

ИММИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДВУХ РАДИОЛИНИЙ С ДИАГРАММО- ОБРАЗОВАНИЕМ

на основе
позиционирования
в сетях 5G

Г.А.Фокин, д.т.н., проф. СПбГУТ
им. проф. М.А.Бонч-Бруевича /grihafokin@gmail.com,
Д.Б.Волгушев, исполнитель работ по гранту РФФИ в СПбГУТ
им. проф. М.А.Бонч-Бруевича /d.volgushev@yandex.ru

УДК 621.396.677, DOI: 10.22184/2070-8963.2023.115.7.38.46

Актуальной научной проблемой в сетях связи пятого и последующих поколений является эффективная организация одновременной работы совокупности направленных радиолиний при сверхплотном распределении устройств. Одним из решений является концепция диаграммообразования на основе позиционирования LAB (Location Aware Beamforming). Настоящее исследование посвящено описанию модели двух радиолиний, в которых управление диаграммой направленности антенны на стационарных базовых станциях выполняется на основе текущего местоположения подвижных пользовательских устройств. Результаты имитационного моделирования показывают, что при реализации концепции LAB необходимо учитывать как территориальный, так и угловой разнос пользовательских устройств.

ВВЕДЕНИЕ

Технология диаграммообразования на основе позиционирования подвижных пользовательских устройств в сетях 5G является закономерным ответом на тенденцию увеличения пространственного уплотнения одновременных сеансов связи в сверхплотных сетях

радиодоступа диапазона миллиметровых волн (ММВ). Радиолинии таких сетей характеризуются высокими потерями при распространении радиоволн и преимущественно условиями наличия прямой видимости между приемопередающими устройствами. Высокие коэффициенты усиления антенных решеток

на базовых станциях (БС), достигаемые посредством диаграммообразования на основе известного местоположения подвижных устройств, решают проблему высоких потерь в диапазоне ММВ для отдельно взятой радиолинии. Нерешенной остается научная проблема эффективной организации одновременной работы двух и более направленных радиолиний.

На протяжении последних десяти лет экспериментальные исследования под руководством T.S.Rappaport [1–3] в части измерений параметров пространственного радиоканала диапазона ММВ с использованием антенных решеток, работающих в режиме диаграммообразования (ДО) на передачу и прием, в целом подтвердили практическую реализуемость концепции диаграммообразования на основе позиционирования LAA. В работе [2] систематизированы режимы работы многоантенных систем, включая пространственное мультиплексирование и диаграммообразование; в частности, показано, что для радиолиний прямой видимости LOS (Line of Sight) предпочтительным является режим адаптивного ДО. Модели радиоканала диапазона ММВ, включая широкий спектр сценариев прямой видимости LOS, предпочтительных для систем LAA, формализованы в [3].

Проблемы управления лучом устройств сетей радиодоступа пятого и последующих поколений диапазона ММВ сформулированы в [4, 5]. Актуальным на сегодняшний день подходом к управлению лучом является использование местоположения устройств, предложенное в [6].

Проведенные ранее исследования в области позиционирования устройств сетей 5G показали достижение метровой точности [7] и обосновали сценарии использования их местоположения при установлении и ведении направленной радиосвязи. В частности, моделирование сверхплотных сетей 5G с диаграммообразованием [8] доказало существенный выигрыш в показателях связности и вероятности успешного радиоприема при формировании луча на основе предварительного позиционирования по сравнению со случаем ненаправленных антенн за счет комплексного учета коэффициентов усиления в одновременно работающих радиолиниях.

С точки зрения отдельных радиолиний для практической реализации режимов диаграммообразования устройств в составе сверхплотных сетей необходимо предварительно выравнивать лучи на передаче и приеме [9] при начальном установлении соединения [10], а также уточнять их ориентацию в процессе ведения радиосвязи [11].

С точки зрения сверхплотной сети радиодоступа для организации эффективного функционирования одновременно работающих направленных радиолиний требуется оценка допустимого уровня помех [12], который можно учесть с помощью показателя территориального разнеса стационарных устройств [13]. Позже совокупность проведенных исследований [7–13] была оформлена в концепцию диаграммообразования на основе позиционирования в сетях 5G [14]. Настоящая работа развивает данную концепцию для двух радиолиний в части оценки помех для сценария работы одной/двух базовых станций и представляет разработанную и доступную для верификации имитационную модель [15].

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОМЕХ ДЛЯ СЦЕНАРИЯ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ДВУХ РАДИОЛИНИЙ СЕТИ 5G ПРИ РАБОТЕ ДВУХ БС

Модель предназначена для оценки отношения сигнал/помеха SIR (Signal to Interference Ratio) в сценарии работы двух радиолиний сверхплотной сети радиодоступа (СПД) 5G с использованием антенных решеток (АР) на двух передающих базовых станциях gNB и двух приемных пользовательских устройствах UE. Модель состоит из трех основных модулей, реализующих следующие процедуры:

- установка начальных параметров и создание сценария оценки взаимного влияния двух радиолиний сверхплотной сети радиодоступа 5G;
- расчет SIR;
- отображение результатов расчета.

К начальным параметрам имитационной модели (ИМ) относятся: рабочая частота (принята равной 30 ГГц), тип АР, флаг использования АР на пользовательском устройстве UE. В ИМ доступно три типа эквидистантных антенных решеток: прямоугольная URA (Uniform Rectangular Array), линейная ULA (Uniform Linear Array) и круговая UCA (Uniform Circular Array).

Каждый тип АР описывается следующими параметрами: число элементов APN, расстояние между элементами АР (расстояние между элементами антенной решетки выбрано равным половине длины волны). Для создания АР используется функция **createAnt**, формирующая массив локальных координат [x, y, z] элементов антенной решетки, которые задают положение элементов АР в локальной системе координат (СК) относительно центра симметрии АР. Координаты gNB и UE задаются в глобальной СК.

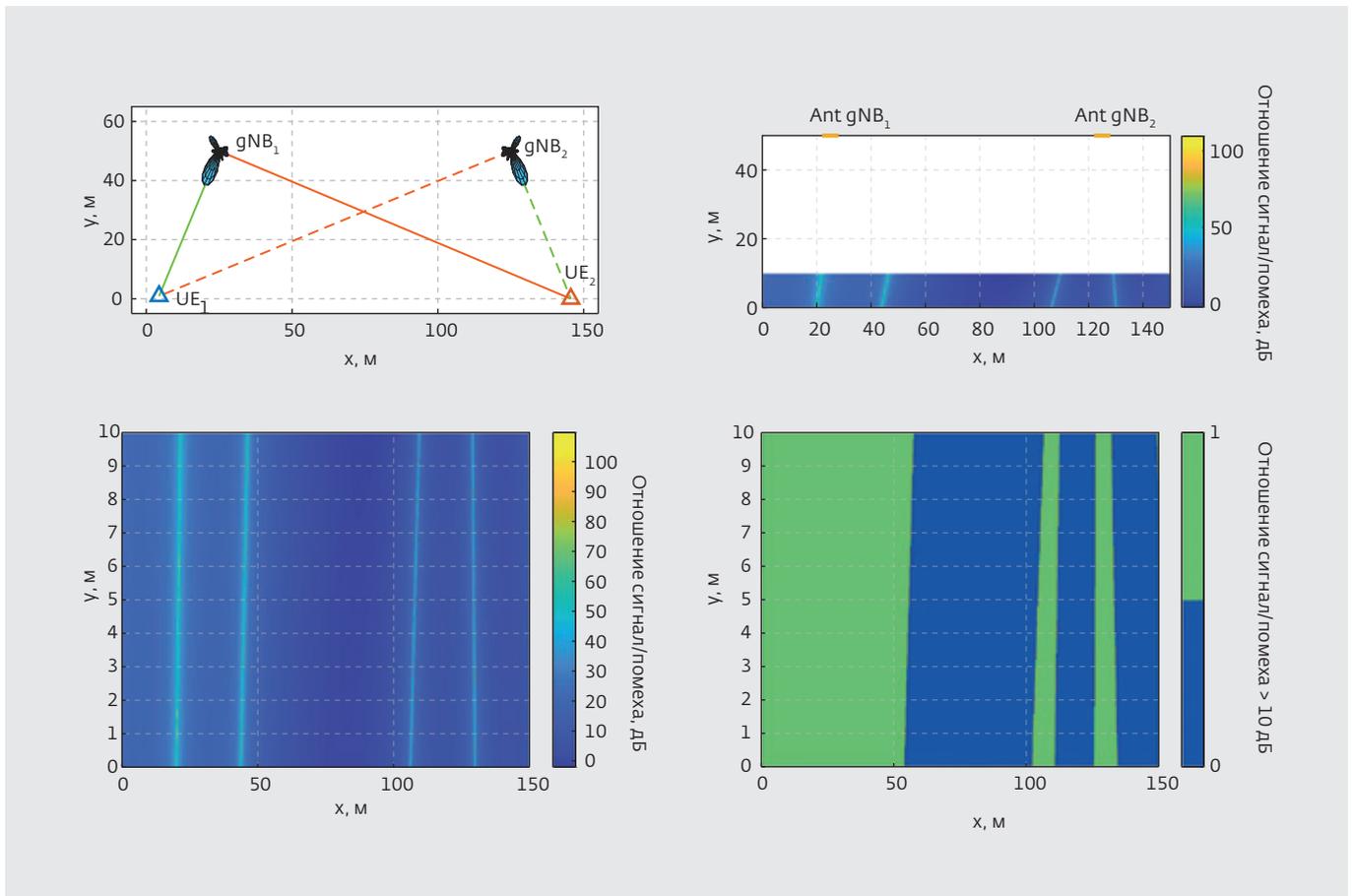


Рис.1. Сценарий моделирования двух радиолиний с двумя базовыми станциями на одной стороне

Сценарий расчета отношения сигнал/помеха предполагает наличие двух одновременно работающих радиолиний $gNB \rightarrow UE$. Каждое пользовательское устройство работает с одной обслуживающей gNB на интервале траектории движения UE при расчете мгновенного отношения SIR в зависимости от текущего местоположения UE .

Выбор пары $gNB \rightarrow UE$ осуществляется при создании сценария расчета. Сценарий определяет территориальное расположение gNB и траектории движения UE . К параметрам gNB , помимо их глобальных координат, также относится ориентация AP . Для формирования структуры параметров gNB используется функция `createNB`.

Траектория движения UE задается следующими параметрами: начальная и конечная точки траектории, скорость движения, дискретный временной интервал, задающий траекторию движения UE , а также процедура диаграммообразования (ДО) в радиолинии $gNB \rightarrow UE$ на основе текущего местоположения пользовательского устройства. При наличии AP на UE также задается ориентация антенной

решетки и на пользовательском устройстве. Для формирования структуры параметров UE используется функция `createUE`.

Каждый сценарий ИМ формирует набор прямолинейных траекторий движения UE . Взаимное расположение траекторий пользовательских устройств в модели двух радиолиний определяется величиной территориального разнеса d . В разработанной ИМ реализовано три сценария:

1. UE двигаются параллельно и навстречу друг другу на расстоянии d , gNB располагаются на одной стороне относительно траекторий движения UE (рис.1a);
2. UE двигаются параллельно и навстречу друг другу на расстоянии d , gNB располагаются по разные стороны относительно траекторий движения UE (рис.2a);
3. UE двигаются друг за другом на расстоянии d , gNB располагаются на одной стороне относительно траекторий движения UE .

Сценарий расчета выбирается в функции `createScenarion`. Расчет отношения сигнал/помеха

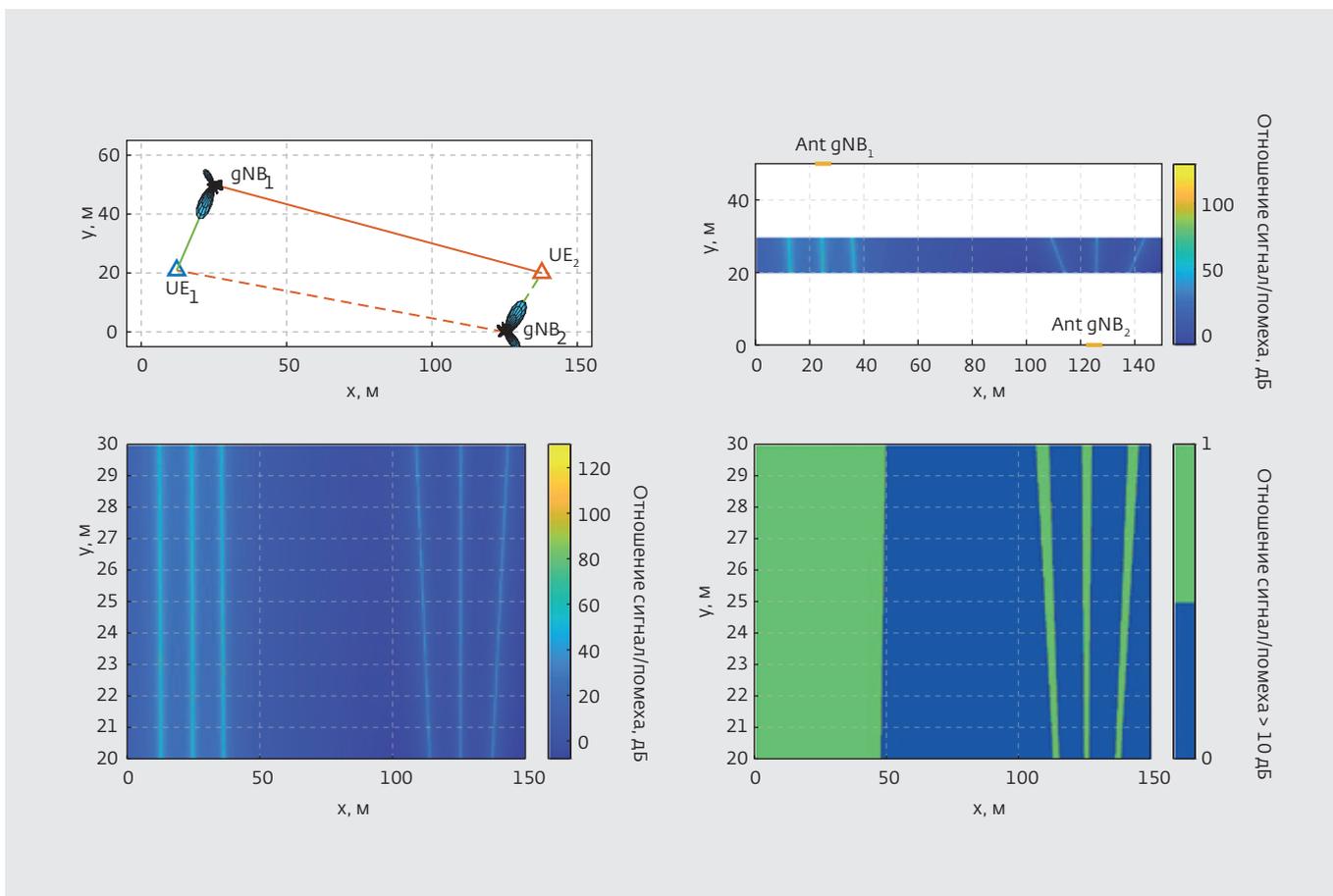


Рис.2. Сценарий моделирования двух радиолиний с двумя базовыми станциями на разных сторонах

в канале "вниз" на приеме UE выполняется для каждой точки траектории UE. SIR вычисляется как отношение принятой мощности от обслуживающей gNB в радиолинии SOI (Signal of Interest) к мощности, принятой от соседней gNB, являющейся источником помех в радиолинии SNOI (Signal Not of Interest). Величина SIR включает в себя значения коэффициентов усиления (КУ) AP обслуживающей и соседней gNB в направлении UE, а также потери при распространении

радиоволн (PPB) в свободном пространстве, зависящие от расстояния между gNB и UE. Мощности передачи gNB принимаются одинаковыми.

Допустим, что на gNB используется эквидистантная прямоугольная AP с числом элементов 16, а UE работает со всенаправленной антенной. Результаты расчетов SIR для сценариев 1 и 2 показаны на рис.1 и 2; зависимости построены для эквидистантной прямоугольной AP на gNB с числом элементов 16.



ИНФОТЕЛ
Интеллект. Опыт. Результат.

ONEPLAN

**ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И УСЛУГИ
ПО ПЛАНИРОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ
СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ
И ФИКСИРОВАННОЙ СВЯЗИ**



step@rpls.ru
+7 812 590-77-11
www.rpls.ru

На рис.1б и 2б представлены размещения gNB и область расчета SIR. На рис.1в и 2в показаны карты значений SIR в дБ. По оси X отложены точки на прямой траектории движения UE, по оси Y – значение территориального разноса. На рис.1г и 2г представлены зоны SIR, превышающих заданный порог (закрашены зеленым цветом).

Анализ графиков, представленных на рис.1 и 2, показывает, что карты SIR имеют локальные максимумы, количество и положение которых определяются формой диаграммы направленности (ДН) AP. Максимумы проявляются тогда, когда ДН обслуживающей gNB направлена максимумом на UE, а соседняя gNB направлена на UE минимумом своей ДН. Значения SIR уменьшаются по мере удаления UE от обслуживающей gNB и приближения к соседней gNB. При этом не наблюдается зависимости значений SIR от выбранного параметра территориального разноса.

Формализуем математические модели расчета SIR. Для вычисления углов ухода AOD/DOD (Angle/Direction of Departure) сигнала в радиоприемах gNB→UE необходимо согласовать локальные координаты элементов антенных решеток UE и gNB и глобальные координаты местоположений UE и gNB. Вектор, задающий направление в глобальной СК для радиоприема gNB→UE, определяется выражением:

$$k = -x_{gNB} = [k_x, k_y, k_z]^T, \quad (1)$$

где x_{UE} – вектор глобальных координат UE для текущей точки расчета;
 x_{gNB} – вектор глобальных координат gNB.

Перевод вектора в локальную систему координат элементов антенной решетки gNB выполняется согласно следующим выражениям:

$$r(\phi_r, \theta_r) = R_{gNB}(\phi_r, \theta_r)k; \quad (2)$$

$$R_{gNB}(\phi_r, \theta_r) = R_{gNBz}(\phi_r)R_{gNB\gamma}(\theta_r); \quad (3)$$

$$R_{gNBz}(\phi) = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$R_{gNB\gamma}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $r = [r_x, r_y, r_z]^T$ – вектор углов ухода AOD/DOD-сигнала в радиоприемах gNB→UE

в локальной системе координат антенной решетки gNB;

R_{gNB} – матрица поворота, задающая ориентацию антенной решетки gNB; $R_{gNBz}(\phi)$ и $R_{gNB\gamma}(\theta)$ – составные части матрицы поворота R_{gNB} , задающие поворот AP gNB по азимуту и углу места соответственно;

ϕ_r – угол поворота AP gNB по азимуту; θ_r – угол поворота AP gNB по углу места (наклон AP).

Азимут и угол места, задающие направление в радиоприемах gNB→UE с учетом ориентации AP gNB, определяются по формулам:

$$\phi_{gNB} = \arctan\left(\frac{r_y}{r_x}\right); \quad (6)$$

$$\theta_{gNB} = \arctan\left(\frac{r_z}{d_{xy}}\right); \quad (7)$$

$$d_{xy} = \sqrt{r_x^2 + r_y^2}. \quad (8)$$

Углы ухода полезного сигнала в радиоприемах SOI, под которыми обслуживающая gNB видит UE, обозначим как $[\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs}]$, а углы ухода помехи в радиоприемах SNOI, под которыми соседняя gNB наблюдает данное пользовательское устройство, обозначим как $[\phi_{gNBi}, \theta_{gNBi}]$. Углы $[\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs}]$ и $[\phi_{gNBi}, \theta_{gNBi}]$ используются для вычисления коэффициентов усиления (КУ) антенных решеток обслуживающей и помеховой базовой станции gNB в радиоприемах SOI и SNOI соответственно.

Вектор амплитудно-фазового распределения сигналов в формате комплексных чисел элементов AP в зависимости от направления углов прихода/ухода сигнала вычисляется как:

$$s_a(\phi, \theta) = e^{-j2\pi f \tau(\phi, \theta)}, \quad (9)$$

$$\tau(\phi, \theta) = X_a k_a(\phi, \theta) / c, \quad (10)$$

$$k_a(\phi, \theta) = - \begin{bmatrix} \cos(\theta)\sin(\phi) \\ \cos(\theta)\sin(\phi) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$$X_a = \begin{bmatrix} x_{a1} & y_{a1} & z_{a1} \\ M & M & M \\ x_{aN} & y_{aN} & z_{aN} \end{bmatrix}, \quad (12)$$

где ϕ – направление прихода/ухода сигнала по азимуту;

θ – направление прихода/ухода сигнала по углу места;

X_a – массив координат элементов AP размерности $R^{N \times 3}$ (где N – число антенных элементов);

k_a – направляющий вектор, вычисленный на основе углов прихода AOA/DOA (Angle/Direction of Arrival) сигнала $[\phi, \theta]$;

τ – вектор задержек прихода сигнала на каждый элемент AP с направления $[\phi, \theta]$;

c – скорость света;

f – рабочая частота.

Формулы (9)–(12) также используются для вычисления вектора комплексных направляющих коэффициентов диаграммообразования AP W_a при подстановке в них углов направления в радиолинии gNB→UE, вычисленных по (6) и (7).

Обозначим вектор комплексных направляющих коэффициентов AP для обслуживающей gNB в радиолинии SOI как $w_{as} = s_a(\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs})$, а вектор комплексных коэффициентов AP для соседней gNB в радиолинии SNOI как $w_{as_} = s_a(\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs})$. $[\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs}]$ – это углы направления соседней gNB на свою UE. КУ в заданном направлении $[\phi, \theta]$ с учетом вектора комплексных направляющих коэффициентов AP вычисляется по формуле:

$$g(\phi, \theta) = |w_a s_a(\phi, \theta)|^2. \quad (13)$$

Далее по формуле (13) коэффициент усиления AP обслуживающей gNB_s для радиолинии SOI и коэффициент усиления AP соседней gNB_i, выступающей помехой в направлении данной UE для радиолинии SNOI, рассчитывается на основе углов $[\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs}]$ и $[\phi_{gNBi}, \theta_{gNBi}]$ соответственно, а также на основе векторов направляющих коэффициентов w_{as} и $w_{as_}$ обслуживающей и помеховой gNB согласно выражениям:

$$g_s(\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs}) = |w_{as} s_a(\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs})|^2, \quad (14)$$

$$g_s(\phi_{gNBi}, \theta_{gNBi}) = |w_{as_} s_a(\phi_{gNBi}, \theta_{gNBi})|^2. \quad (15)$$

Расчет мощности (в дБ), принимаемой UE от gNB, с учетом вектора w_a , выполняется по формуле:

$$P(g(\phi, \theta), r) = 10 \log_{10}(g(\phi, \theta)) - 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right), \quad (16)$$

где r – расстояние между UE и gNB;
 $\lambda = c / f$ – длина волны.

В формуле (16) второе слагаемое описывает потери при РРВ в свободном пространстве. Значение отношения сигнал/помеха для UE, выраженное в дБ, вычисляется согласно:

$$SIR = P(g_s, r_s) - P(g_i, r_i), \quad (17)$$

где g_s и g_i – КУ антенной решетки обслуживающей и соседней gNB в направлении данной UE соответственно;
 r_s и r_i – расстояние от UE до обслуживающей и соседней gNB соответственно.

При наличии AP на UE вычисление ее КУ выполняется аналогичным с gNB образом с учетом следующих особенностей.

Вектор, задающий направление в радиолинии UE→gNB вычисляется по (1), при этом полученный вектор берется с противоположным знаком $k_{ue} = -k$. Формулы (2)–(5) используются для перевода вектора k_{ue} в локальную систему координат APUE. Формулы (6)–(8) используются для расчета углов в направлении UE→gNB. Расчет вектора амплитудно-фазового распределения и вектора направляющих комплексных коэффициентов AP UE выполняется по формулам (9)–(12). КУ AP UE в направлении gNB вычисляется по формуле (13). Мощность, принимаемая UE с AP, вычисляется по (16) с дополнительным слагаемым КУ AP UE:

$$P(g_{gNB}, g_{UE}, r) = 10 \log_{10}(g_{gNB}) + 10 \log_{10}(g_{UE}) - 20 \log_{10}\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right). \quad (18)$$

Значение SIR для UE с AP вычисляется по (17) с учетом (18).

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ПОМЕХ ДЛЯ СЦЕНАРИЯ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ ДВУХ РАДИОЛИНИЙ СЕТИ 5G ПРИ РАБОТЕ ОДНОЙ БС

Модель предназначена для оценки отношения сигнал/помеха для сценария работы двух радиолиний сверхплотной сети радиодоступа 5G с одной обслуживающей gNB и с использованием AP на передаче для формирования двух независимых лучей ДН в направлении двух UE. Структура модели аналогична структуре, описанной в предыдущем разделе.

Сценарий расчета предполагает наличие одной gNB, одновременно обслуживающей две UE за счет формирования независимых лучей ДН AP. Пользовательские устройства являются стационарными, а их взаимное расположение определяется двумя параметрами: дальность от UE до gNB d ; угловой разнос между UE α . В данном сценарии не используется AP на UE, так как

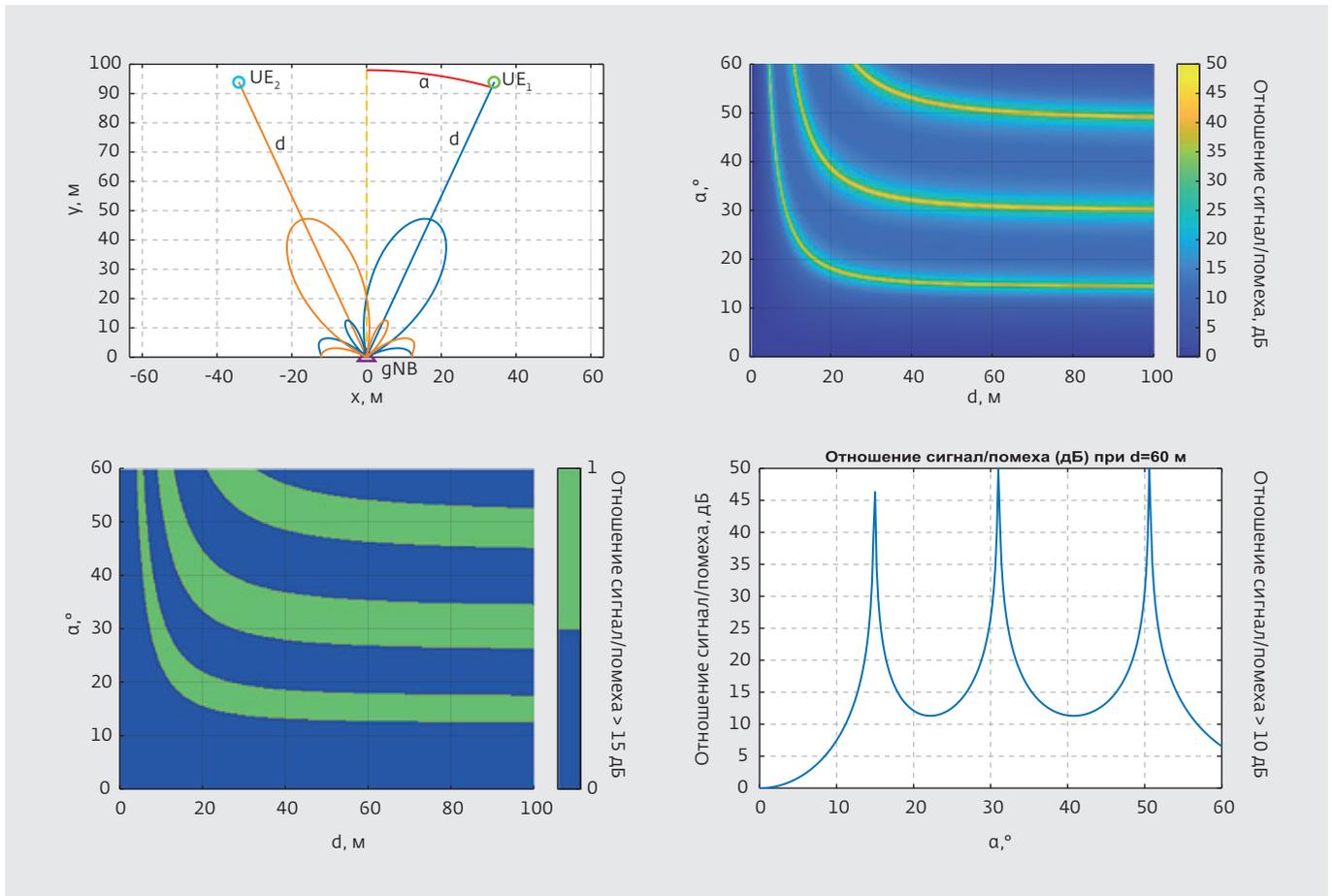


Рис.3. Сценарий моделирования двух радиолиний с одной базовой станцией

направление прихода сигнала и помехи, с точки зрения двух UE, обслуживаемых одной gNB, совпадают. Для создания AP, структуры параметров gNB и UE используются функции **createAnt**, **createNB**, **createUE**, как описано в предыдущем разделе. Сценарий имитационного моделирования показан на рис.3а.

Расчет отношения сигнал/помеха в канале передачи "вниз" для двух радиолиний gNB→UE выполняется для каждой пары значений из набора параметров d и α . SIR вычисляется как отношение мощности, принятой UE за счет формирования луча ДН gNB в ее направлении, к мощности, принятой UE за счет формирования второго луча ДН gNB, направленного на соседнюю UE. В данной модели величина SIR отражает отношение коэффициентов усиления двух лучей, сформированных AP одной gNB в заданном направлении. SIR не учитывает потери на затухание при РРВ в свободном пространстве, так как оба пользовательских устройства находятся на одинаковом расстоянии от gNB.

Согласование глобальных систем координат местоположений UE и gNB с локальной СК элементов антенной решетки gNB выполняется по формулам (1)–(5). Расчет азимута и угла места, задающих направление в радиолиниях gNB→UE, производится по формулам (6)–(8). Углы, под которыми gNB наблюдает UE, обозначим как $[\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs}]$. Оценка проводится для одного UE; обозначим его как UEs. Расчет вектора комплексных направляющих коэффициентов w_a и вектора амплитудно-фазового распределения s_a для элементов AP проводится согласно выражениям (9)–(12). Расчет КУ AP в заданном направлении $[\phi, \theta]$ с учетом векторов w_a и s_a выполняется согласно (13). По формуле (13) КУ луча AP gNB для выбранной UEs g_s в радиолинии SOI и КУ луча AP gNB для соседней UE g_i в радиолинии SNOI для направления на UEs вычисляются согласно:

$$g_s(\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs}) = |w_{as}s_a(\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs})|^2, \quad (19)$$

$$g_i(\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs}) = |w_{as}s_a(\phi_{gNBs}, \theta_{gNBs})|^2, \quad (20)$$

где w_{as} – вектор комплексных направляющих коэффициентов для луча AP gNB, направленного на UEs в радиолинии SOI;

$w_{as_}$ – вектор комплексных направляющих коэффициентов для луча AP gNB, направленного на соседнюю UE в радиолинии SNOI. Значение отношения сигнал/помеха для UEs в дБ определяется выражением:

$$SIR = 10 \log_{10}(g_s(\phi, \theta)) - 10 \log_{10}(g_i(\phi, \theta)). \quad (21)$$

Результаты расчетов SIR в дБ для эквидистантной прямоугольной AP с числом элементов 16 представлены на рис.3б. По оси X отложены значения расстояния d от UE до gNB, по оси Y – значения углового разнеса α между UE. Из рис.3б видно, что для значений дальности больше 30 м наблюдается повторяющаяся картина значений SIR. При этом локальные максимумы определяются ДН AP и говорят о том, что для данных значений α и d луч, направленный максимумом на соседнюю UE, минимумом направлен на UEs. При $d > 40$ м картина значений SIR перестает зависеть от d , так как угол наклона при больших дальностях меняется медленно. Также наблюдается область низких значений SIR при значениях α менее 10 градусов независимо от значений d . Ширина этой области по углу α определяется шириной главного лепестка ДН AP.

На рис.3в представлена карта значений SIR, превышающих заданный порог (области карты SIR, закрашенные зеленым цветом). На рис.3г показана зависимость SIR от значений углового разнеса для заданной фиксированной дальности d . Из рис.3в, 3г видно, что области SIR, превышающие заданный порог в 15 дБ, повторяются при изменении α , что определяется формой ДН AP, а именно количеством боковых минимумов и максимумов ДН AP, что в свою очередь зависит от числа элементов прямоугольной AP.

На рис.4 представлена зависимость SIR от углового разнеса α для заданной дальности $d = 60$ м и разного числа элементов AP. Если число элементов на одной стороне эквидистантной прямоугольной AP, то общее число ее элементов равно N^2 .

Из рис.4 видно, что с увеличением числа элементов AP увеличивается число локальных максимумов SIR в заданном диапазоне угловых разнесов α . Максимумы расположены равномерно в диапазоне α с небольшим увеличением разнеса между

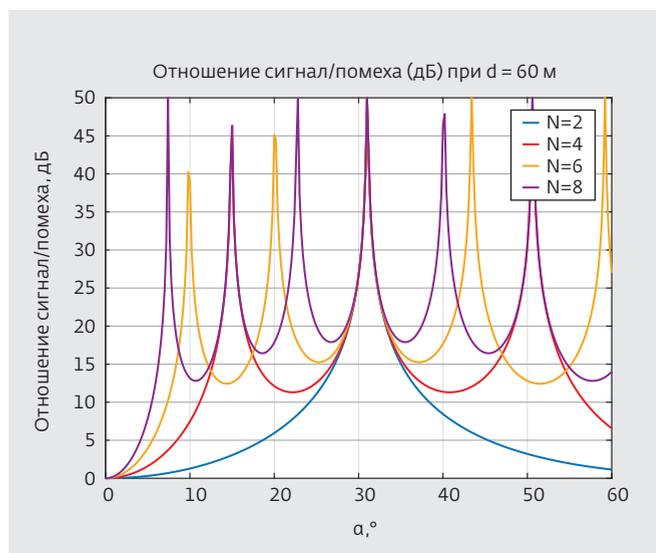


Рис.4. Зависимость SIR от углового разнеса при заданной дальности для разного числа элементов AP

ними при увеличении α . Число локальных максимумов равно $N - 1$.

При увеличении числа элементов AP наблюдается повышение минимального (области провалов на графиках SIR) и, соответственно, среднего значений SIR в заданном диапазоне α . Область низких SIR в начале диапазона значений α уменьшается с увеличением числа элементов AP, что вызвано уменьшением ширины главного лепестка ДН. Для порогового значения SIR = 10 дБ ширина области низких SIR равна порядка 23, 11, 7, 5 градусов для числа N , равного 2, 4, 6, 8, соответственно.

Для прямоугольной AP наблюдается линейная зависимость между кратностью увеличения числа N и кратностью снижения ширины области низких SIR, то есть увеличение N в k раз уменьшает область низких SIR в k раз. Ширина этой области может являться критерием минимально допустимого углового разнеса при работе AP с заданным числом элементов. Также наблюдается снижение SIR при стремлении углового разнеса α к 90 градусам, что вызвано увеличением уровня бокового лепестка ДН при больших углах отклонения максимума ДН прямоугольной AP. Данное снижение SIR может являться критерием максимально допустимого углового разнеса, которое составляет порядка 38, 57, 65, 70 градусов для числа N , равного 2, 4, 6, 8, соответственно при пороговом значении SIR = 10 дБ. Подобные выводы справедливы и для линейной AP с числом элементов, равным N , при работе на дальностях d , при которых угол места меняется слабо.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная имитационная модель реализует процедуры адаптивного диаграммообразования в базовых станциях на основе текущего местоположения подвижных пользовательских устройств в процессе их перемещения. Модель служит для исследования взаимного влияния двух направленных радиолиний по критерию мгновенного отношения сигнал/помеха.

В отличие от доступных в открытых источниках исследований в данной области, предлагаемая разработка использует исключительно примитивные функции среды Matlab и доступна для верификации по ссылке [15]. Методологический подход, реализованный в модели, позволяет учитывать комплекс условий построения сетей и сценариев функционирования устройств, включая:

- точность и скорость позиционирования устройств;
- конфигурацию антенных решеток стационарных и подвижных устройств;
- точность и скорость диаграммообразования и/или определения направления прихода сигнала;
- географическую протяженность, подвижность и плотность подвижных и стационарных устройств.

Результаты моделирования показали перепады мгновенного отношения сигнал/помеха в десятки дБ в зависимости от территориального и углового разнеса устройств, что необходимо учитывать при построении и функционировании сверхплотных сетей радиодоступа пятого и последующих поколений.

Следующим этапом является развитие исследования на уровне совокупности радиолиний одной соты и совокупности сот сети радиодоступа.

Благодарность

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

ЛИТЕРАТУРА

1. 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 Out-door Urban Cellular Communications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. Vol. 61. Iss. 4. PP. 1850–1859.
2. Sun S., Rappaport T.S., Heath R.W., Nix A., Rangan S. Mimo for millimeter-wave wire-less communications: beamforming, spatial multiplexing, or both? // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. Iss. 12. PP. 110–121.
3. 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.
4. Heng Y. 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.
5. 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.
6. Maiberger R., Ezri D., Erlihson M. Location based beamforming // Proceedings of the 2010 IEEE 26-th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel (Eilat, Israel, 17–20 November 2010). IEEE, 2010. PP. 000184–000187.
7. Фокин Г.А. Комплекс моделей и методов позиционирования устройств в сетях пятого поколения. Дис. ... докт. техн. наук. СПб: СПбГУТ, 2021. 499 с.
8. Фокин Г.А. Моделирование сверхплотных сетей радиодоступа 5G с диаграммообразованием // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2021. Т. 15. № 5. С. 4–21.
9. Фокин Г.А. Процедуры выравнивания лучей устройств 5G NR // Электросвязь. 2022. № 2. С. 26–31.
10. Фокин Г. Модели управления лучом в сетях 5G NR. Ч. 1. Выравнивание лучей при установлении соединения // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2022. № 1 (101). С. 42–49.
11. Фокин Г. Модели управления лучом в сетях 5G NR. Ч. 2. Выравнивание лучей при ведении радиосвязи // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2022. № 3 (103). С. 62–69.
12. Фокин Г. Модели диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа 5G. Ч. 1. Оценка помех // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2021. № 3 (95). С. 66–73.
13. Фокин Г. Модели диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа 5G. Ч. 2. Оценка разнеса устройств // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2021. № 4 (96). С. 66–73.
14. Фокин Г.А. Концепция диаграммообразования на основе позиционирования в сетях 5G // Вестник связи. 2022. № 10. С. 1–7.
15. Имитационная модель двух радиолиний с диаграммообразованием на основе позиционирования в сетях 5G. [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/grihafokin/LAB_link_level_rus (дата обращения 14.08.2023).

19–20 марта 2024 г. | Омск

XXV СИБИРСКИЙ ПРОМЫШЛЕННО-ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

ПРОМТЕХЭКСПО • 2024

В объединённой экспозиции:

- Машиностроение. Металлообработка. Сварка. Инструмент.
- Автоматизация. Радиоэлектроника. Приборостроение.
- Метрология. Измерения. Диагностика.
- Омскгазнефтехим. Экология.
- Энергосиб. СибмашТЭК.
- Индустрия безопасности. Связь. ИТ-решения. Цифровизация.
- Промышленная робототехника. Аддитивные технологии. Композитные материалы.
- Наука. Образование. Кадры.
- Финансовые услуги.
- Рекламные услуги. Продвижение. Маркетинг.