

## МОДЕЛИ ДИАГРАММООБРАЗОВАНИЯ в сверхплотных сетях радиодоступа 5G

Часть 2. Оценка разноса устройств

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

УДК 621.396.9, DOI: 10.22184/2070-8963.2021.96.4.66.72

Во второй части исследования, посвященного моделям и методам диаграммообразования в сверхплотных сетях радиодоступа 5G, приводится оценка в первом приближении необходимого территориального разноса соседних приемопередающих устройств для поддержания допустимого уровня внутрисистемных помех. Результаты математического и имитационного моделирования показывают, что требуемый территориальный разнос должен составлять примерно 20% дальности радиопокрытия сетевых устройств, работающих в режиме диаграммообразования с разбросом углов  $2^\circ$ .

### ВВЕДЕНИЕ

Новый радиointерфейс 5G NR (New Radio), включая более широкие полосы частот, диапазон миллиметровых волн, а также новую архитектуру сетей радиодоступа (СРД) 5G, в том числе непосредственную радиосвязь устройств друг с другом D2D (Device-to-Device) в сверхплотных сетях UDN (Ultra Dense Network), не только открывает дополнительные возможности, но и порождает ряд проблем функционирования устройств [1]. На уровне сети радиодоступа трудно прогнозировать степень влияния внутрисистемных помех, обусловленную сверхплотным распределением устройств и их децентрализованным взаимодействием при переходе от сотовой к устройственно-центрической распределенной архитектуре [2]. Один из путей компенсации внутрисистемных помех в сверхплотных СРД пятого и последующих поколений для абонентских (АС) и базовых станций (БС) – пространственное уплотнение одновременных передач за счет многоантенных систем

massive MIMO [3] и умных цифровых антенных решеток (АР) [4] с возможностью адаптивного диаграммообразования (ДО) [5, 6].

Эффективность диаграммообразования в СРД 5G NR – актуальное направление исследований – определяется, в частности, плотностью соседних приемопередающих устройств [7]. Перспективный метод управления лучом для территориально и пространственно распределенных АС и БС, оборудованных умными цифровыми АР, – ДО на основе позиционирования LAB (Location Aware Beamforming) [8]. К преимуществам LAB, по сравнению с ДО на основе данных о текущей обстановке в радиоканале CSI (Channel State Information), относится возможность оперативно формировать луч на передачу и/или прием без необходимости предварительного анализа обучающих последовательностей, накладные расходы на обработку которых в условиях сверхплотного распределения как подвижных АС, так и неподвижных БС становятся неприемлемо высокими [9].

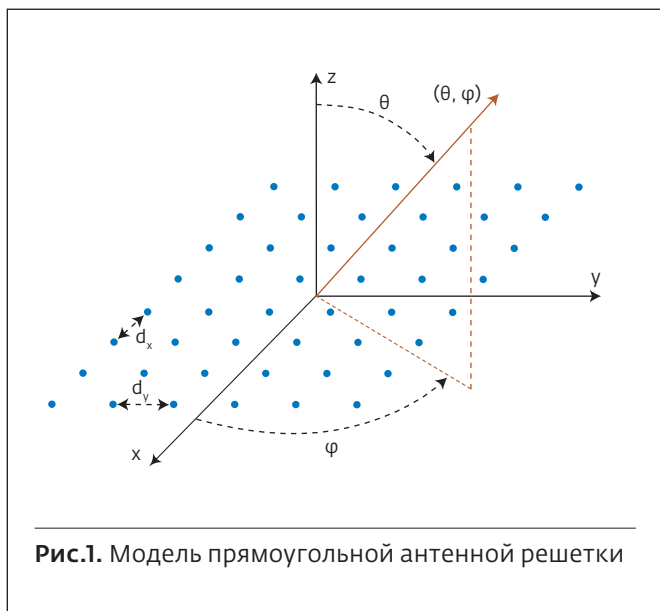


Рис.1. Модель прямоугольной антенной решетки

Эффективность ДО на основе позиционирования определяется, в том числе, точностью формируемого луча [10]. Поэтому актуальный вопрос, исследуемый в настоящей работе, – оценка в первом приближении зависимости необходимого территориального разнеса соседних приемопередающих устройств, работающих в режиме диаграммообразования, от точности и ширины формируемого луча.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РАЗНОСА УСТРОЙСТВ В ПЕРВОМ ПРИБЛИЖЕНИИ**

Исследуем зависимость территориального разнеса устройств от точности и ширины формируемого луча для случая использования

прямоугольных АР. На рис.1 представлена модель прямоугольной АР с равномерным расположением элементов на плоскости [5]: М элементов вдоль оси 0x на расстоянии dx и N элементов вдоль оси 0y на расстоянии dy.

Прямоугольные АР получили широкое распространение для устройств СРД 5G благодаря возможности адаптивно формировать диаграмму направленности антенны (ДНА) в пространстве по азимуту φ в горизонтальной плоскости и углу места θ в вертикальной плоскости. Пусть пара (φ<sub>0</sub>, θ<sub>0</sub>) задает опорное направление максимального излучения ДНА по азимуту и углу места соответственно, тогда коэффициент направленного действия (КНД) прямоугольной АР [AF(θ, φ)]<sub>M×N</sub> с числом элементов M×N, где M и N – четные числа, определяется [5]:

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

где w<sub>mn</sub> – амплитуда элемента m = 1, ..., M и n = 1, ..., N; а параметры u и v:

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

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

где λ – длина волны. При M = N и dx = dy = λ/2 для ширины ДНА по уровню половинной мощности HPBW (Half-Power Beamwidth) в горизонтальной и вертикальной плоскостях справедливо соотношение [6]:

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

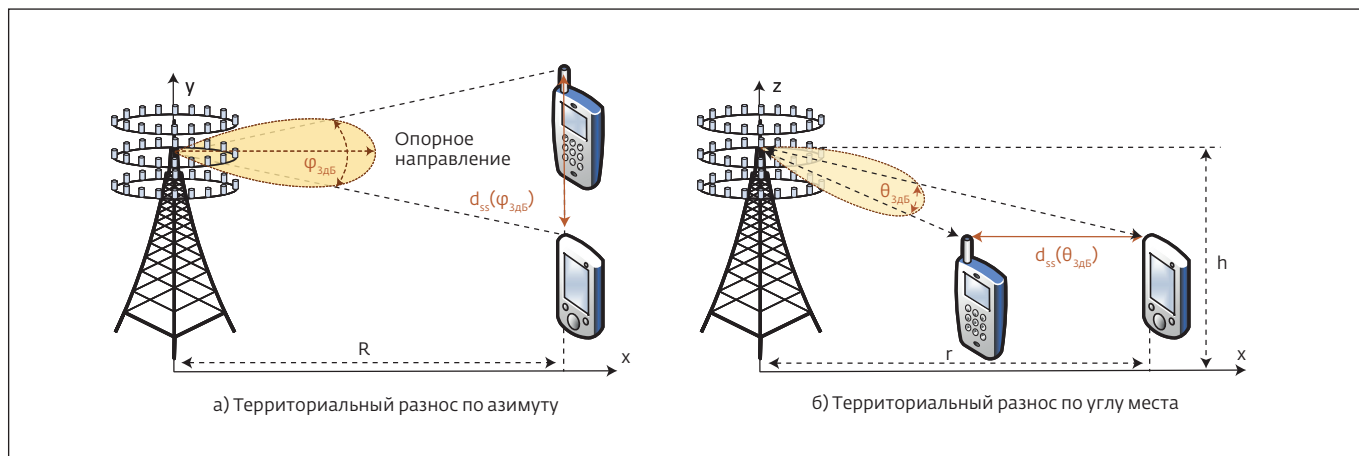
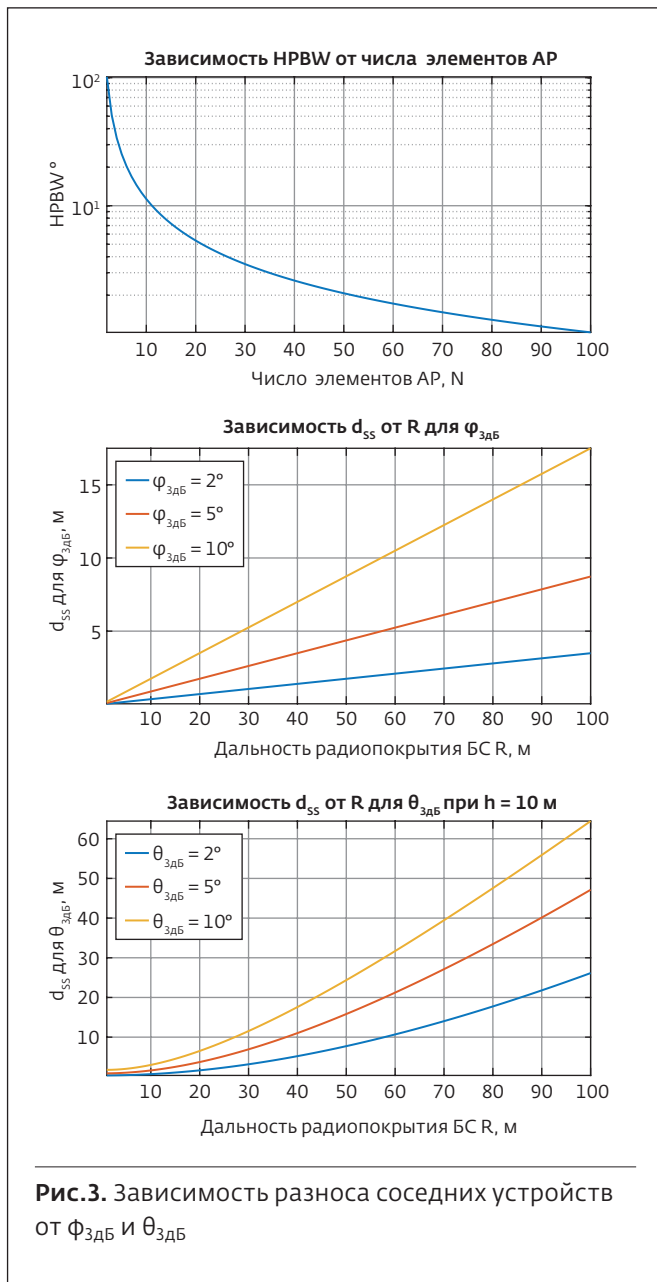
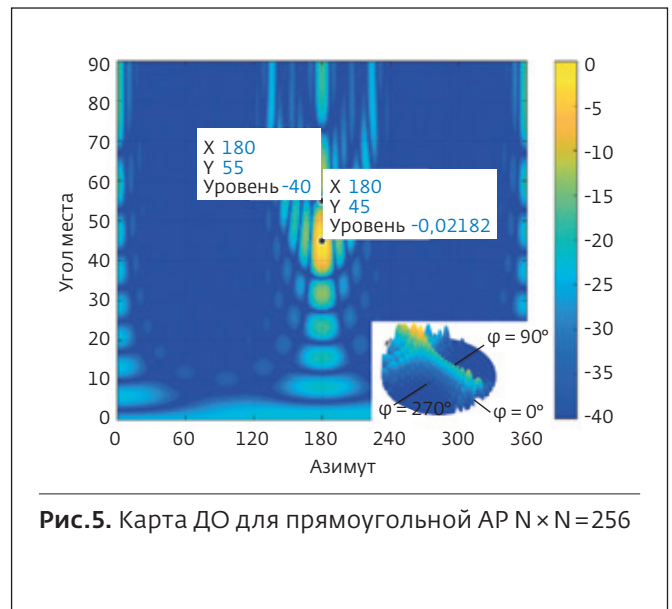
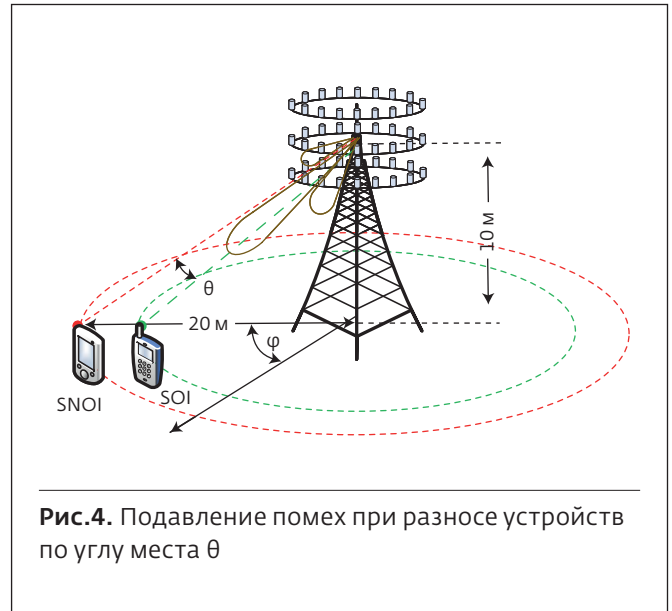


Рис.2. Оценка территориального разнеса по азимуту и углу места



Аппроксимация (1) позволяет в первом приближении оценить  $\varphi_{зДБ}$  и  $\theta_{зДБ}$ , где  $\varphi_{зДБ}$  - ширина ДНА по уровню половинной мощности (минус 3 дБ) HPBW<sub>H</sub> (Horizontal) в горизонтальной плоскости;  $\theta_{зДБ}$  - ширина ДНА по уровню половинной мощности HPBW<sub>V</sub> (Vertical) в вертикальной плоскости. Зная  $\varphi_{зДБ}$  и  $\theta_{зДБ}$ , высоту подвеса  $h$  БС и дальность ее радиопокрытия  $R$ , можно оценить территориальный разнос  $d_{ss}$  (spatial separation) соседних устройств по уровню HPBW по азимуту  $d_{ss}(\varphi_{зДБ})$  и углу места  $d_{ss}(\theta_{зДБ})$  (рис.2):

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



$$= R - h \cdot \tan(\text{atan}(r/h) - \theta_{зДБ}). \quad (2)$$

На рис.3 показана зависимость HPBW от числа элементов прямоугольной AP  $N^2$ , а также оценка территориального разноса  $d_{ss}(\varphi_{зДБ})$  и  $d_{ss}(\theta_{зДБ})$  в первом приближении.

На основе анализа графиков можно сделать следующие выводы: а) при 64-х элементах прямоугольной AP ширина ДНА по азимуту и углу места достигает 1°, поэтому далее оценка территориальных разносов  $d_{ss}$  производится для трех значений HPBW в горизонтальной ( $\varphi_{зДБ} = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ ) и вертикальной ( $\theta_{зДБ} = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ$ ) плоскостях;

Таблица 1. SOI, SNOI и SOI/SNOI для сценария  $\theta = 10^\circ$ 

Число элементов AP, N <sup>2</sup>	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

Таблица 2. Подавление помех SOI/SNOI для сценариев  $\theta = 2,5$  и  $10^\circ$ 

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


б) при фиксированной ширине ДНА в горизонтальной и вертикальной плоскостях НРВW по мере повышения дальности радиопокрытия R требуемый территориальный разнос  $d_{ss}$  соседних устройств по уровню половинной мощности луча AP увеличивается; при этом  $d_{ss}$  для  $\theta_{3дБ}$  возрастает быстрее, чем для  $\varphi_{3дБ}$ , что объясняется на порядок меньшей высотой подвеса AP h по сравнению с R; в) по мере снижения НРВW в горизонтальной  $\varphi_{3дБ}$  и вертикальной  $\theta_{3дБ}$  плоскостях требуемый территориальный разнос  $d_{ss}$  уменьшается; г) если использовать в качестве нижней границы значение  $d_{ss}(\theta_{3дБ})$ , то требуемый разнос  $d_{ss}$  должен быть  $d_{ss}(2^\circ) > 0,2R$ ,  $d_{ss}(5^\circ) > 0,4R$  и  $d_{ss}(10^\circ) > 0,6R$ .

ДО на основе позиционирования LАВ позволяет передающим и принимающим устройствам компенсировать издержки их свертчатого

распределения в пространстве за счет формирования максимумов ДНА в направлении передачи/приема полезного сигнала SOI (Signal of Interest) и минимума ДНА в направлении внутрисистемных помех SNOI (Signal of No Interest) для других устройств. Имитационное моделирование (ИМ) используется для оценки влияния разнеса устройств SOI и SNOI в начальном приближении на уровень помех в отдельной радиолинии и совокупности радиолиний СРД 5G.

#### ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РАЗНОСА УСТРОЙСТВ В ОТДЕЛЬНОЙ РАДИОЛИНИИ


На рис.4 представлен сценарий ИМ 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  $\theta = 10^\circ$ . В табл.1 содержится



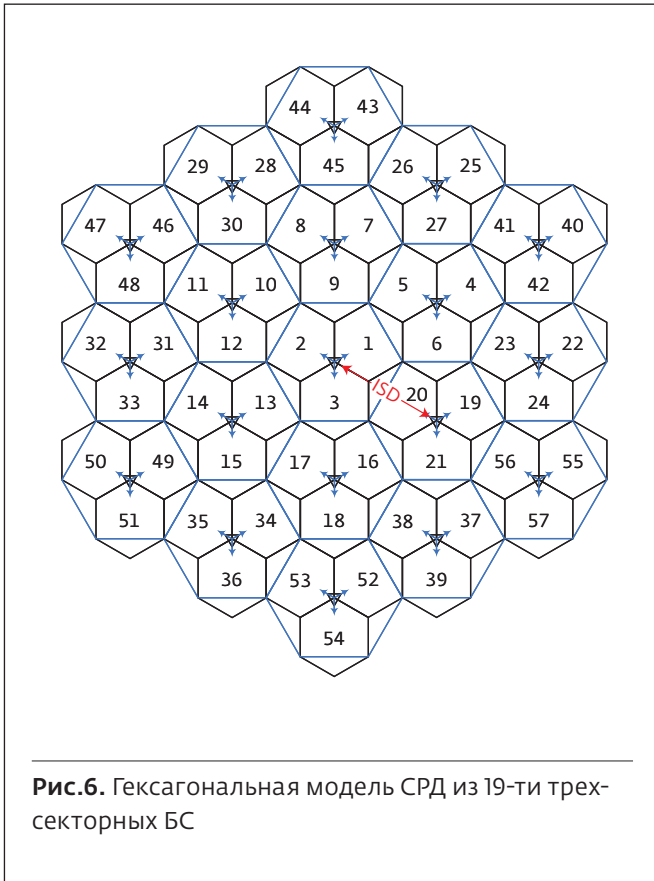
**ИНФОТЕЛ**  
Интеллект. Опыт. Результат.

# 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



**Рис.6.** Гексагональная модель СРД из 19-ти трехсекторных БС

оценка энергетики радиолиний SOI, SNOI в дБ и подавление SOI/SNOI для  $\theta = 10^\circ$  при трех значениях числа элементов прямоугольной AP  $N^2$ .

В табл.2 показано подавление помех SOI/SNOI при трех значениях разнота соседних устройств по углу места  $\theta = 2^\circ, 5^\circ, 10^\circ$  и трех значениях  $N^2$ .

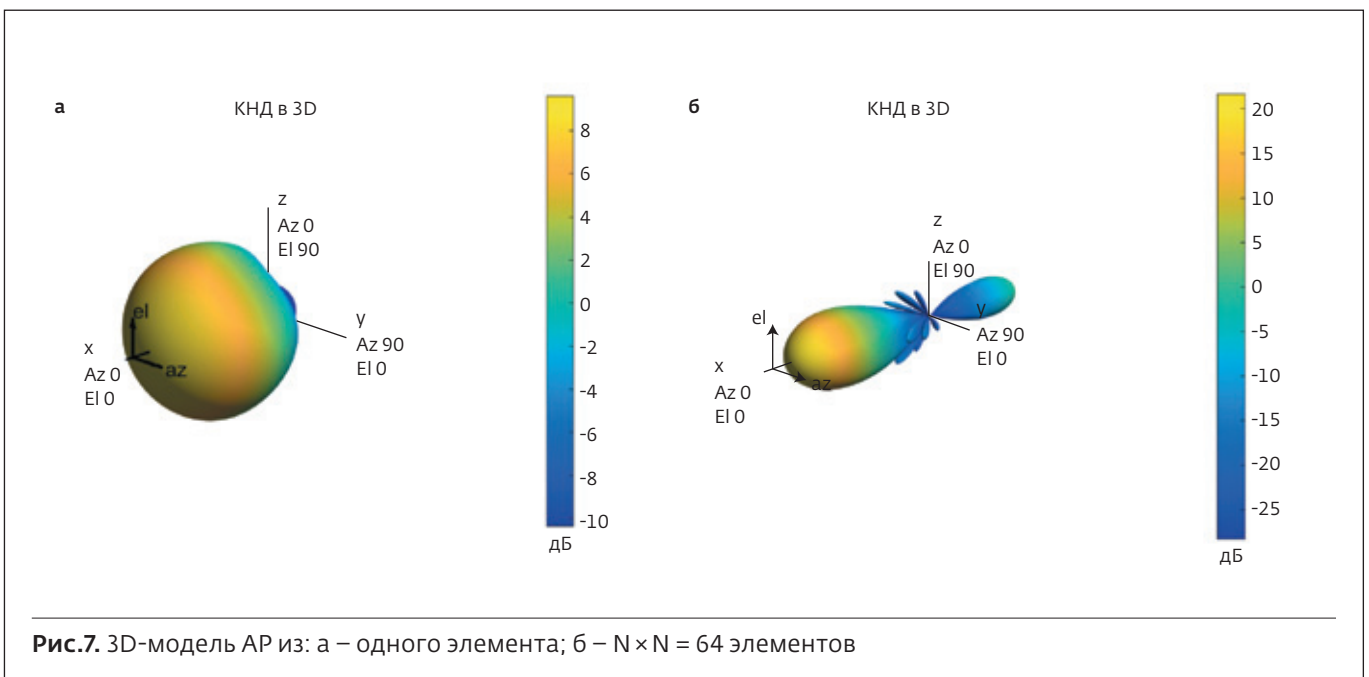
На рис.5 приведен пример построения карты диаграммообразования по азимуту и углу места для AP с  $N^2=256$  при разнота устройств по углу места  $\theta = 10^\circ$  с использованием [5].

Как следует из анализа табл.1, 2 и рис.5, в отдельной радиолинии подавление помех превышает 40 дБ при разнота устройств на угол более  $2^\circ$  для AP с  $N^2 = 64$ .

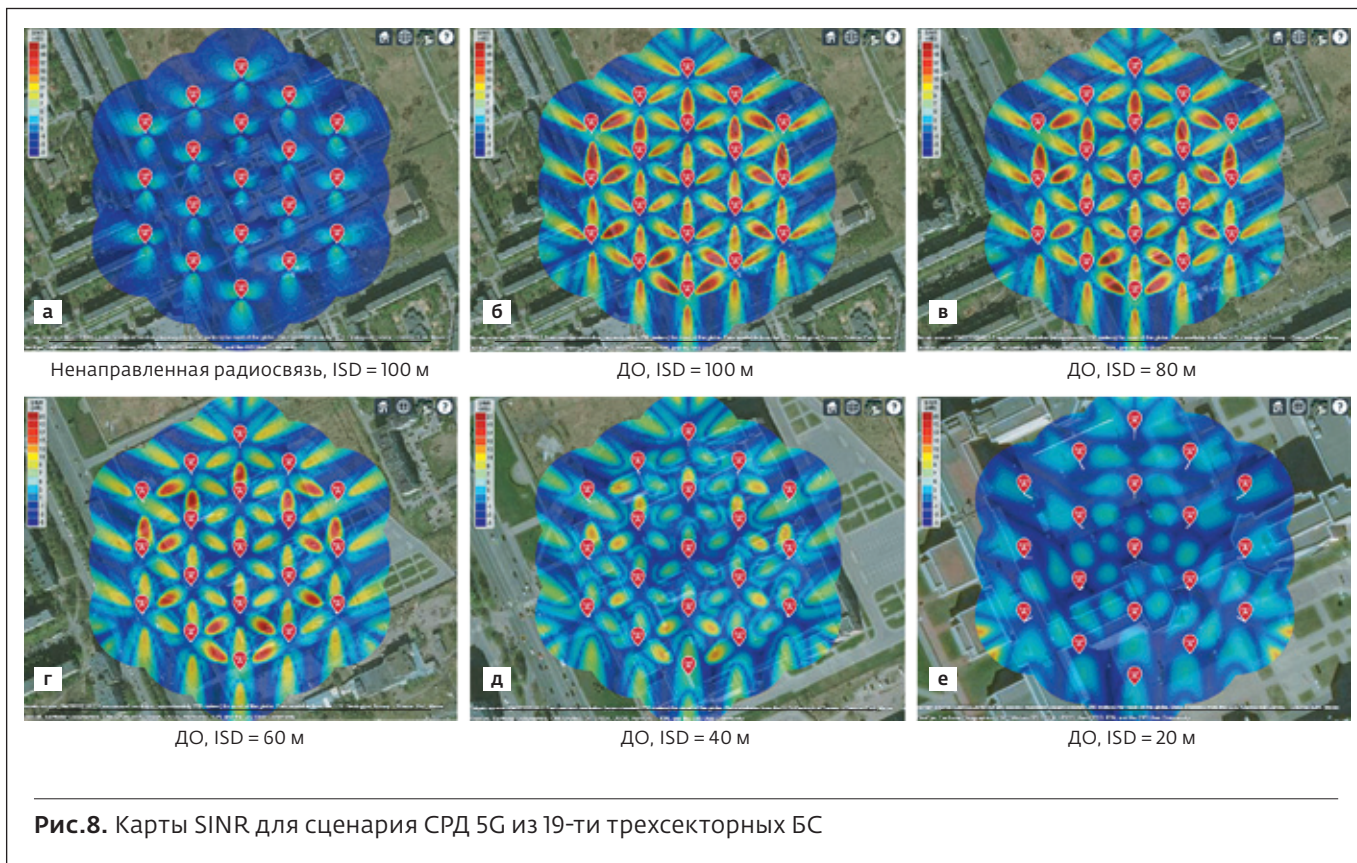
### ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ РАЗНОТА УСТРОЙСТВ В СОВОКУПНОСТИ РАДИОЛИНИЙ

Для анализа совокупности радиолиний SOI и SNOI рассмотрим сценарий ИМ 19-ти трехсекторных БС по рекомендации ITU-R M.2135-1 [11] (рис.6).

Параметр ISD (Inter-Site-Distance) в ITU-R M.2135-1 представляет собой разнота БС. Для ИМ 19-ти трехсекторных БС (57 секторов) сначала задается МП центральной БС. Возможности пакета расширения Antenna Toolbox СПО Matlab [12] позволяют при моделировании процесса распространения радиоволн использовать цифровые модели местности; координаты центральной БС задаются параметрами широты и долготы. Относительно центральной расставляются остальные БС с территориальным разнотом ISD. Для каждой БС инициализируются по три сектора с азимутами опорных направлений  $30^\circ, 150^\circ$  и  $270^\circ$ .



**Рис.7.** 3D-модель AP из: а – одного элемента; б –  $N \times N = 64$  элементов



**ИНТЕРНЕТ НА ДАЧУ**

Антенны для усиления сигнала мобильного интернета от производителя оптом и в розницу

ООО «НПП ОСТ»  
 ЗАО «НПП ОСТ», 192148, г. Санкт-Петербург, пр-т Елизарова, 38 литер К,  
 тел +7 812 365-27-71 сайт: <https://antennaspb.ru/>

Для моделирования AP используется пакет Phased Array System Toolbox СПО Matlab [12]. На рис.7 отображены трехмерные КНД для одного элемента и AP из 64-х элементов.

Для построения карты отношений сигнал/(шум+помехи) ОСШП (SINR, Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio) каждая элементарная площадка пространственного разрешения обслуживается той БС, принимаемый сигнал которой в ней максимален (SOI); остальные БС оказываются источниками помех (SNOI). На рис.8 представлены карты SINR от -5 до 20 дБ для СРД из 19-ти БС при уменьшении ISD для оценки влияния их уплотнения.

На основе анализа карт отношений сигнал/(шум+помехи) можно сделать следующие выводы: а) SINR для БС в режиме ДО в среднем выше, чем 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 снижается, а области положительных SINR исчезают, что является следствием уплотнения устройств при фиксированной мощности передатчиков БС; в) для сектора 270° центральной БС при ISD = 100 м оценка пространственного разнеса по критерию положительного ОСШП составляет  $d_{ss} \sim 20$  м; при уменьшении ISD  $d_{ss}$  снижается; при ISD = 40 м SINR по азимуту 270° оказывается меньше нуля.

Для оценки территориального разнеса использовались маркеры положительного ОСШП по ширине ДНА сектора 270° центральной БС; полученные значения широты и долготы двух маркеров применялись для вычисления  $d_{ss}$  с помощью функции Matlab **distance (lat1,lon1,lat2,lon2)**. В результате оценки территориального разнеса по положительным значениям SINR получены следующие зависимости: при ISD = 100, 80 и 60 м значения  $d_{ss}$  составили 23,7; 20,4 и 14,9 м соответственно. Сравнивая эти результаты с начальным приближением  $d_{ss}(2^\circ) > 0,2R$ , можно сделать вывод: территориальный разнос соседних устройств должен составлять не менее ~20% дальности радиопокрытия для AP с  $N^2=64$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование моделей диаграммообразования в отдельной радиолинии и в совокупности радиолиний показало, что требуемый

территориальный разнос устройств в сверхплотных сетях радиодоступа 5G должен составлять примерно 20% дальности радиопокрытия при разбросе углов 2° для AP с  $N^2=64$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Lopez A.V., Chervyakov A., Chance G., Verma S., Tang Y. Opportunities and Challenges of mmWave NR // IEEE Wireless Communications. 2019. Vol. 26. No. 2. PP. 4-6.
2. Boccardi F., Heath R.W., Lozano A., Marzetta T.L., Popovski P. Five disruptive technology directions for 5G // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. No. 2. PP. 74-80.
3. Vook F.W., Ghosh A., Thomas T.A. MIMO and beamforming solutions for 5G technology // 2014 IEEE MTTT International Microwave Symposium (IMS2014), Tampa, FL. 2014. PP. 1-4.
4. Gross F. Smart Antennas for Wireless Communications: With MATLAB. McGraw-Hill Professional. 2005. 288 p.
5. Balanis C.A. Antenna theory: analysis and design. John Wiley & sons. 2016. 1104 p.
6. Mailloux R.J. Phased Array Antenna Handbook. 3rd Ed. Artech House. 2017. 691 p.
7. 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.
8. 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.
9. Liu C., Li M., Hanly S.V., Whiting P., Collings I.B. Millimeter-Wave Small Cells: Base Station Discovery, Beam Alignment, and System Design Challenges // IEEE Wireless Communications. 2018. Vol. 25. No. 4. PP. 40-46.
10. Talvitie J. et al. Beamformed Radio Link Capacity Under Positioning Uncertainty // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2020. Vol. 69. No. 12. PP. 16235-16240.
11. Report ITU-R M.2135-1. Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced. ITU. 2009.
12. Antenna Toolbox. MathWorks, Inc. URL: <https://www.mathworks.com/products/antenna.html>
13. Phased Array System Toolbox, MathWorks, Inc, URL: <https://www.mathworks.com/products/phased-array.html>

# ARMY 2021

МЕЖДУНАРОДНЫЙ  
ВОЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ФОРУМ



\* ФРЕГАТ «АДМИРАЛ ФЛОТА  
СОВЕТСКОГО СОЮЗА ГОРШКОВ»

22–28 АВГУСТА  
ПАТРИОТ ЭКСПО

[WWW.RUSARMYEXPO.RU](http://WWW.RUSARMYEXPO.RU)

ОРГАНИЗАТОР



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЫСТАВОЧНЫЙ  
ОПЕРАТОР



МКВ

МЕЖДУНАРОДНЫЕ  
КОНГРЕССЫ И ВЫСТАВКИ