

МОДЕЛИ ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЯ в сверхплотных сетях радиодоступа 5G

Часть 1. Оценка помех

Г.Фокин, к.т.н., доцент СПбГУТ
им. проф. М.А.Бонч-Бруевича / grihafokin@gmail.com

УДК 621.396.9, DOI: 10.22184/2070-8963.2021.95.3.66.73

Для близко расположенных приемопередающих устройств сверхплотных сетей радиодоступа пятого и последующих поколений характерен неприемлемо высокий уровень внутрисистемных помех, которые в сетях предыдущих поколений с частотно-временным разделением каналов компенсировались с помощью частотно-территориального планирования. В настоящем исследовании выполняется оценка компенсации внутрисистемных помех устройств, работающих в общем радиоканале с диаграммообразованием, средствами математического и имитационного моделирования с использованием моделей кластера, уменьшая размер которого можно воспроизвести эффект уплотнения устройств сети радиодоступа пятого и последующих поколений. Результаты моделирования подтверждают возможность подавления помех до 15 дБ при сужении ширины диаграмм направленности антенн (ДНА) устройств с 360° до 5°.

ВВЕДЕНИЕ

Тенденция построения перспективных гетерогенных сетей радиодоступа (СРД) пятого и последующих поколений заключается в повышении плотности базовых станций и пользовательских устройств. Концепция уплотнения устройств на уровне радиодоступа предусматривает переход в диапазон миллиметровых волн (ММВ) mmWave и совершенствование радиоинтерфейса, особенно в части развития многоантенных систем massive MIMO с возможностью адаптивного диаграммообразования. Ожидается, что сети радиодоступа пятого и последующих поколений раскроют потенциал формирования узких лучей при работе на прием и передачу не только в стационарных базовых станциях, но и в подвижных портативных пользовательских устройствах. И тогда наконец удастся реализовать концепцию множественного доступа

с пространственным уплотнением одновременных передач SDMA (Space Division Multiple Access).

Для сверхплотной сети радиодоступа (СРД) UDN (Ultra-Dense Network) характерна высокая плотность территориального и/или пространственного распределения базовых станций BS (Base Station) и подвижных пользовательских устройств UE (User Equipment) – до одного устройства на 1 м² [1]. Следствием этого, с точки зрения организации радиосвязи, являются высокая вероятность наличия прямой видимости LOS (Line Of Sight) в радиолиниях BS-UE и/или UE-UE на расстоянии в несколько десятков метров [2], а также высокий уровень внутрисистемных помех из-за близкого расположения одновременно работающих приемопередающих устройств [3].

Пространственное уплотнение одновременных передач и множественный доступ

с пространственным мультиплексированием SDMA [4] в диапазоне миллиметровых волн (MMB) реализуемы благодаря использованию трехмерного диаграммообразования (ДО) 3D Beamforming (3D BF) [5] в радиолиниях "вниз" (BS→UE) и "вверх" UL (UN→BS), что в последние годы наблюдается из-за распространения многоэлементных антенных решеток (АР) в устройствах UE с переходом в диапазон MMB mmWave.

Компенсация внутрисистемных помех и уплотнение одновременных передач в сверхплотных СРД 5G достигаются посредством адаптивного формирования диаграмм направленности антенн полезных и мешающих сигналов. Пространственная селекция сигналов при работе на передачу и прием в заданном направлении выполняется следующим образом: для потенциальных источников внутрисистемных помех SNOI (Signal No Of Interest) формируются нули ДНА в соответствующих направлениях, а для полезного сигнала SOI (Signal Of Interest) – ДНА с максимальным усилением.

Условием диаграммообразования в СРД с провалами ДНА в направлении 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 (Angle/Direction of Arrival) сигналов SOI/SNOI с последующим диаграммообразованием на прием и передачу в зарубежных источниках называется диаграммообразованием на основе позиционирования LAB (Location Aware Beamforming) [6].

Анализ степени подавления внутрисистемных помех ISR (Interference Suppression Rate) за счет адаптивного ДО при случайном распределении устройств показывает, что при сужении ширины ДНА по уровню половинной мощности (минус 3 дБ) в вертикальной $\theta_{зdB}$ с 32° до 8° и горизонтальной $\phi_{зdB}$ с 65° до 8° плоскостях приводит к существенному повышению радиопокрытия с 66 до 99% [3].

Задача настоящей работы – установить зависимость подавления внутрисистемных помех $ISR(\phi_{зdB})$ от ширины ДНА в горизонтальной плоскости для общепринятой в сотовых сетях подвижной радиосвязи модели территориального распределения устройств согласно гексагональной решетке на плоскости. Для этого приводятся особенности диаграммообразования с точки зрения отдельной радиостанции пятого поколения, формализуется сценарий оценки помех в сверхплотной СРД 5G и реализуется имитационная модель (ИМ), позволяющая установить зависимость $ISR(\phi_{зdB})$.

ОСОБЕННОСТИ ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЯ РАДИОСТАНЦИИ 5G

Адаптивное ДО – один из основных инструментов радиоинтерфейса СРД 5G – включает процедуры формирования и управления лучом, протоколы обучения АР и методы определения угла/направления прихода сигнала AOA/DOA. Формирование и адаптивное управление лучом с использованием различных конфигураций АР, алгоритмов весовой обработки можно реализовать в аналоговом, цифровом и гибридном виде. Особенность схемотехники приемопередающих радиостанций с ДО – наличие наряду с приемным сегментом аналогичной по составу передающей подсистемы и общей для них АР. Цифровой передающий сегмент АР, идентичный приемному с точностью до замены в нем аналого-цифрового преобразователя (АЦП) на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), характеризуется инверсией алгоритмов пространственной обработки сигналов (ПОС). Кроме того, различия в реализации аналогового сегмента передающей системы обусловлены необходимостью усиления сигналов по мощности, а также преобразования частоты (ПЧ) и фильтрации побочных излучений (рис.1) [7].

Аппаратная часть радиоприемника включает в себя маломощный усилитель (МШУ) вместе с входным полосовым фильтром и АЦП, после которого сигнал в цифровом виде поступает в блок цифровой обработки сигналов (ЦОС) для пространственной весовой обработки: с коэффициентами w_i при приеме и v_i при передаче, где $i = 1, \dots, N$ – индекс элемента АР. Аппаратная часть радиопередатчика состоит из ЦАП, усилителя мощности (УМ) с выходным фильтром усиливаемого сигнала. В приемопередатчике используют однократное аппаратное преобразование частоты: при приеме с радиочастоты RF (Radio Frequency) в основную полосу информационных частот ВВ (Baseband); при передаче с RF в ВВ.

Пространственная обработка сигналов (ПОС) в структуре радиостанции (рис.1) с ДО осуществляется в основной полосе частот ВВ в цифровом виде с применением умножения на коэффициенты w_i и v_i . При аналоговом ДО коэффициенты применяются уже к аналоговому сигналу на радиочастоте RF. Цифровое ДО – эффективнее, но и сложнее с точки зрения аппаратной реализации; аналоговое диаграммообразование проще в аппаратной реализации, однако отличается меньшей гибкостью в формировании и управлении лучом. Гибридный подход сочетает преимущества формирования узких лучей и применения аналоговых фазовращателей на радиочастоте RF с гибкостью цифрового

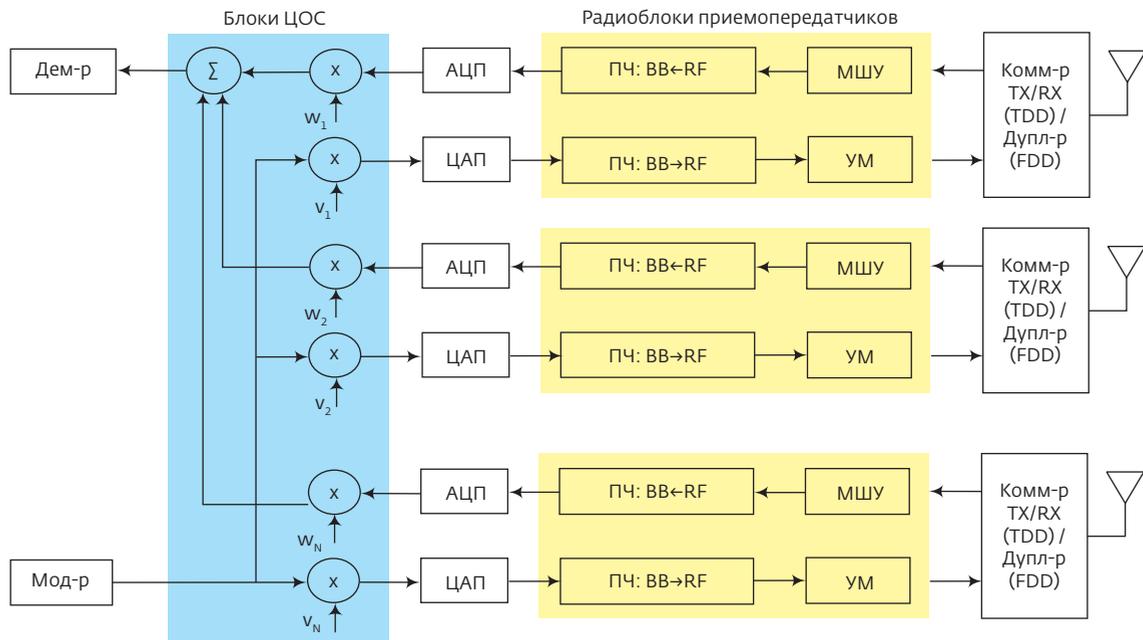


Рис.1. Структура приемопередающей станции с цифровым ДО

диаграммообразования. При ДО целесообразно использовать узкую ДНА для обмена данными и более широкую при обмене сигналами управления [8].

Протоколы обучения AP при адаптивном ДО, призванные обеспечить предварительное выравнивание лучей передающей и приемной радиостанций, – характерная особенность направленной радиосвязи. Для выравнивания лучей протоколы обучения могут использовать узкополосные пилотные сигналы [7, 8]. Процедура обучения заключается в периодическом анализе обучающих последовательностей, которые должны передаваться и приниматься не направленно. С учетом возможного децентрализованного функционирования радиостанций в составе радиосети, их мобильности реализация совокупного диаграммообразования с провалами в направлениях SNOI и максимумами в направлении SOI представляется нетривиальной задачей. Для адаптивного ДО передатчика и приемника в режиме установления связи необходимо, чтобы радиостанция-передатчик определила вначале угловое расположение радиостанции-приемника – зафиксировала угол прихода сигнала АОА. Определяется АОА в ходе математической обработки комплексного вектора

пространственно-временных отсчетов сигнала на выходах АЦП $x(k) = [x_1(k), \dots, x_N(k)]^T$ и выходного сигнала $y(k) = w^H(k-1)x(k)$, где $w(k) = [w_1(k), \dots, w_N(k)]^T$ – векторы комплексных весовых коэффициентов, k – индекс дискретного времени, верхние индексы T и H обозначают транспонирование и эрмитово сопряжение векторов соответственно. После определения АОА, когда передатчику известно угловое расположение приемника, а приемнику – угловое расположение передатчика, сеанс связи на основе ДО может быть осуществлен с выравниванием лучей и усилением на передающей и приемной сторонах. Вычисление АОА/DOA наряду с протоколами обучения – неотъемлемая процедура адаптивного ДО.

На рис.2 проиллюстрировано совместное определение направления прихода сигнала и адаптивное ДО на примере приемной радиостанции. Обработка принятых сигналов выполняется в блоке ЦОС пространственной обработки AP и включает в себя две процедуры: а) определение угла/направления прихода (АОА/DOA) сигнала/сигналов; б) адаптивное формирование ДНА. Возможности адаптивного ДО, помимо технических особенностей реализации, ограничены информированностью радиостанции-передатчика

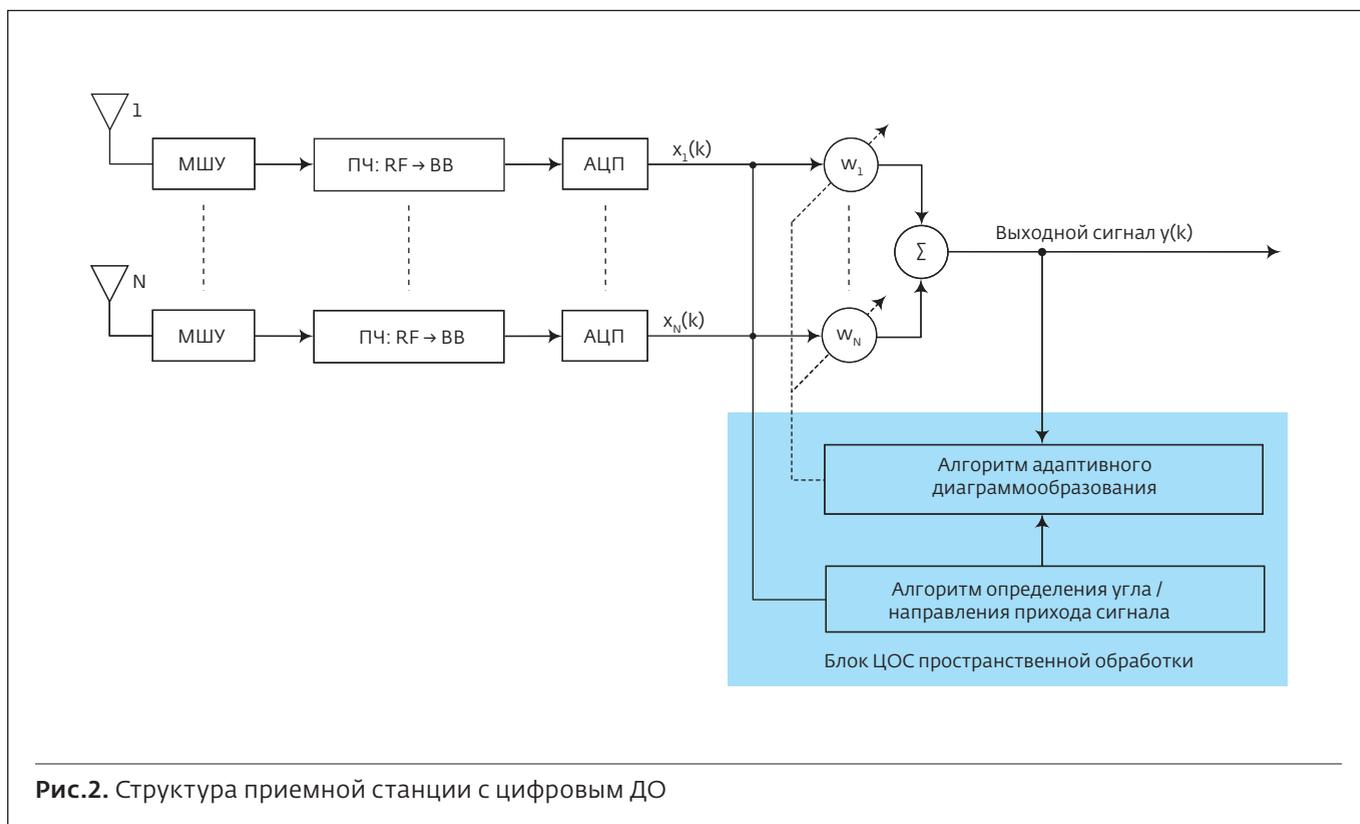


Рис.2. Структура приемной станции с цифровым ДО

и радиостанции-приемника об обстановке в радиоканале CSI (Channel State Information), которая включает в себя текущие передачи потенциальных источников внутрисистемных помех. На их основе можно определить углы прихода мешающих сигналов SNOI и сформировать в соответствующих направлениях провалы ДНА при работе на передачу и на прием. В случае, когда радиостанции-передатчику и радиостанции-приемнику известны только относительные угловые расположения друг друга, они могут сформировать ДНА с максимальным усилением в направлении приема/передачи полезного сигнала SOI. ДО с провалами в направлении SNOI и максимумами в направлении SOI повышают вероятность успешного радиоприема в общем радиоканале.

СЦЕНАРИЙ ОЦЕНКИ ПОМЕХ В СВЕРХПЛОТНОЙ СРД 5G С ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЕМ

Допустим, BS с AP и возможностью формирования узкого луча предварительно осведомлены об относительном угловом расположении UE, могут сформировать максимум ДНА в направлении UE, являющемся SOI в данной соте; будем считать, что пользовательские устройства UE ведут передачу в ненаправленном режиме, а базовые станции

BS осуществляют прием в направленном режиме с ДО (рис.3).

Анализ помех выполняется для радиолинии SOI $U_0 \rightarrow B_0$ (канал "вверх"); остальные радиолинии $U_i \rightarrow B_i$, $i = 1, \dots, N$, работающие одновременно

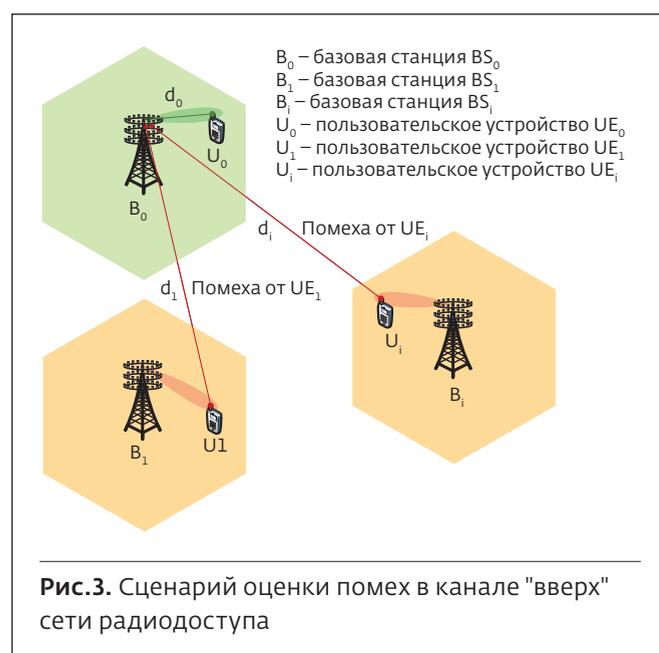


Рис.3. Сценарий оценки помех в канале "вверх" сети радиодоступа

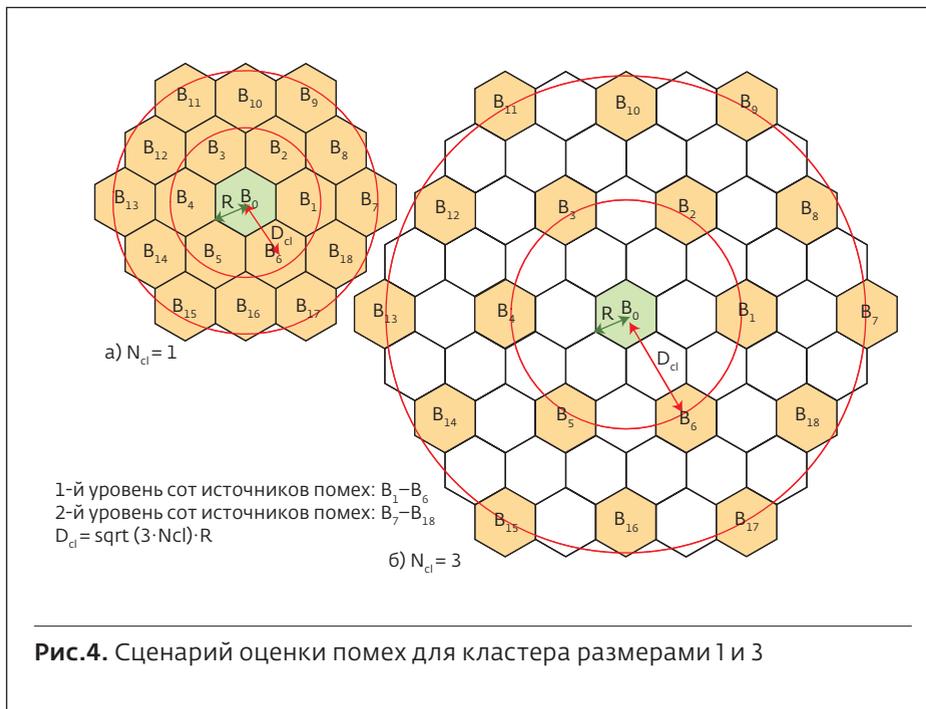


Рис.4. Сценарий оценки помех для кластера размерами 1 и 3

в соседних сотах, служат источниками внутрисистемных помех SNOI, где N – общее число соседних сот. 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.

В гексагональной структуре используются следующие допущения: BS имеют одинаковые значения эквивалентной изотропно-излучаемой мощности (ЭИИМ), антенны и высоту их подвеса; зона радиопокрытия BS с ненаправленной антенной моделируется окружностью радиусом R . Если N_{cl} – размерность кластера, тогда параметры гексагональной модели определяются расстоянием между центрами кластеров D_{cl} [9]:

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

При $N_{cl} = 1$ частоты используются повторно в каждой соте и расстояние между работающими на одинаковых частотах BS составляет: $D_{cl} = \sqrt{3}R$; при $N_{cl} = 3$ частоты повторяются в каждой третьей соте и расстояние $D_{cl} = 3R$; UE, работающие на одинаковых частотах в зонах обслуживания своих BS, являются источниками внутрисистемных помех при анализе канала "вверх". На рис.4 отображен сценарий оценки помех для $N_{cl} = 1$ и $N_{cl} = 3$: по мере снижения размерности кластера уменьшается расстояние между работающими на

одинаковых частотах BS, что позволяет оценить тенденцию уплотнения сетевых устройств на уровень помех в СРД.

Порядок оценки помех в предлагаемом сценарии для канала "вверх" при заданном территориальном распределении сетевых устройств предполагает фиксацию расстояний d_0 между B_0 и U_0 в радиолинии SOI и d_i между B_0 и другими пользовательскими устройствами U_i в соседних сотах $i=1, \dots, N$, ведущими передачу одновременно с U_0 и образующими радиолинии SNOI. Наименее благоприятный с точки зрения помех сценарий – при расположении U_0 на границе соты на расстоянии R от обслуживающей B_0 . Учет двух уровней окружающих B_0 сот, включая шесть ближних сот B_1-B_6 первого уровня

и 12 дальних сот B_7-B_{18} (второго уровня), – обычно достаточное условие для оценки помех вследствие существенных потерь при распространении радиоволн (ППВ).

Для сценария ненаправленных антенн (Omni) у BS и UE отношение сигнал/помеха SIR (Signal to Interference Ratio) в канале "вверх" определяется расстояниями d_0 между B_0 и U_0 и d_i между B_0 и другими U_i :

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

где $\eta = 2$ – показатель потерь ППВ в условиях прямой видимости LOS; для гексагональной модели одноуровневой сети обычно предполагают, что мощность передатчика U_0 , работающего в соте B_0 , и мощности передатчиков U_i , работающих в сотах B_i , $i = 1, \dots, 18$, одинаковы, поэтому справедливо выражение:

$$SIR_0 = \frac{d_0^{-\eta}}{\sum_{i=1}^N d_i^{-\eta}}; N = 18.$$

Для сценария направленных антенн у BS и UE отношение сигнал/помеха SIR в канале "вверх" определяется выражением:

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

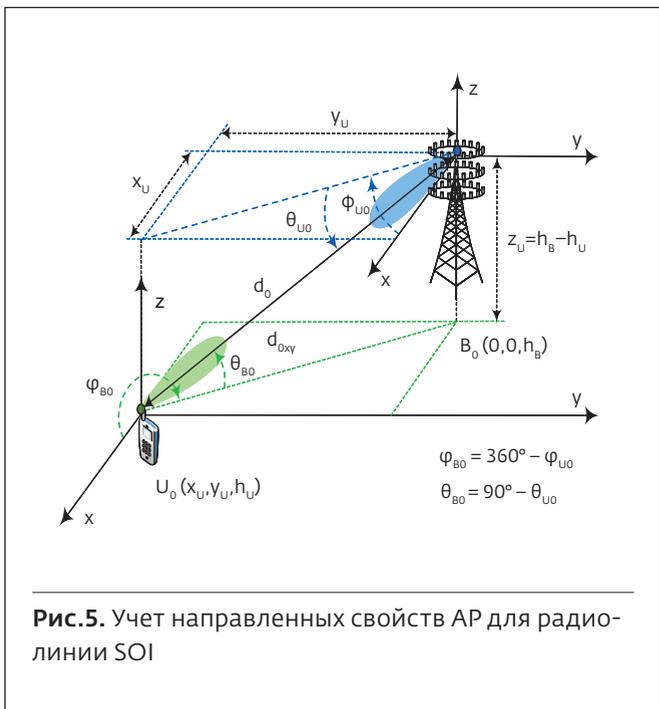


Рис.5. Учет направленных свойств АР для радиолинии SOI

где $G_{H_{B_0}}$ – коэффициент усиления (КУ) B_0 в горизонтальной плоскости; $G_{V_{B_0}}$ – КУ B_0 в вертикальной плоскости; $G_{H_{U_0}}$ – КУ U_0 в горизонтальной плоскости; $G_{V_{U_0}}$ – КУ U_0 в вертикальной плоскости; $G_{H_{U_i}}$ – КУ U_i в горизонтальной плоскости; $G_{V_{U_i}}$ – КУ U_i в вертикальной плоскости.

На рис.5 показан учет направленных свойств АР базовой станции B_0 и пользовательского устройства U_0 для радиолинии SOI $U_0 \rightarrow B_0$: (x_U, y_U, h_U) – координаты U_0 ; $(0, 0, h_B)$ – координаты B_0 ; h_U – высота АР U_0 ; h_B – высота АР B_0 ; $z_U = h_B - h_U$ – разность высоты АР U_0 и B_0 ; d_{0xy} – проекция d_0 на плоскость xu ; φ_{B_0} – азимут B_0 относительно U_0 , измеряемый от Ox ; θ_{B_0} – угол места B_0 относительно U_0 , измеряемый от плоскости xu ; φ_{U_0} – азимут U_0 относительно B_0 , измеряемый от Ox ; θ_{U_0} – угол места U_0 относительно B_0 , измеряемый от плоскости xu . Для относительных углов в радиолинии SOI справедливы соотношения:

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

На рис.6 проиллюстрирован учет направленных свойств АР базовой станции B_0 и пользовательских устройств U_i для

радиолиний SNOI $U_i \rightarrow B_0$, служащих источниками помех в канале "вверх": φ_{U_i} – азимут U_i относительно B_0 ; φ_{B_i} – азимут B_i относительно U_i . Для относительных углов в радиолиниях SNOI справедливы соотношения:

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

Значение $\Delta\varphi_U$ позволяет оценить ослабление, а $\Delta\varphi_B$ – усиление сигнала SNOI в рассматриваемом канале "вверх".

Принимая введенные обозначения для учета направленных свойств АР в радиолиниях SOI и SNOI, отношение сигнал/помеха SIR в канале "вверх" для сценария с ДО у базовых станций и пользовательских устройств:

$$SIR_D = \frac{d_0^{-n} G_{H_{B_0}}(\varphi_{U_0}) G_{V_{B_0}}(\theta_{U_0}) G_{H_{U_0}}(\varphi_{B_0}) G_{V_{U_0}}(\theta_{B_0})}{\sum_{i=1}^N d_i^{-n} G_{H_{B_0}}(\varphi_{U_i}) G_{V_{B_0}}(\theta_{U_i}) G_{H_{U_i}}(\varphi_{B_0}) G_{V_{U_i}}(\theta_{B_0})}; N = 18,$$

где $G_{H_{B_0}}$ – КУ АР B_0 в горизонтальной плоскости; $G_{V_{B_0}}$ – КУ АР B_0 в вертикальной плоскости; $G_{H_{U_0}}$ – КУ АР U_0 в горизонтальной плоскости; $G_{V_{U_0}}$ – КУ АР U_0 в вертикальной плоскости; $G_{H_{U_i}}$ – КУ АР U_i в горизонтальной плоскости; $G_{V_{U_i}}$ – КУ АР U_i в вертикальной плоскости.

Для моделирования КУ АР в горизонтальной плоскости в зависимости от ширины ДНА φ_{3dB} в опорном направлении используется аппроксимация [2]:

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

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

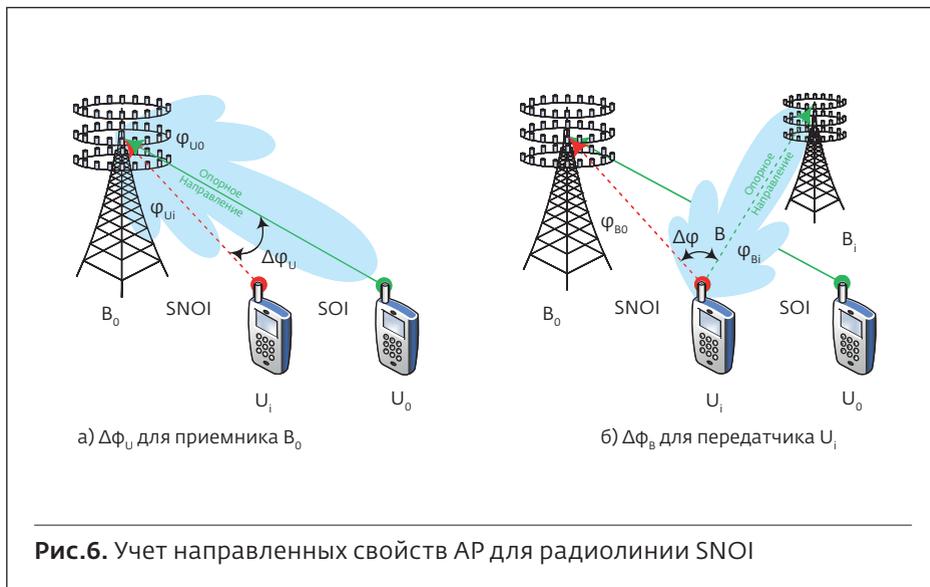
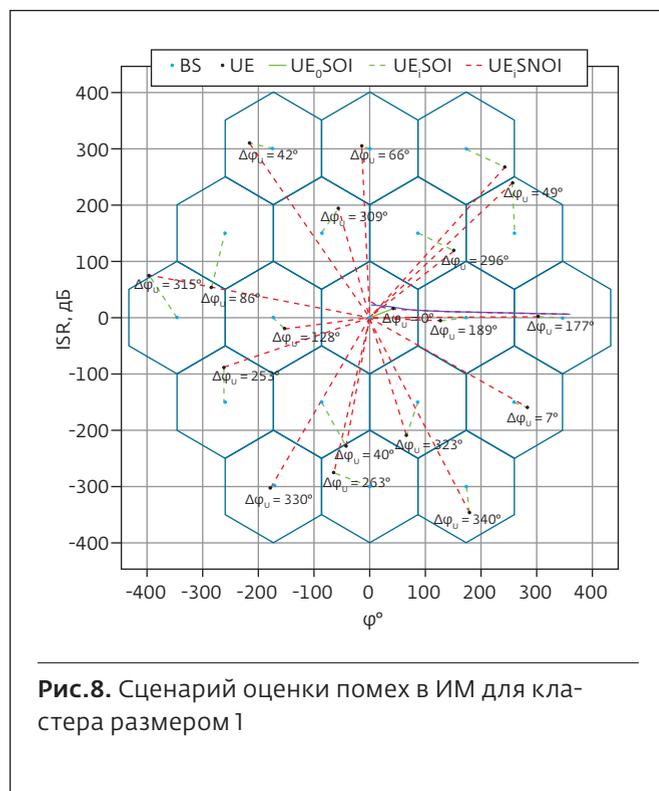
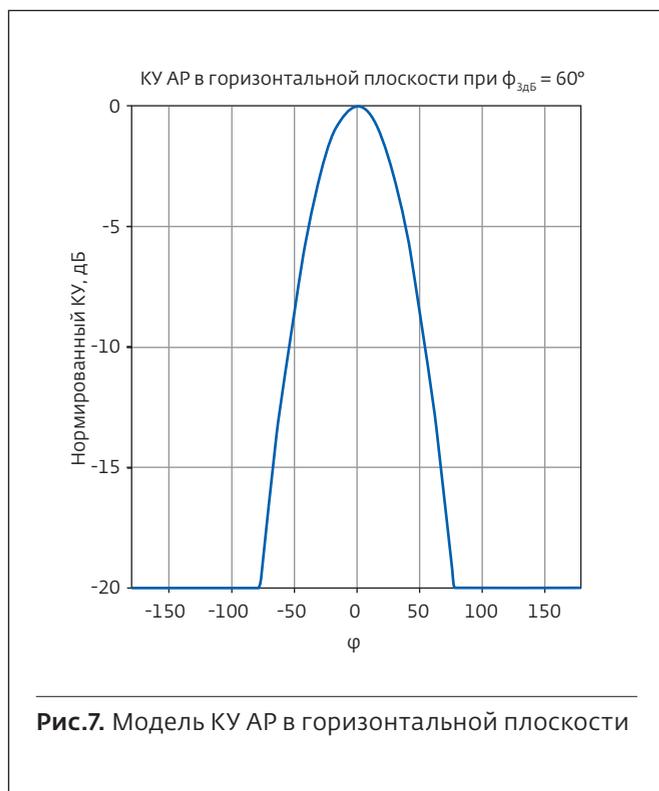


Рис.6. Учет направленных свойств АР для радиолинии SNOI



в боковых лепестках. Пример ДНА AP $G_H(\varphi)$ в горизонтальной плоскости для $\varphi_{3дБ} = 60^\circ$ и $G_{SL} = 20$ дБ представлен на рис.7.

Компенсация внутрисистемных помех ISR (в дБ) в режиме ДО (Beamforming) определяется как разность между SIR_D в режиме ДО и SIR_O в режиме Omni:

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

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОМЕХ В СВЕРХПЛОТНОЙ СРД 5G С ДИАГРАММОБРАЗОВАНИЕМ

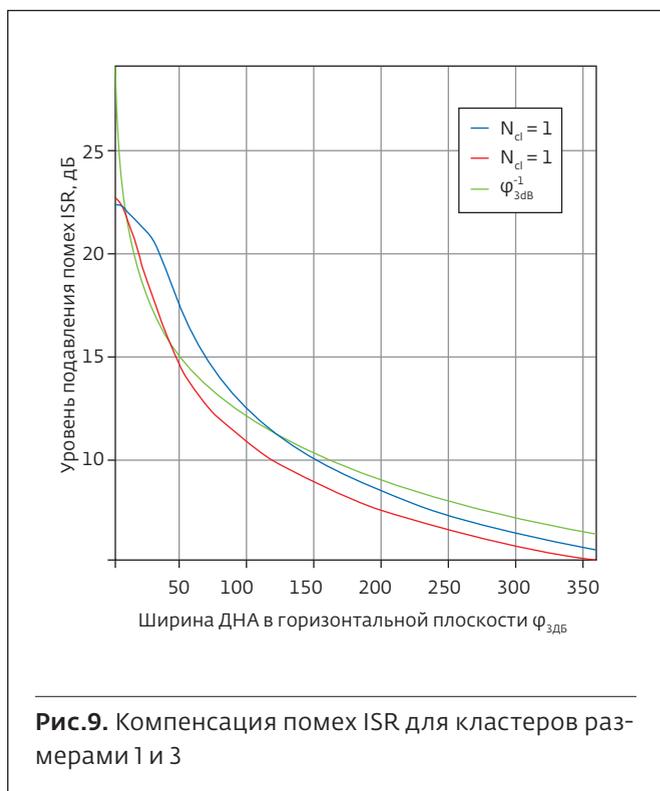
Рассмотрим ИМ оценки помех в сверхплотной СРД 5G с ДО в 2D с КУ AP в горизонтальной плоскости с $h_B = h_U = 0$. В табл.1 представлены параметры ИМ.

На рис.8 проиллюстрирован сценарий отдельной реализации ИМ для $N_{cl} = 1$.

На рис.9 представлена зависимость ISR от ширины ДНА БС в горизонтальной плоскости $\varphi_{3дБ}$.

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)	$\eta = 2$
Ослабление в боковых лепестках AP	$G_{SL} = 20$ дБ
ДНА в горизонтальной плоскости	$\varphi_{3дБ} = [5^\circ; 1^\circ; 360^\circ]$



Анализ графиков позволяет сделать следующие выводы: а) сужение ширины ДНА в режиме ДО ожидаемо приводит к подавлению помех по сравнению со случаем ненаправленных антенн; при сужении $\varphi_{3дБ}$ с 360° до 5° значение ISR превышает 15 дБ; б) сравнение уровня подавления помех ISR для кластеров размерами 1 и 3 показывает незначительное превышение ISR для кластера размером 3 по сравнению с кластером размером 1, что объясняется увеличением расстояния 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 $1/(\varphi_{3дБ})$, которая в некоторой степени подтверждает зависимости, полученные в результате ИМ для $\varphi_{3дБ} \geq 10^\circ$; при дальнейшем сужении ДНА величина ISR, полученная в результате ИМ, больше отклоняется от аппроксимации $1/(\varphi_{3дБ})$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ подавления внутрисистемных помех $ISR(\varphi_{3дБ})$ для модели территориального распределения устройств согласно гексагональной решетке из 19 сот с параметризацией

коэффициента усиления шириной диаграммы направленности в горизонтальной плоскости показал, 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. В результате сравнения зависимости $ISR(\varphi_{3дБ})$ для двух размерностей кластера обнаружено незначительное превышение ISR для кластера размером 3 по сравнению с кластером размером 1, что указывает на потенциал уплотнения приемопередающих устройств с диаграммообразованием в сетях пятого и последующих поколений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kamel M., Hamouda W., Youssef A. Ultra-Dense Networks: A Survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Vol. 18. No. 4. PP. 2522-2545.
2. Report ITU-R M.2412-0. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020. ITU. 2017.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Vook F.W., Ghosh A., Thomas T.A. MIMO and beamforming solutions for 5G technology // 2014 IEEE MTTTS International Microwave Symposium (IMS2014), Tampa, FL. 2014. PP. 1-4.
8. Roh W. et al. Millimeter-wave beamforming as an enabling technology for 5G cellular communications: Theoretical feasibility and prototype results // IEEE Commun. Mag. Feb. 2014. Vol. 52. No 2. PP. 106-113.
9. Маковеева М.М., Шинаков Ю.С. Системы связи с подвижными объектами: Учеб. пособие для вузов. М.: Радио и связь, 2002. 440 с.