БС своя территория радиопокрытия – круг радиусом R . Пусть N_{cl} – размерность кластера (число сот с неповторяющимися частотами в группе), тогда параметры гексагональной модели сети определяются расстоянием между центрами кластеров D_{cl} [23]:

$$D_{cl} = \sqrt{3N_{cl}}R.$$

При размерности кластера $N_{cl} = 1$ в каждой соте частоты используются повторно и расстояние между БС, работающими на одинаковых частотах, равно $D_{cl} = \sqrt{3}R$; при размерности кластера $N_{cl} = 3$ частоты используются повторно в каждой третьей соте и расстояние между БС, работающими на одинаковых частотах, равно $D_{cl} = 3R$; БС, работающие на одинаковых частотах являются источниками внутрисистемных помех при анализе канала «вниз»; для анализа канала «вверх» будем далее предполагать, что в каждой соте i , $i = 1, \dots, N$, одновременно с U_0 передачу ведет пользовательское устройство U_i . Рис. 2 иллюстрирует сценарий оценки помех для кластера размера 1 и 3: анализ двух сценариев в ИМ позволяет охарактеризовать степень влияния уплотнения устройств на уровень помех в СРД.

Для оценки внутрисистемных помех на совпадающих частотах в канале UL следует оценить расстояние d_0 между B_0 и U_0 в радиолинии SOI и расстояния d_i между B_0 и другими U_i , ведущими передачу одновременно с U_0 в соседних сотах

$i = 1, \dots, M$. Наиболее неблагоприятный сценарий соответствует случаю нахождения UE на границе соты на расстоянии R от обслуживающей БС. Обычно для оценки помех достаточно учета двух «колец» (уровней) соседних сот, окружающих данную соту: B_1-B_6 – шесть базовых станций первого уровня; B_7-B_{18} – двенадцать базовых станций второго уровня; влиянием БС более высоких уровней обычно пренебрегают вследствие потерь при распространении радиоволн (РРВ).

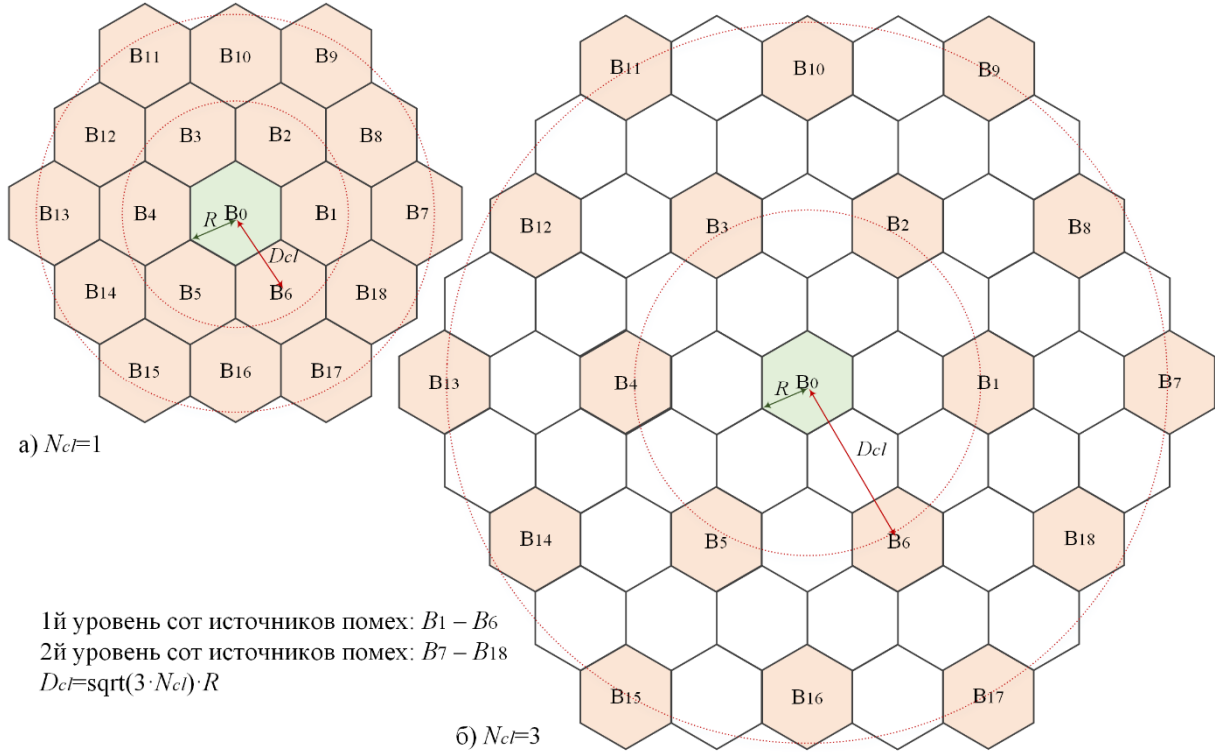


Рис. 2. Сценарий оценки помех для кластера размера 1 и 3

Обозначим через $k = 1, 2$ индекс кольца соседних сот (БС), а через i индекс B_i в кольце k ; допустим, что B_0 располагается в начале координат, т. е. $\mathbf{B}_{xy,0} = [0, 0]$, тогда координаты окружающих БС B_i $\mathbf{B}_{xy,k,i} \in \mathbb{C}$ удобно определить на комплексной плоскости; для БС B_1-B_6 первого кольца координаты определяются выражением:

$$\mathbf{B}_{xy,1,i} = D_{cl} \cdot e^{j \cdot i \cdot \pi/3}, i = 1, \dots, 6$$

для БС B_7-B_{18} второго кольца координаты определяются выражением:

$$\mathbf{B}_{xy,2,i} = 2D_{cl} \cdot e^{j \cdot (i-7) \cdot \pi/6}, i = 7, 9, 11, 13, 15, 17,$$

$$\mathbf{B}_{xy,2,i} = \sqrt{3}D_{cl} \cdot e^{j \cdot (i-7) \cdot \pi/6}, i = 8, 10, 12, 14, 16, 18,$$

где $j = \sqrt{-1}$. Далее координаты БС B_i , $i = 0, \dots, 18$ будем обозначать $\mathbf{B}_{xy,i}$. Координаты пользовательского устройства U_i в каждой соте B_i , $i = 0, \dots, 18$ определяются случайным образом с учетом дальности радиопокрытия R на плоскости (2D):

$$\mathbf{U}_{xy,i} = \{ \text{real}(\mathbf{B}_{xy,i}) + \text{rand}(-1,1) \cdot R \} + \\ + j \cdot \{ \text{imag}(\mathbf{B}_{xy,i}) + \text{rand}(-1,1) \cdot R \}; i = 0, \dots, 19;$$

где $rand(-1, 1)$ – случайное число в диапазоне от -1 до 1 с равномерным распределением; $x_{U_i} = real(\mathbf{B}_{xy,k,i})$ – координата x пользовательского устройства U_i ; $y_{U_i} = imag(\mathbf{B}_{xy,k,i})$ – координата y пользовательского устройства U_i . Принимая во внимание расположение B_0 в начале координат, расстояние d_i между B_0 и U_i , $i = 0, \dots, 18$ можно определить выражением:

$$d_i = \|\mathbf{U}_{xy,i}\|_2 = \sqrt{x_{U_i}^2 + y_{U_i}^2}; i = 0, \dots, 18,$$

где $\|\cdot\|_2$ – оператор Евклидовой нормы.

Зная расстояние d_0 между B_0 и U_0 и расстояния d_i между B_0 и другими U_i , можно оценить отношение сигнал/помеха SIR (*Signal to Interference Ratio*) в канале «вверх» UL для сценария ненаправленных антенн (*Omn*) у базовых станций и пользовательских устройств:

$$SIR_0 = \frac{P_0 d_0^{-\eta}}{\sum_{i=1}^N P_i d_i^{-\eta}}, N = 18,$$

где η – показатель потерь распространения радиоволн (PPB); для условий LOS $\eta = 2$; P_0 – мощность передатчика U_0 ; P_i – мощность передатчика U_i , $i = 1, \dots, 18$; для модели однородной сети справедливо допущение о равенстве мощностей передатчиков всех пользовательских устройств.

Для учета направленных свойств антенн у базовой станции B_0 и пользовательского устройства U_0 в пространстве (3D) для радиолинии SOI $U_0 \rightarrow B_0$ рассмотрим рис. 3, на котором приняты следующие обозначения: (x_U, y_U, h_U) – координаты U_0 ; $(0, 0, h_B)$ – координаты B_0 ; h_U – высота подвеса AP U_0 ; h_B – высота подвеса AP B_0 ; $z_U = h_B - h_U$ – разность высот подвеса AP U_0 и B_0 ; d_0 – расстояние между U_0 и B_0 в пространстве; d_{0xy} – проекция расстояния d_0 на плоскость xy ; φ_{B_0} – азимут местоположения B_0 относительно U_0 , измеряемый от оси $0x$; θ_{B_0} – угол места местоположения B_0 относительно U_0 , измеряемый от плоскости xy ; φ_{U_0} – азимут местоположения U_0 относительно B_0 , измеряемый от оси $0x$; θ_{U_0} – угол места местоположения U_0 относительно B_0 , измеряемый от плоскости xy .

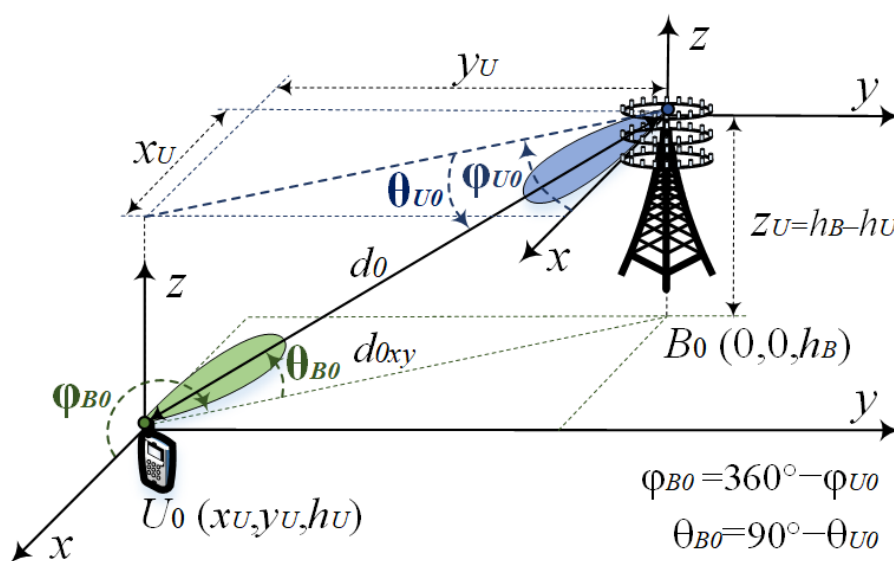


Рис. 3. 3D модель расположения передатчика и приемника SOI

Расстояние d_0 между B_0 и U_0 можно определить выражением:

$$d_0 = \|\mathbf{u}_{xy,0}\|_2 = \sqrt{x_{U_0}^2 + y_{U_0}^2 + z_{U_0}^2}.$$

Проекция d_{0xy} расстояния d_0 на плоскость $xу$:

$$d_{0xy} = \sqrt{x_{U_0}^2 + y_{U_0}^2}.$$

Азимут φ_{U_0} местоположения U_0 относительно B_0 равен:

$$\varphi_{U_0} = \tan^{-1}(y_{U_0}/x_{U_0}).$$

Угол места θ_{U_0} местоположения U_0 относительно B_0 равен:

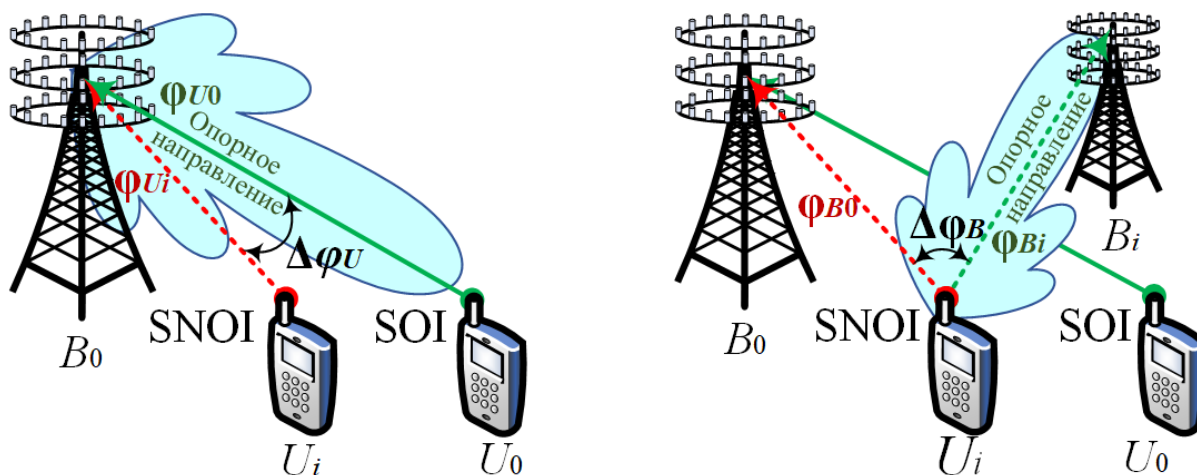
$$\theta_{U_0} = \tan^{-1}(z_{U_0}/d_{0xy}).$$

Из рис. 3 следует, что для относительных углов в радиолинии SOI справедливы следующие соотношения:

$$\varphi_{B_0} = 360^\circ - \varphi_{U_0}; \theta_{B_0} = 90^\circ - \theta_{U_0}.$$

Для учета направленных свойств антенн у базовой станции B_0 и пользовательских устройств U_i , являющихся источниками помех в канале «вверх», для радиолиний SNOI $U_i \rightarrow B_0$ рассмотрим рис. 4 на плоскости (2D) на котором приняты следующие новые обозначения: φ_{U_i} – азимут местоположения U_i относительно B_0 ; φ_{B_i} – азимут местоположения B_i относительно U_i . Из рис. 4 следует, что для относительных углов в радиолиниях SNOI справедливы следующие соотношения:

$$\Delta\varphi_U = \varphi_{U_i} - \varphi_{U_0}; \Delta\varphi_B = \varphi_{B_i} - \varphi_{B_0}.$$



а) $\Delta\varphi_U$ для приемника B_0

б) $\Delta\varphi_B$ для передатчика U_i

Рис. 4. 2D модель расположения передатчика и приемника SNOI

Значение $\Delta\varphi_U$ позволяет оценить ослабление сигнала SNOI в канале UL; значение $\Delta\varphi_B$ позволяет оценить усиление сигнала SNOI в канале UL. С учетом введенных углов в трехмерной модели отношение сигнал/помеха SIR в канале «вверх» UL для сценария направленных (*Directional*) антенн с ДО (*Beamforming*)

у базовых станций и пользовательских устройств при равенстве мощностей передатчиков всех пользовательских устройств определяется как [24]:

$$SIR_D = \frac{d_0^{-\eta} G_{HB_0}(\varphi_{U_0}) G_{VB_0}(\theta_{U_0}) G_{HU_0}(\varphi_{B_0}) G_{VU_0}(\theta_{B_0})}{\sum_{i=1}^N d_i^{-\eta} G_{HB_0}(\varphi_{U_i}) G_{VB_0}(\theta_{U_i}) G_{HU_i}(\varphi_{B_0}) G_{VU_i}(\theta_{B_0})}; N = 18;$$

где G_{HB_0} – коэффициент усиления (КУ) AP B_0 в горизонтальной плоскости; G_{VB_0} – КУ AP B_0 в вертикальной плоскости; G_{HU_0} – КУ AP U_0 в горизонтальной плоскости; G_{VU_0} – КУ AP U_0 в вертикальной плоскости; G_{HU_i} – КУ AP U_i в горизонтальной плоскости; G_{VU_i} – КУ AP U_i в вертикальной плоскости.

Для моделирования КУ AP в горизонтальной плоскости в зависимости от ширины луча ДНА по уровню половинной мощности φ_{3dB} в опорном направлении используется аппроксимация^{3,4}:

$$G_H(\varphi) = -\min[12(\varphi/\varphi_{3dB})^2, G_{SL}],$$

где $G_H(\varphi)$ – КУ AP в дБ в направлении $-180^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ$; $G_{SL} = 20$ дБ – максимальное ослабление КУ AP в боковых лепестках.

Для моделирования КУ AP в вертикальной плоскости в зависимости от ширины луча ДНА по уровню половинной мощности θ_{3dB} в опорном направлении используется аппроксимация^{5,6}:

$$G_V(\theta) = -\min[12(\theta/\theta_{3dB})^2, G_{SL}],$$

где $G_V(\theta)$ – КУ AP в дБ в направлении $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$; $G_{SL} = 20$ дБ – максимальное ослабление КУ AP в боковых лепестках; при механическом наклоне AP на угол θ_{tilt} КУ AP определяется:

$$G_V(\theta) = -\min[12((\theta - \theta_{tilt})/\theta_{3dB})^2, G_{SL}].$$

Совокупный КУ AP в горизонтальной и вертикальной плоскостях определяется выражением:

$$G(\theta) = -\min[-(G_H(\varphi) + G_V(\theta)), G_{SL}].$$

Оценка степени подавления уровня внутрисистемных помех ISR (в дБ) в режиме адаптивного ДО определяется как разность между SIR_D для направленных и SIR_O для ненаправленных (*Omn*) антенн:

$$ISR_{BF} = SIR_D - SIR_O.$$

Имитационная модель оценки помех в СРД 5G

Рассмотрим реализацию формализованной выше математической модели в ИМ. Моделирование производится на плоскости, поэтому в оценке отношения сигнал помеха используется КУ AP в горизонтальной плоскости. Моделирование

³ Report ITU-R M.2135-1. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced. ITU. – 2009.

⁴ Report ITU-R M.2412-0. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. ITU. – 2017.

⁵ См. ссылка 3.

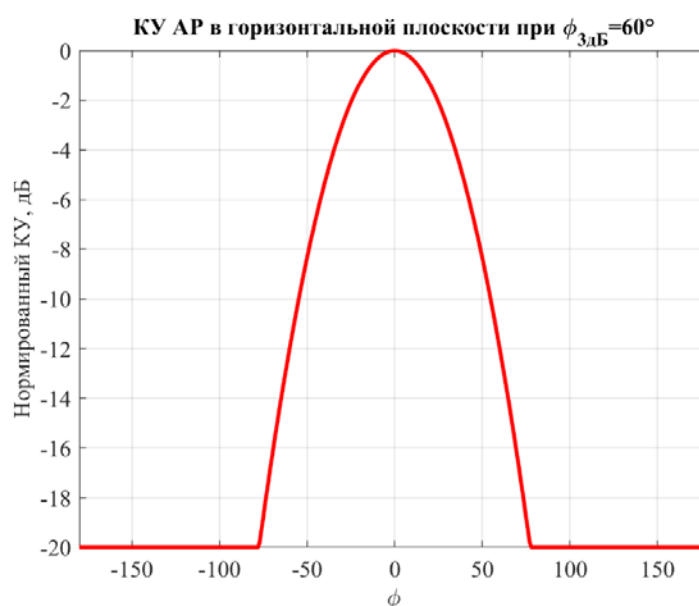
⁶ См. ссылка 4.

начинается с инициализации параметров; параметры ИМ представлены в таблице 1. Пример КУ для ширины ДНА по уровню половинной мощности $\phi_{3dB} = 60^\circ$ представлен на рис. 5.

Таблица 1.

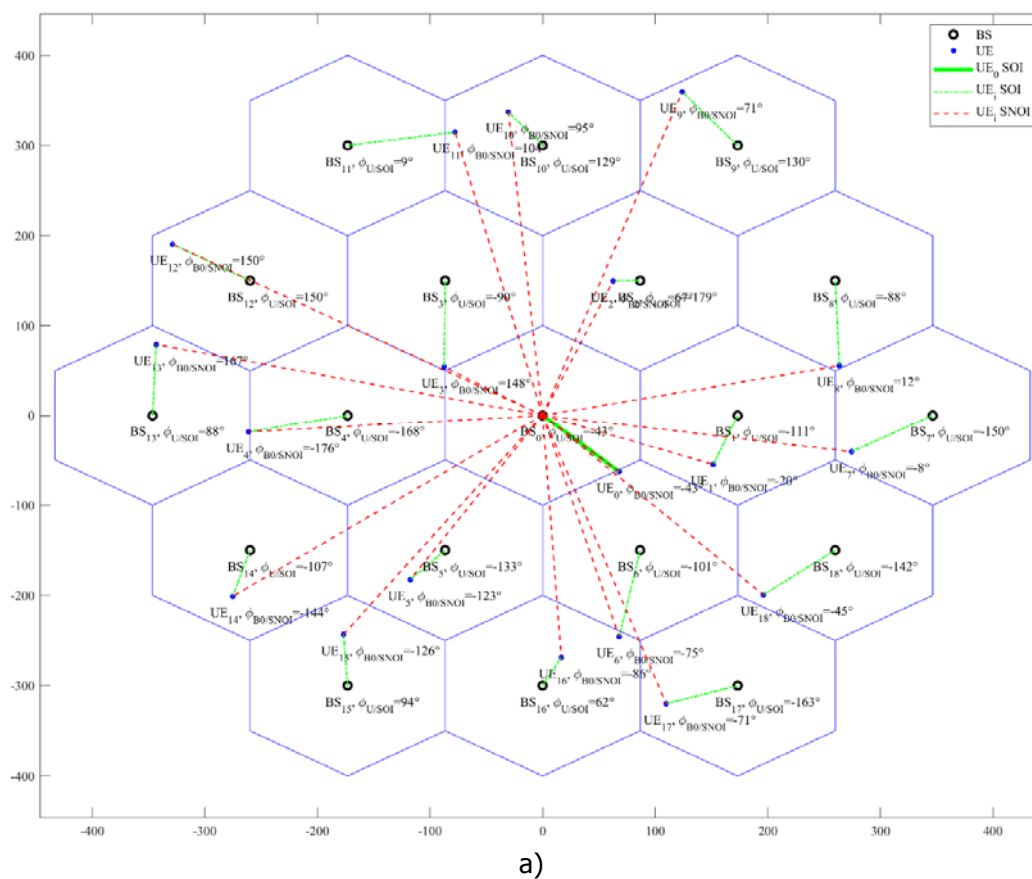
Параметры ИМ для оценки помех в СРД 5G

Параметр	Значение
Число сот	19
Радиус сот	$R = 100$ м
Высота подвеса AP BS	$h_B = 0$ м
Высота подвеса AP UE	$h_U = 0$ м
Территориальный разнос БС	$D_{cl} = \sqrt{3}R$ при $N_{cl} = 1$ $D_{cl} = 3R$ при $N_{cl} = 3$
Параметр потерь PPB (LOS)	$N = 2$
Параметр ослабления в боковых лепестках AP	$G_{SL} = 20$ дБ
Ширина ДНА в горизонтальной плоскости	$\phi_{3dB} = [2^\circ:2^\circ:360^\circ]$

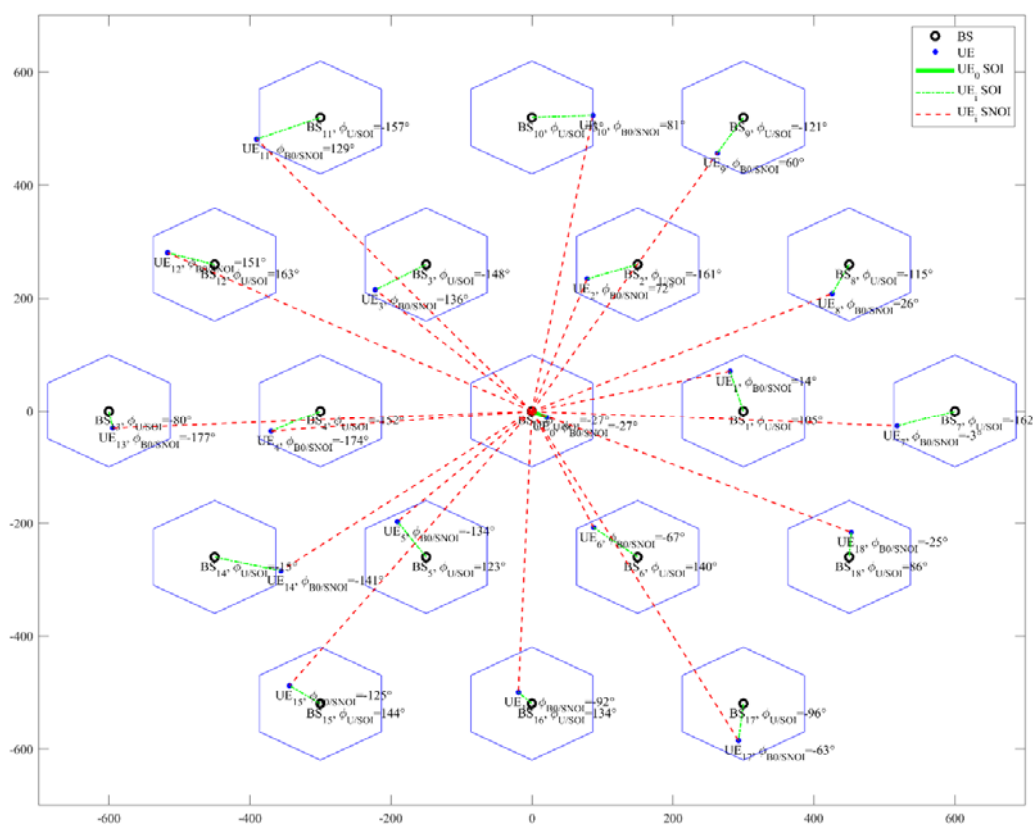
Рис. 5. Модель КУ AP в горизонтальной плоскости при $\phi_{3dB} = 60^\circ$

На рис. 6 представлен сценарий отдельной реализации при оценке помех в ИМ для кластера размера 1 и 3.

Дальность радиопокрытия установлена равной $R = 100$ м; нулевая высота устройств $h_B = h_U = 0$ м моделирует двумерный сценарий (2D) на плоскости. Для получения зависимости уровня подавления помех в ИМ производится усреднение по циклу из 1000 отдельных реализаций; в каждой реализации задается случайное местоположение пользовательских устройств U_i в зоне радиопокрытия каждой БС B_i ; анализ кластера размера 1 и 3 позволяет воспроизвести условия уплотнения приемопередающих устройств. На рис. 7 (см. ниже) представлена зависимость ISR от ширины ДНА БС в горизонтальной плоскости ϕ_{3dB} .



a)



b)

Рис. 6. Сценарий оценки помех в ИМ для кластера размера 1 и 3

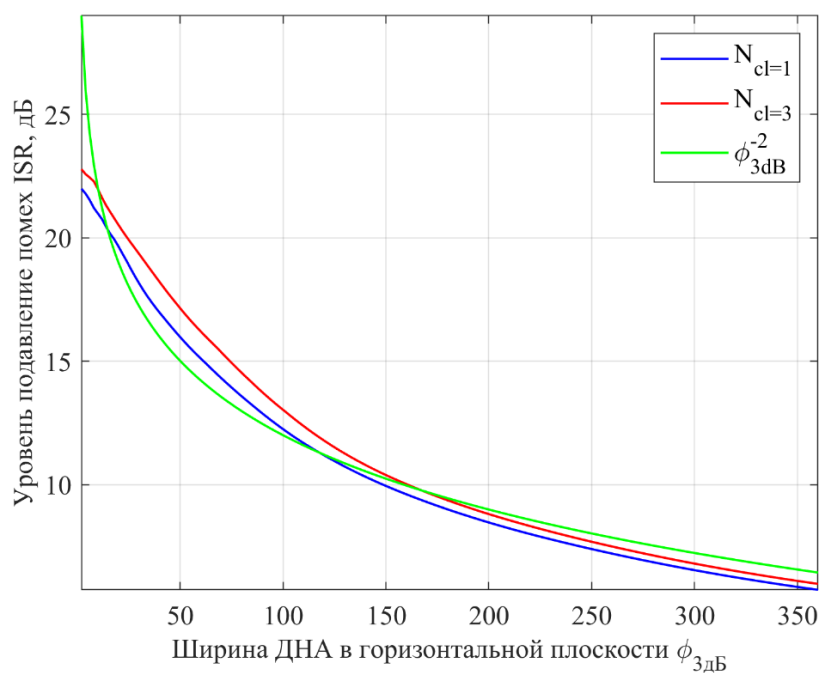
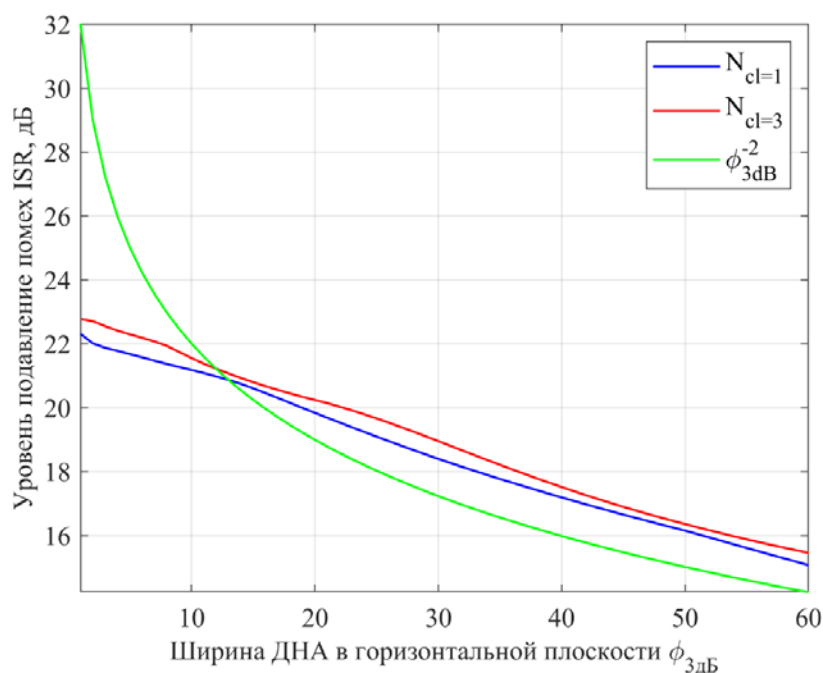
а) $5^\circ \leq \phi_{3дБ} \leq 360^\circ$ б) $2^\circ \leq \phi_{3дБ} \leq 60^\circ$

Рис. 7. Оценка ISR для кластера размера 1 и 3

Анализ графиков на рис. 7 позволяет сделать следующие выводы:

а) сужение ширины ДНА в режиме ДО ожидаемо приводит к повышению уровня подавления помех ISR по сравнению со случаем ненаправленных антенн; при сужении $\phi_{3дБ}$ с 360° до 5° величина ISR достигает более 15 дБ; при сужении $\phi_{3дБ}$ с 60° до 2° величина ISR достигает более 7 дБ;

б) сравнение уровня подавления помех ISR для кластера размера 1 и 3 демонстрирует незначительное превышение ISR для кластера 3 по сравнению

с кластером размера 1, что объясняется увеличением расстоянием между центрами кластеров D_{cl} , с уменьшением D_{cl} повышается уплотнение приемопередающих устройств и, как следствие, незначительно снижаются возможности пространственного уплотнения одновременных передач;

в) для сравнения на графике представлена аппроксимация зависимости $1/(\varphi_{3dB})^2$, которая в некоторой степени подтверждает зависимости, полученные в результате ИМ для значений $\varphi_{3dB} \geq 10^\circ$; при дальнейшем сужении ДНА степень подавления помех ISR, полученная в результате ИМ, больше отклоняется от аппроксимации $1/(\varphi_{3dB})^2$.

Проанализируем далее более подробно зависимость степени подавления помех ISR при узких ДНА $\varphi_{3dB} \geq 10^\circ$ с точки зрения территориального разнесения соседних приемопередающих устройств, а также учитывая реалистичную модель прямоугольной АР.

Математическая модель оценки разнесения соседних устройств в СРД 5G

На рис. 8 представлена модель прямоугольной антенной решетки с равномерным расположением элементов АР на плоскости [24]: M элементов вдоль оси Ox с расстоянием d_x и N элементов вдоль оси Oy с расстоянием d_y .

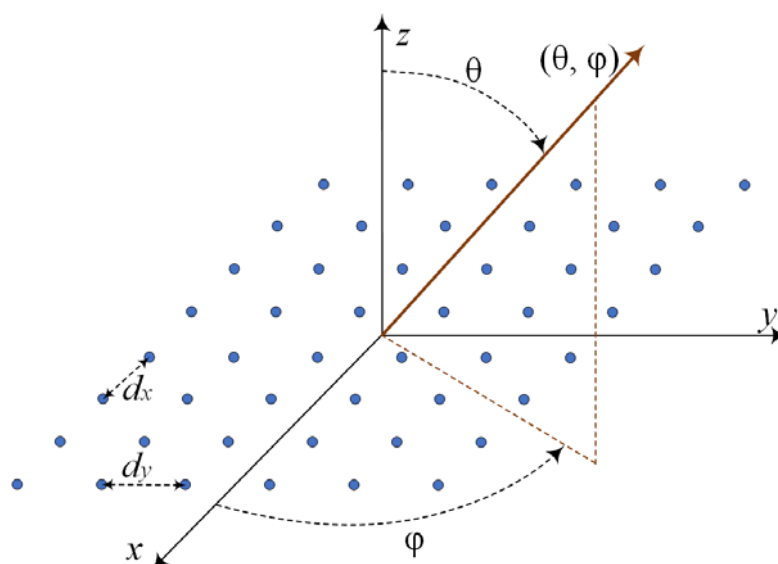


Рис. 8. Модель прямоугольной антенной решетки

Прямоугольные АР получили широкое распространение для устройств СРД 5G благодаря возможности адаптивно формировать ДНА в пространстве по азимуту φ в горизонтальной плоскости и углу места θ в вертикальной плоскости. Пусть пара (φ_0, θ_0) задает опорное направление максимального излучения (максимум ДНА) по азимуту и углу места соответственно, тогда коэффициент направленного действия (КНД) прямоугольной АР $[AF(\theta, \varphi)]_{M \times N}$ с числом элементов $M \times N$, где M и N – четные числа, определяется выражением [25]:

$$[AF(\theta, \varphi)]_{M \times N} = 4 \sum_{m=1}^{M/2} \sum_{n=1}^{N/2} w_{mn} \cos[(2m-1)u] \cos[(2n-1)v],$$

где w_{mn} – амплитуда элемента с индексами $m = 1, \dots, M$ и $n = 1, \dots, N$; а параметры u и v определяются выражениями:

$$u = \frac{\pi d_x}{\lambda} (\sin\theta \cos\varphi - \sin\theta_0 \cos\varphi_0); \quad v = \frac{\pi d_y}{\lambda} (\sin\theta \sin\varphi - \sin\theta_0 \sin\varphi_0);$$

где λ – длина волны. Для одинакового числа элементов прямоугольной АР $M = N$ по осям Ox и Oy при $d_x = d_y = \lambda/2$ для ширины ДНА по уровню половинной мощности в горизонтальной и вертикальной плоскостях НРВW справедлива аппроксимация [26]:

$$HPBW = \frac{1,772}{N - 1} \text{ рад},$$

которая позволяет в первом приближении оценить $\varphi_{3дБ}$ и $\theta_{3дБ}$.

Зная ширину ДНА в горизонтальной $\varphi_{3дБ}$ и вертикальной $\theta_{3дБ}$ плоскостях, а также высоту подвеса h и дальность R радиопокрытия базовой станции, можно в первом приближении оценить требуемый территориальный разнос d_{ss} (*spatial separation*) соседних устройств по уровню половинной мощности луча АР по азимуту $d_{ss}(\varphi_{3дБ})$ и углу места $d_{ss}(\theta_{3дБ})$ (рис. 9):

$$d_{ss}(\varphi_{3дБ}) = 2R \cdot \tan(\varphi_{3дБ}/2);$$

$$d_{ss}(\theta_{3дБ}) = R - h \cdot \tan(\text{atan}(r/h) - \theta_{3дБ}).$$

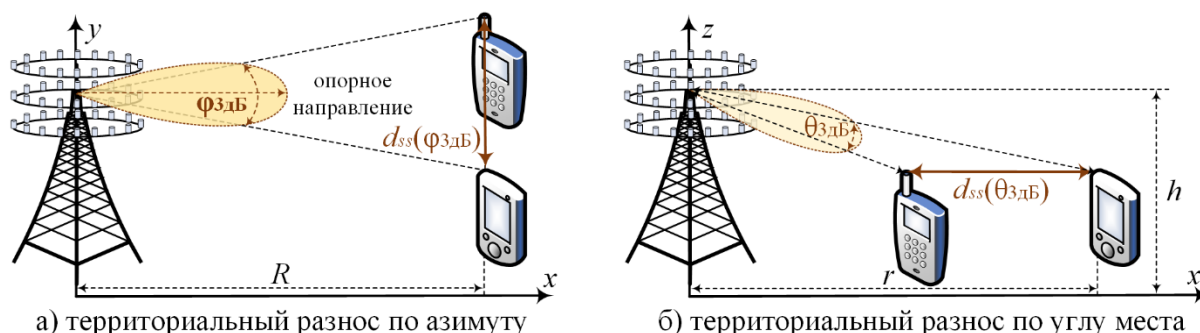


Рис. 9. Оценка территориального разноса по азимуту и углу места

На рис. 10 представлена вычисленная зависимость НРВW от числа элементов прямоугольной АР, а также значения территориального разноса $d_{ss}(\varphi_{3дБ})$ и $d_{ss}(\theta_{3дБ})$ от $\varphi_{3дБ}$ и $\theta_{3дБ}$.

Из анализа графиков на рис. 10 можно сделать следующие выводы в первом приближении:

а) при числе элементов прямоугольной АР равном 64, ширина ДНА в азимуте и углу места может достигать 1° , поэтому далее оценка территориальных разносов d_{ss} производится для трех значений ширины ДНА в горизонтальной ($\varphi_{3дБ} = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ$) и вертикальной ($\theta_{3дБ} = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ$) плоскости;

б) при фиксированной ширине ДНА в горизонтальной и вертикальной плоскости с увеличением дальности радиопокрытия R требуемый территориальный разнос d_{ss} соседних устройств по уровню половинной мощности луча АР увеличивается; при этом d_{ss} для $\theta_{3дБ}$ растет быстрее, чем для $\varphi_{3дБ}$, что объясняется

на порядок меньшей высотой подвеса AP h по сравнению с максимальной дальностью радиопокрытия R ;

в) с уменьшением ширины ДНА по уровню половинной мощности как горизонтальной $\phi_{3\text{дБ}}$, так и в вертикальной $\theta_{3\text{дБ}}$ плоскостях, требуемый территориальный разнос d_{ss} уменьшается;

г) если использовать в качестве нижней границы значение $d_{ss}(\theta_{3\text{дБ}})$, то требуемый территориальный разнос d_{ss} должен быть $d_{ss}(2^\circ) > 0,2R$, $d_{ss}(5^\circ) > 0,4R$ и $d_{ss}(10^\circ) > 0,6R$.

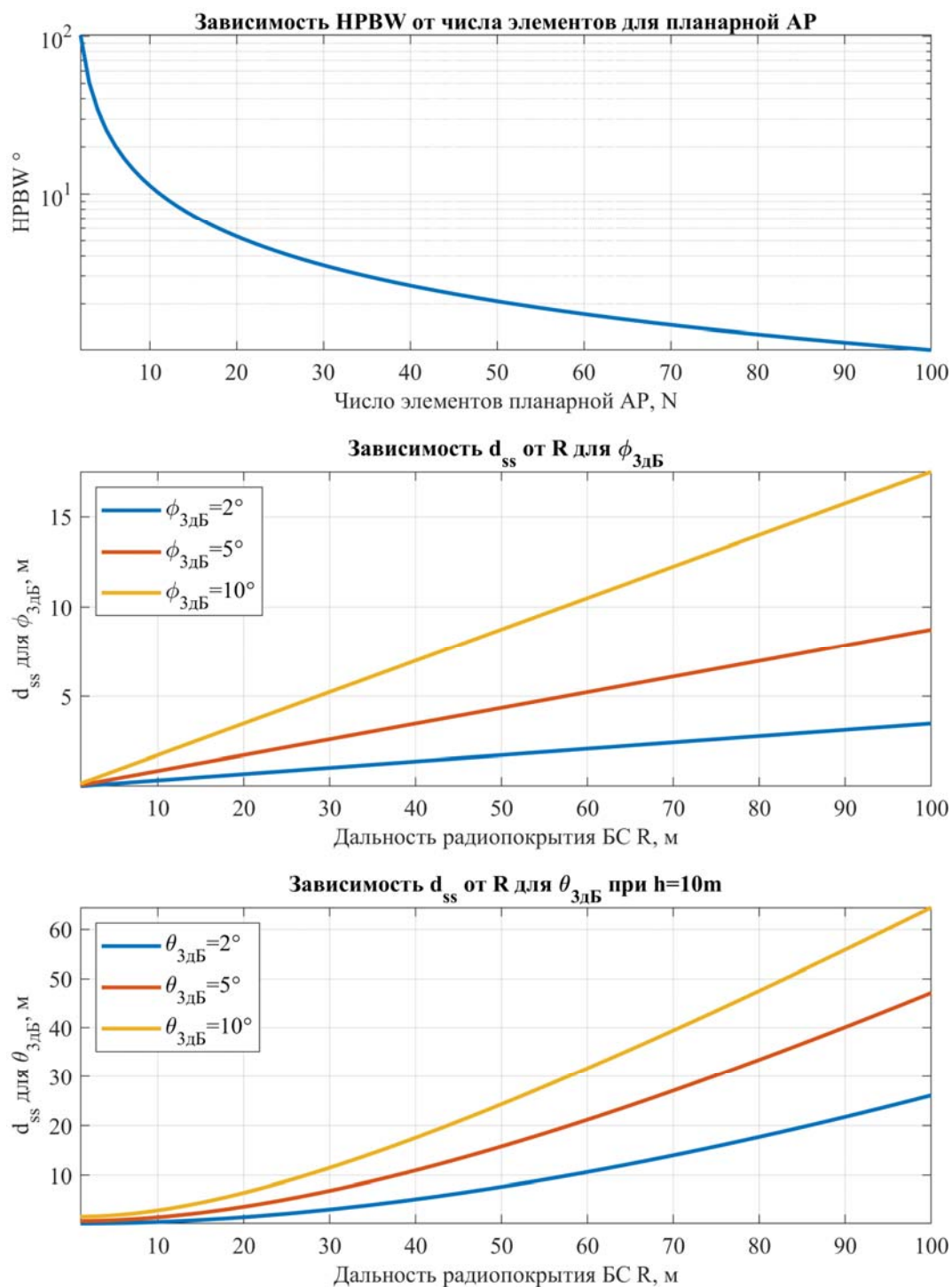


Рис. 10. Зависимость разноса соседних устройств от $\phi_{3\text{дБ}}$ и $\theta_{3\text{дБ}}$

Рассмотрим далее моделирование помех в отдельной радиолинии SNOI и в совокупности радиолиний, образующих CPД 5G.

Имитационная модель оценки разноса соседних устройств в CPД 5G

На рис. 11 представлен сценарий оценки подавления помех в радиолинии SNOI по сравнению с радиолинией SOI: высота подвеса AP БС $h = 10$ м, дальность радиопокрытия БС $R = 20$ м, разнос соседних устройств по углу места $\theta = 10^\circ$. Значения SOI, SNOI и SOI/SNOI для сценария на рис. 11 при трех значениях числа элементов прямоугольной AP представлены в таблице 2.

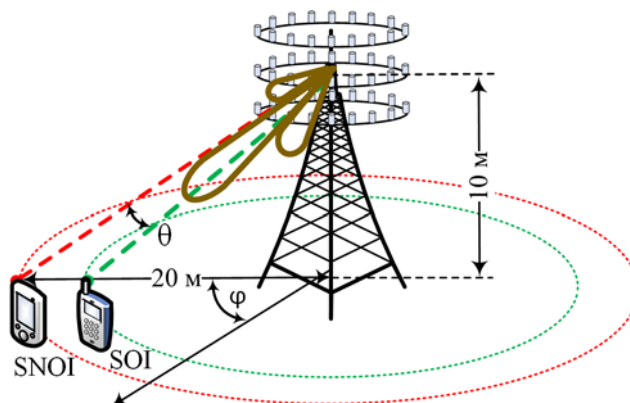


Рис. 11. Подавление помех при разносе устройств по углу места θ

Таблица 2.

SOI, SNOI и SOI/SNOI для сценария на рис. 11

Число элементов AP	SOI, дБ	SNOI, дБ	SOI/SNOI, дБ
16 (4×4)	-5,76	-21,01	15,3
64 (8×8)	-2,145	< -40	> 40
256 (16×16)	0	< -40	> 40

Степень подавления помех SOI/SNOI в радиолинии SNOI по сравнению с радиолинией SOI для сценария на рис. 11 при трех значениях разноса соседних устройств по углу места $\theta = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ и трех значениях числа элементов прямоугольной AP представлена в таблице 3. Пример карты диаграммообразования по азимуту и углу места для AP с числом элементов 256 и сценария разноса соседних устройств по углу места $\theta = 10^\circ$, построенный с использованием инструментария в [25], представлен на рис. 12.

Таблица 3.

Подавление помех SOI/SNOI для сценария на рисунке 11

Число элементов AP	$\theta = 2^\circ$	$\theta = 5^\circ$	$\theta = 10^\circ$
16 (4×4)	1,0	5,1	15,3
64 (8×8)	12,5	> 40	> 40
256 (16×16)	> 40	> 40	> 40

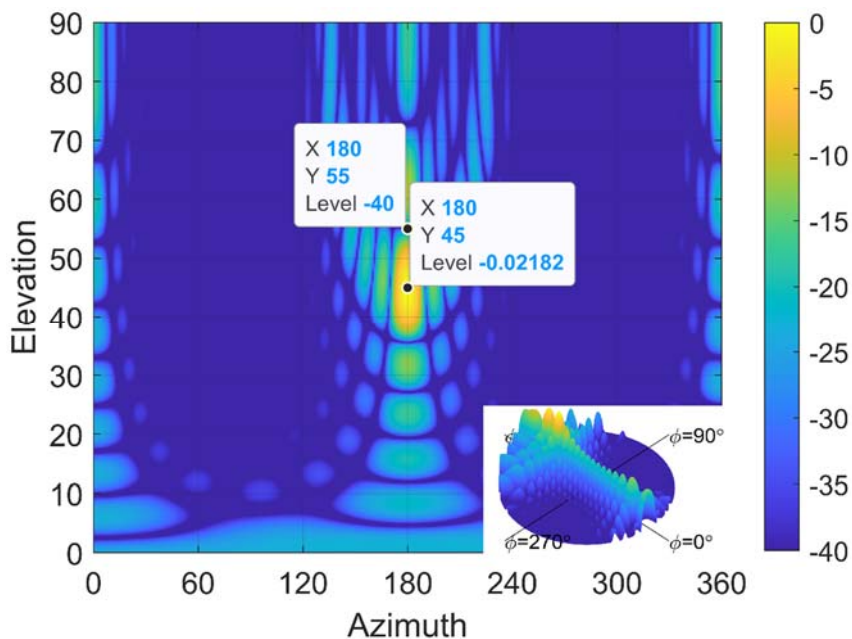


Рис. 12. Карта ДО для прямоугольной AP $N \times N = 256$

Для анализа совокупности радиолиний SOI и SNOI рассмотрим далее сценарий моделирования 19 трехсекторных базовых станций по рекомендации ITU-R M.2135-1⁷, представленный на рис. 13.

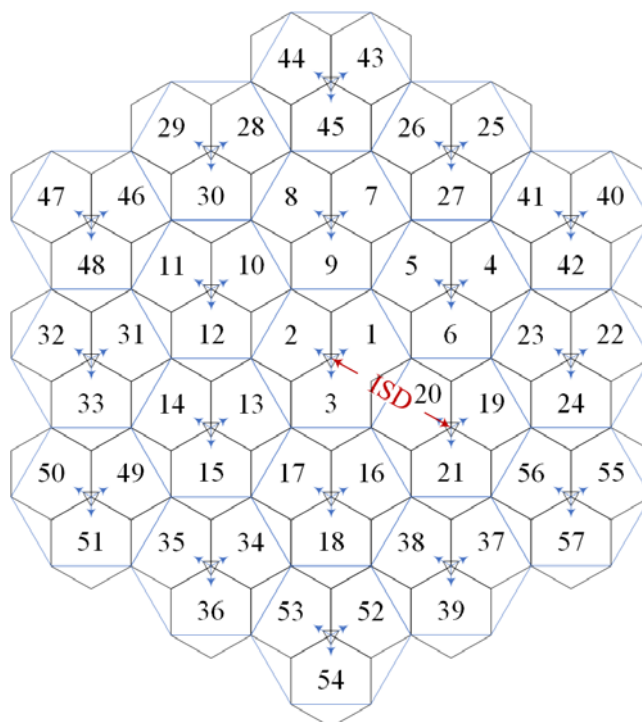


Рис. 13. Гексагональная модель СРД из 19 трехсекторных БС

Параметр ISD (*Inter-Site-Distance*) в ITU-R M.2135-1 представляет собой введенный ранее параметр расстояния между БС с повторяющимися частотами D_{cl} .

⁷ Report ITU-R M.2135-1. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced. ITU. – 2009.

Для имитационного моделирования 19 трехсекторных БС (всего 57 секторов) сначала задается местоположение центральной БС. Возможности пакета расширения Antenna Toolbox СПО Matlab⁸ позволяют при моделировании процесса РРВ использовать цифровую модель местности (ЦММ), поэтому координаты центральной БС задаются широтой и долготой. Относительно центральной БС расставляются остальные базовые станции согласно представленным ранее выражениям с территориальным разносом $ISD = D_{cl}$. Для каждой БС инициализируются по три сектора с азимутами опорных направлений ДНА 30° , 150° и 270° . Затем задается несущая частота f , высота подвеса антенн BS h_B и UE h_U , мощности передатчиков БС P_B , ширина полосы частот W , коэффициент шума приемника NF . Мощность шума P_N приемника UE (в дБ) определяется как:

$$P_N = -174 + 10\lg(W) + NF.$$

КУ ненаправленной антенны UE равен $G_U = 0$ дБи. Для моделирования секторной антенны BS используется описанный ранее подход⁹: инициализируются параметры ширины ДНА по уровню половинной мощности в горизонтальной $\varphi_{здБ}$ и вертикальной $\theta_{здБ}$ плоскостях, а также подавление в боковых лепестках G_{sl} . Для моделирования направленной антенны BS с диаграммообразованием используется пакет расширения Phased Array System Toolbox СПО Matlab¹⁰. На рис. 14 представлены трехмерные КНД для одного элемента и антенной решетки из 64 элементов, полученные с использованием Antenna Toolbox¹¹ и Phased Array System Toolbox¹². Параметры ИМ, построенной с использованием примера¹³, представлены в таблице 4. В качестве координат центральной БС в ЦММ Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010)¹⁴ заданы координаты СПбГУТ.

Для оценки построения карты отношений сигнал/(шум+помехи) SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) в SINR Map for a 5G Urban Macro-Cell Test Environment, The MathWorks, Inc (URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ug/sinr-map-for-a-5g-urban-micro-cell-test-environment.html>) используется следующее опущение: каждая элементарная площадка пространственного разрешения (ЭППР) в зоне моделирования сервируется той базовой станцией, принимаемый сигнал RSS (*Received Signal Strength*) которой в ней максимален; остальные базовые станции оказываются источниками внутрисистемных помех; распределение помех в диапазоне от -5 до 20 дБ иллюстрируется цветовой картой. На рис. 15 представлены карты SINR для сценария на рис. 13 при уменьшении расстояния ISD для оценки влияния уплотнения устройств.

⁸ Antenna Toolbox, The MathWorks, Inc. URL: <https://www.mathworks.com/products/antenna.html> (дата обращения 27.12.2020).

⁹ Report ITU-R M.2135-1. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced. ITU. – 2009.

¹⁰ Phased Array System Toolbox, The MathWorks, Inc. URL: <https://www.mathworks.com/products/phased-array.html> (дата обращения 27.12.2020).

¹¹ См. ссылка 8.

¹² См. ссылка 10.

¹³ SINR Map for a 5G Urban Macro-Cell Test Environment, The MathWorks, Inc. URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/ug/sinr-map-for-a-5g-urban-micro-cell-test-environment.html> (дата обращения 07.01.2021).

¹⁴ Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010). URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/eros/coastal-changes-and-impacts/gmted2010> (дата обращения 07.01.2021).

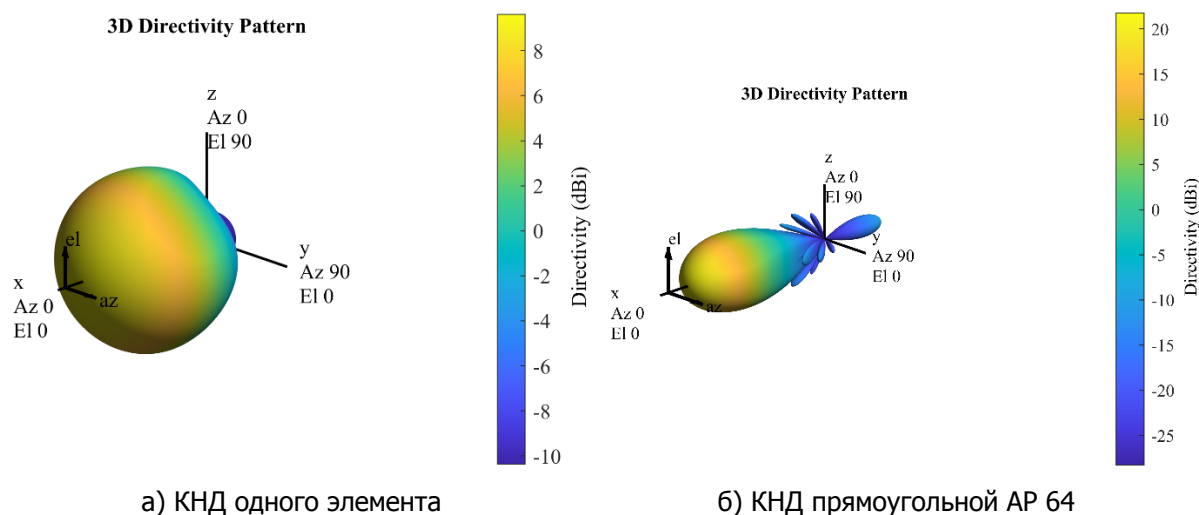
Рис. 14. 3D модель КНД одного элемента и AP $N \times N = 64$

Таблица 4.

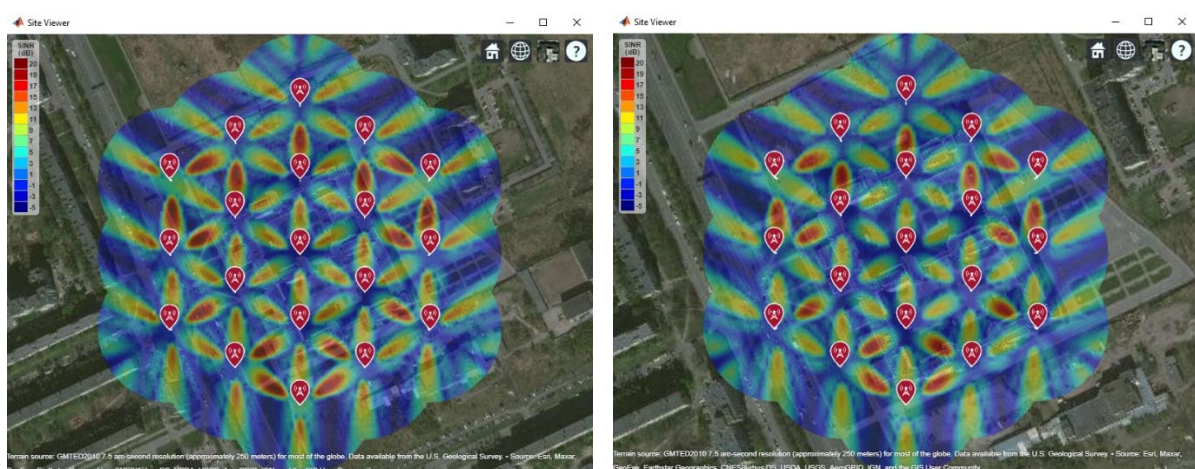
Параметры ИМ оценки разноразмерных устройств в СРД 5G

Параметр	Значение
Широта центральной БС	'Latitude' = 59.902885
Долгота центральной БС	'Longitude', 30.488661
Территориальный разнос БС ISD = D_{cl}	100, 80, 60, 40, 20 м
Азимуты опорных направлений секторов	30°, 150° и 270°
Высота подвеса антенн BS, h_B	10 м
Высота подвеса антенн UE, h_U	1,5 м
Мощность передатчика BS, P_B	100 мВт (20 дБм)
Ширина полосы частот, W	20 МГц
Несущая частота, f	4 ГГц
Коэффициент шума приемника UE, NF	7 дБ
Ширина ДНА BS в горизонтальной плоскости, $\varphi_{зДБ}$	65°
Ширина ДНА BS в горизонтальной плоскости, $\theta_{зДБ}$	65°
Подавление в боковых лепестках G_{sl}	20 дБ
Параметры AP, $N \times N$	8×8
Расстояние между элементами AP BS, dx, dy	$dx = dy = \lambda/2$
Угол наклона AP BS, θ_{tilt}	12°
Параметр потерь PPB (LOS), η	2



а) Omni, ISD = 100 м

б) Beamforming, ISD = 100 м



в) Beamforming, ISD = 80 м

г) Beamforming, ISD = 60 м



д) Beamforming, ISD = 40 м

е) Beamforming, ISD = 20 м

Рис. 15. Карта SINR для сценария СРД 5G

Из визуального анализа карт SINR на рис. 15 можно сделать следующие выводы:

а) SINR для БС в режиме ДО в среднем выше, чем отношение сигнал/(шум+помехи) ОСШП для режима ненаправленной радиосвязи; в режиме ДО

контуры областей положительных SINR определяются ДНА и азимутами опорных направлений секторов;

б) при уменьшении расстояния ISD между соседними БС со 100 до 20 м ОСШП в среднем уменьшается, а области положительных SINR пропадают, что является следствием уплотнения устройств при фиксированной мощности передатчиков БС;

в) для сектора 270° центральной БС при ISD = 100 м оценка пространственного разноса по критерию положительного ОСШП составляет порядка $d_{ss} \sim 20$ м; при уменьшении ISD d_{ss} уменьшается; при ISD=40 м SINR по азимуту 270° оказывается уже меньше нуля. Пример оценки территориального разноса представлен на рис. 16.

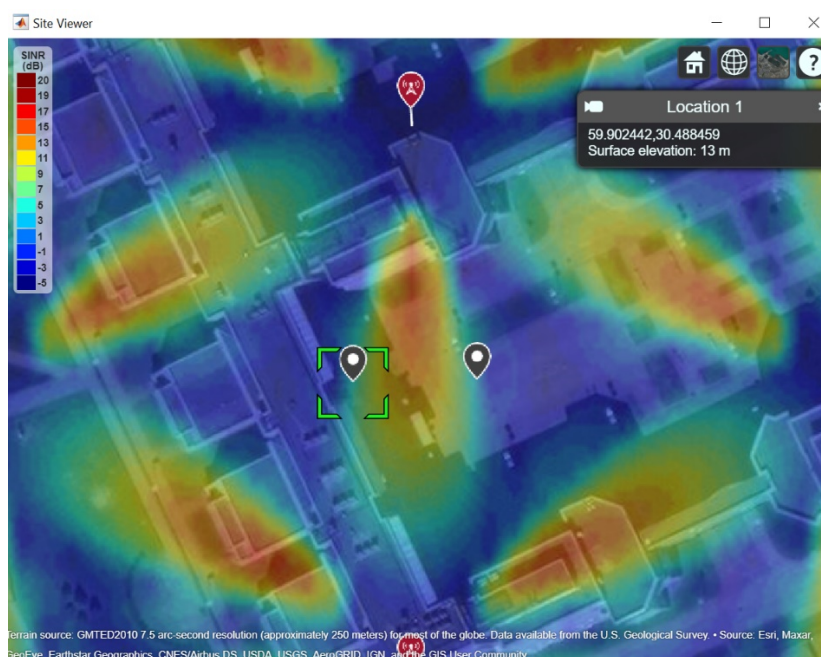


Рис. 16. Пример оценки территориального разноса

Для оценки территориального разноса использовались маркеры положительного ОСШП по ширине ДНА сектора 270° центральной БС; полученные значения широты и долготы двух маркеров затем использовались для вычисления d_{ss} с помощью встроенной функции Matlab $distance(lat1, lon1, lat2, lon2)$. Результаты оценки d_{ss} по положительным значениям ОСШП представлены в таблице 5.

Таблица 5.

Оценка территориального разноса по SINR > 0 в СРД 5G

ISD	d_{ss}
100	23,7
80	20,4
60	14,9

Сравнивая результаты в таблице 5 с полученной ранее оценкой в первом приближении $d_{ss}(2^\circ) > 0,2R$, можно сделать вывод, согласно которому территориальный разнос соседних устройств должен составлять порядка 10–20 % от дальности радиопокрытия.

Заключение

В настоящей работе формализована математическая модель и сценарий для оценки зависимости уровня помех от ширины луча ДНА приемопередающего устройства в СРД 5G. Результаты ИМ СРД на основе 19 БС с параметризацией коэффициента усиления антенной решетки шириной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости показали, что при направлении луча базовой станции на пользовательское устройство и его сужении с 360° до 5° уровень внутрисистемных помех уменьшается на 15 дБ по сравнению со случаем ненаправленных антенн. Также в настоящей работе формализована математическая модель оценки территориального разноса соседних устройств в первом приближении от ширины луча адаптивно формируемой ДНА в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Результаты ИМ СРД на основе 19 трехсекторных БС с прямоугольными антенными решетками из 64 элементов показали существенное снижение уровня помех по сравнению со случаем ненаправленных антенн и для получения зон положительного отношения сигнал/помеха подтвердили необходимость территориального разноса соседних устройств на величину в 10–20% от дальности радиопокрытия.

Литература

1. Бородин А. С., Кучерявый А. Е. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики // *Электросвязь*. 2017. № 5. С. 45–49.
2. Тонких Е. В., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Анализ беспроводной сети интернета вещей высокой плотности // *Электросвязь*. 2020. № 1. С. 44–48.
3. Kamel M., Hamouda W., Youssef A. Ultra-Dense Networks: A Survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. vol. 18. no. 4. pp. 2522–2545.
4. Baldemair R. et al. Ultra-dense networks in millimeter-wave frequencies // *IEEE Communications Magazine*. 2015. vol. 53. no. 1. pp. 202–208.
5. Rachad J., Nasri R., Decreusefond L. Interference analysis in dynamic tdd system combined or not with cell clustering scheme // *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE. 2018. pp. 1–5.
6. Halbauer H., Saur S., Koppenborg J., Hoek C. Interference avoidance with dynamic vertical beamsteering in real deployments // *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. Paris. 2012. pp. 294–299.
7. Bai L., Li T., Xiao Z., Choi J. Performance Analysis for SDMA mmWave Systems: Using an Approximate Closed-Form Solution of Downlink Sum-Rate // *IEEE Access*. 2017. vol. 5. pp. 15641–15649.
8. Rachad J., Nasri R., Decreusefond L. A 3D Beamforming Scheme Based on The Spatial Distribution of User Locations // *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Istanbul, Turkey, 2019, pp. 1–7.
9. Razavizadeh S. M., Ahn M., Lee I. Three-Dimensional Beamforming: A new enabling technology for 5G wireless networks // *in IEEE Signal Processing Magazine*. 2014. vol. 31. no. 6. pp. 94–101.
10. Lee C., Lee M., Huang C., Lee T. Sectorization with beam pattern design using 3D beamforming techniques // *2013 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference*. Kaohsiung. 2013. pp. 1–5.
11. Despoisse T., Ghiotto A., Busson P., Deltimple N. A Comparison of Beamforming Schemes for 5G mm-Wave Small Cell Transmitters // *2018 16th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS)*. Montreal. QC. 2018. pp. 6–9.

12. Orikumhi I., Kang J., Park C., Yang J., Kim S. Location-Aware Coordinated Beam Alignment in mmWave Communication // 2018 56th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Monticello, IL, USA, 2018, pp. 386–390.
13. Abdelreheem A., Mohamed E. M., Esmail H. Millimeter wave location-based beamforming using compressive sensing // 2016 28th International Conference on Microelectronics (ICM). Giza. 2016. pp. 213–216.
14. Zhou B., Liu A., Lau V. Successive Localization and Beamforming in 5G mmWave MIMO Communication Systems // IEEE Transactions on Signal Processing. 2019. Vol. 67. No. 6. pp. 1620–1635.
15. Koppenborg J., Halbauer H., Saur S., Hoek C. 3D beamforming trials with an active antenna array // 2012 International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA), Dresden, 2012. pp. 110–114.
16. Wookbong L., Lee S., Kong H.-B., Lee I. 3D beamforming designs for Single User MISO systems // 2013 IEEE Global Communications Conference.
17. Chen J. C., Yao L., Hudson R. E. Source localization and beamforming // IEEE Signal Processing Magazine. 2002. vol. 19. no. 2. pp. 30–39.
18. Kela P. et al. Location Based Beamforming in 5G Ultra-Dense Networks // 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Montreal. QC. 2016. pp. 1–7.
19. Maiberger R., Ezri D., Erlihson M. Location based beamforming // 2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. Eliat. 2010. pp. 184–187.
20. Roth J. D., Tummala M., McEachen J. C. Fundamental Implications for Location Accuracy in Ultra-Dense 5G Cellular // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. vol. 68. №. 2. P. 1784–1795.
21. Roth J. D., Tummala M., McEachen J. C. Efficient System Geolocation Architecture in Next-Generation Cellular Networks // IEEE Systems Journal. 2018. vol. 12. №. 4. P. 3414–3425.
22. Nasri R., Jaziri A. Analytical Tractability of Hexagonal Network Model With Random User Location // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2016. vol. 15. no. 5. pp. 3768–3780.
23. Маковеева М. М., Шинаков Ю. С. Системы связи с подвижными объектами: учеб. пособие для вузов. – Москва: Радио и связь, 2002. – 440 с.
24. Harada H., Prasad R. Simulation and software radio for mobile communications. Artech House, 2002. 448 P.
25. Balanis C. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th Ed. Wiley, 2016. 1104 P.
26. Mailloux R. J. Phased Array Antenna Handbook. 3rd Ed. Artech House. 2017. 691 P.

References

1. Borodin A. S., Koucheryavy A. E. Fifth generation networks as a base to the digital economy // *Electrosvyaz*. 2017. No 5. pp. 45–49.
2. Tonkikh E. V., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Analysis of Wireless High-Density Iot Network // *Electrosvyaz*. 2020. No 1. pp. 44–48.
3. Kamel M., Hamouda W., Youssef A. Ultra-Dense Networks: A Survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. vol. 18. no. 4. pp. 2522–2545.
4. Baldemair R. et al. Ultra-dense networks in millimeter-wave frequencies // *IEEE Communications Magazine*. 2015. Vol. 53. No. 1. pp. 202–208.
5. Rachad J., Nasri R., Decreusefond L. Interference analysis in dynamic tdd system combined or not with cell clustering scheme // 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE. 2018. pp. 1–5.
6. Halbauer H., Saur S., Koppenborg J., Hoek C. Interference avoidance with dynamic vertical beamsteering in real deployments // 2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). Paris. 2012. pp. 294–299.
7. Bai L., Li T., Xiao Z., Choi J. Performance Analysis for SDMA mmWave Systems: Using an Approximate Closed-Form Solution of Downlink Sum-Rate // *IEEE Access*. 2017. vol. 5. pp. 15641–15649.
8. Rachad J., Nasri R., Decreusefond L. A 3D Beamforming Scheme Based on The Spatial Distribution of User Locations // 2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 1–7.
9. Razavizadeh S. M., Ahn M., Lee I. Three-Dimensional Beamforming: A new enabling technology for 5G wireless networks // in *IEEE Signal Processing Magazine*. 2014. vol. 31. no. 6. pp. 94–101.

10. Lee C., Lee M., Huang C., Lee T. Sectorization with beam pattern design using 3D beamforming techniques // 2013 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference. Kaohsiung. 2013. pp. 1–5.
11. Despoisse T., Ghiotto A., Busson P., Deltimple N. A Comparison of Beamforming Schemes for 5G mm-Wave Small Cell Transmitters // 2018 16th IEEE International New Circuits and Systems Conference (NEWCAS). Montreal. QC. 2018. pp. 6–9.
12. Orikumhi I., Kang J., Park C., Yang J., Kim S. Location-Aware Coordinated Beam Alignment in mmWave Communication // 2018 56th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Monticello, IL, USA, 2018, pp. 386–390.
13. Abdelreheem A., Mohamed E. M., Esmail H. Millimeter wave location-based beamforming using compressive sensing // 2016 28th International Conference on Microelectronics (ICM). Giza. 2016. pp. 213–216.
14. Zhou B., Liu A., Lau V. Successive Localization and Beamforming in 5G mmWave MIMO Communication Systems // IEEE Transactions on Signal Processing. 2019. vol. 67. no. 6. pp. 1620–1635.
15. Koppenborg J., Halbauer H., Saur S., Hoek C. 3D beamforming trials with an active antenna array // 2012 International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA), Dresden, 2012. pp. 110–114.
16. Wookbong L., Lee S., Kong H.-B., Lee I. 3D beamforming designs for Single User MISO systems // 2013 IEEE Global Communications Conference.
17. Chen J. C., Yao L., Hudson R. E. Source localization and beamforming // IEEE Signal Processing Magazine. 2002. vol. 19. no. 2. pp. 30–39.
18. Kela P. et al. Location Based Beamforming in 5G Ultra-Dense Networks // 2016 IEEE 84th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall). Montreal. QC. 2016. pp. 1–7.
19. Maiberger R., Ezri D., Erlihson M. Location based beamforming // 2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel. Eliat. 2010. pp. 184–187.
20. Roth J. D., Tummala M., McEachen J. C. Fundamental Implications for Location Accuracy in Ultra-Dense 5G Cellular // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2019. vol. 68. №. 2. P. 1784–1795.
21. Roth J. D., Tummala M., McEachen J. C. Efficient System Geolocation Architecture in Next-Generation Cellular Networks // IEEE Systems Journal. 2018. vol. 12. №. 4. P. 3414–3425.
22. Nasri R., Jaziri A. Analytical Tractability of Hexagonal Network Model With Random User Location // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2016. vol. 15. no. 5. pp. 3768–3780.
23. Makoveyeva M. M., Shinakov Yu. S. Sistemy svyazi s podvizhnymi obyektami: ucheb. posobiye dlya vuzov. – Moskva: Radio i svyaz. 2002. – 440 s.
24. Harada H., Prasad R. Simulation and software radio for mobile communications. Artech House, 2002. 448 P.
25. Balanis C. Antenna Theory: Analysis and Design. 4th Ed. Wiley, 2016. 1104 P.
26. Mailloux R. J. Phased Array Antenna Handbook. 3rd Ed. Artech House. 2017. 691 P.

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