

## Формирование дополнительных виртуальных каналов приема при обработке сигналов на выходах элементов антенной решетки перспективной базовой станции сотовой связи

А.А. Болкунов<sup>1</sup>, Л.А. Овчаренко<sup>1</sup>, Ю.Г. Пастернак<sup>2</sup>,  
В.А. Пендюрин<sup>3</sup>, И.В. Попов<sup>4</sup>, Ф.С. Сафонов<sup>2</sup>, С.М. Федоров<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «НТЦ РЭБ»

121357, Россия, г. Москва,  
ул. Верейская, 29, стр. 135

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет  
394006, Россия, г. Воронеж,  
ул. 20-летия Октября, 84

<sup>3</sup> АО НПП «Автоматизированные системы связи»  
394062, Россия, г. Воронеж,  
ул. Пеше-Стрелецкая, 108

<sup>4</sup> АО «Концерн «Созвездие»»  
394018, Россия, г. Воронеж,  
ул. Плехановская, 14

*Аннотация* – Приведены результаты исследований макета антенной решетки для перспективной базовой станции сотовой связи диапазона частот 1,8–1,88 ГГц, включающей в себя линейную антенную решетку из 12 щелевых элементов с директорами прямоугольной формы, в качестве диаграммообразующей схемы которой использована модификация линзы Ротмана, отличающаяся тем, что ради уменьшения ее габаритных размеров линза свернута пополам – в центре расположена земля, а по обе стороны ее – половинки тела линзы с экспоненциальными полосковыми трансформаторами. Показано, что для уменьшения уровня боковых лепестков антенной системы в режиме приема могут использоваться интерполяционная и экстраполяционная антенные решетки. Экстраполяционная антенная решетка может также формироваться с целью повышения коэффициента направленного действия приемной антенной системы и разрешения источников радиоизлучения, не разрешимых «реальной» антенной решеткой.

*Ключевые слова* – антенная решетка; базовая станция; сотовая связь; линза Ротмана; коэффициент направленного действия.

### Введение

Одной из современных тенденций развития антенных систем базовых станций сотовой связи является разделение каналов не только по виду модуляции, частоте, времени, поляризации, но и в пространственной области, путем формирования достаточно узких лепестков диаграммы направленности [1–4].

Для одновременного формирования большого количества узких лепестков идеально подходят многолучевые антенные системы на основе различных модификаций линзы Люнеберга [5–9], но, к сожалению, их стоимость остается достаточно высокой.

Поэтому нами предпринята попытка построения многолучевой антенной системы для перспективной базовой станции сотовой связи на основе линейной антенной решетки из щелевых излучателей с директорами в виде прямоугольных металлических пластин и диаграммообразующей схемы на основе линзы Ротмана в печатном ис-

полнении. Фото экспериментального образца антенной системы для формирования 10 лепестков в азимутальном секторе шириной 90 градусов в полосе частот 1,8–1,88 ГГц показано на рис. 1.

На рис. 2 – фото антенной решетки, а на рис. 3 – фото двух сторон модификации линзы Ротмана в печатном исполнении, особенностью которой является свернутое пополам тело линзы, расположенное по обе стороны от земляного проводника. Подобная конструкция линзы Ротмана используется ради уменьшения габаритных размеров диаграммообразующей схемы, расположенной на обратной стороне антенной решетки.

Путем численного анализа и натуральных экспериментов было выяснено, что сворачивание линзы Ротмана практически не влияет на ее S-параметры.

1-й и 12-й элементы используются исключительно для имитации периодичности антенной решетки. Период решетки – 75 мм. В азимутальном секторе от –45 до 45 град. с помощью линзы Ротмана формируются 10 лепестков



Рис. 1. Натурные испытания приемо-передающей антенной системы для перспективной базовой станции сотовой связи диапазона 1,8–1,88 ГГц

Fig. 1. Full-scale tests of a receiving-transmitting antenna system for a promising base station of cellular communications in the range of 1,8–1,88 GHz

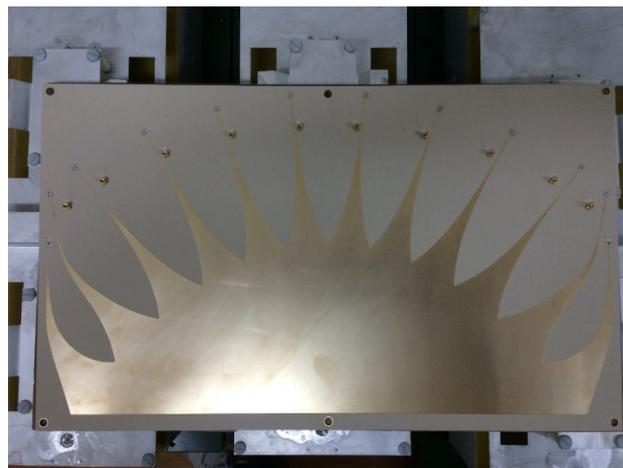


Рис. 2. Линейная эквидистантная антенная решетка из 12 щелевых излучателей с директорами в виде прямоугольных металлических пластин

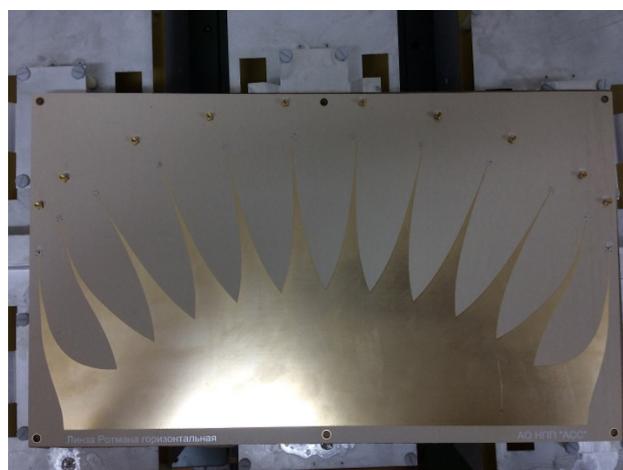
Fig. 2. Linear equidistant antenna array of 12 slot radiators with directors in the form of rectangular metal plates

## 1. Проектирование антенной решетки

При проектировании антенной решетки основными критериями оптимизации являлось высокое качество согласования элементов с фидерными линиями при отклонении луча в азимутальном секторе  $\pm 45^\circ$  в полосе рабочих частот от 1,8 до 1,88 ГГц, а также сохранение формы и параметров диаграмм направленности элементов в составе решетки. Данные меры направлены на предотвращение появления ослепления антенной решетки. Для выравнивания диаграмм направленности крайних элементов и улучшения их входных характеристик были использованы по одному дополнительному элементу, расположенные по обе стороны от антенной решетки, запитанной с помощью линзы Ротмана. Данная мера может рассматриваться как имитация периодичности антенной решетки. Общее число элементов решетки



а



б

Рис. 3. Линза Ротмана, использованная для формирования 10 лепестков в азимутальном секторе от  $-45$  до  $45$  град. Линза сложена пополам для уменьшения размеров (состоит из 3 слоев металла, средний из которых – земля); участок с принудительным преломлением выполнен с использованием фазостабильных коаксиальных кабелей: а – 10 центральных портов линзы подключаются к приемо-передающему устройству, 2 боковых порта подключены к согласованным нагрузкам; б – 10 центральных портов линзы подключаются к антенным элементам, 2 боковых порта подключены к согласованным нагрузкам

Fig. 3. Rothman lens used to form 10 lobes in the azimuthal sector from  $-45$  to  $45$  degrees. The lens is folded in half to reduce size (consists of 3 layers of metal, the middle of which is earth); section with forced refraction is made using phase-stable coaxial cables: а – 10 central ports of the lens are connected to the transceiver, 2 side ports are connected to matched loads; б – 10 central lens ports are connected to antenna elements, 2 side ports are connected to matched loads

было выбрано равным 12; от линзы Ротмана запитывалось 10 элементов решетки. Период решетки 75 мм был выбран немного меньшим половины длины волны на самой высокой частоте рабочего диапазона 1,88 ГГц.

На рис. 4 приведены 10 лепестков диаграммы направленности антенной системы, показанной на рис. 1, на частоте 1,88 ГГц. Максимальный уровень боковых лепестков в азимутальной

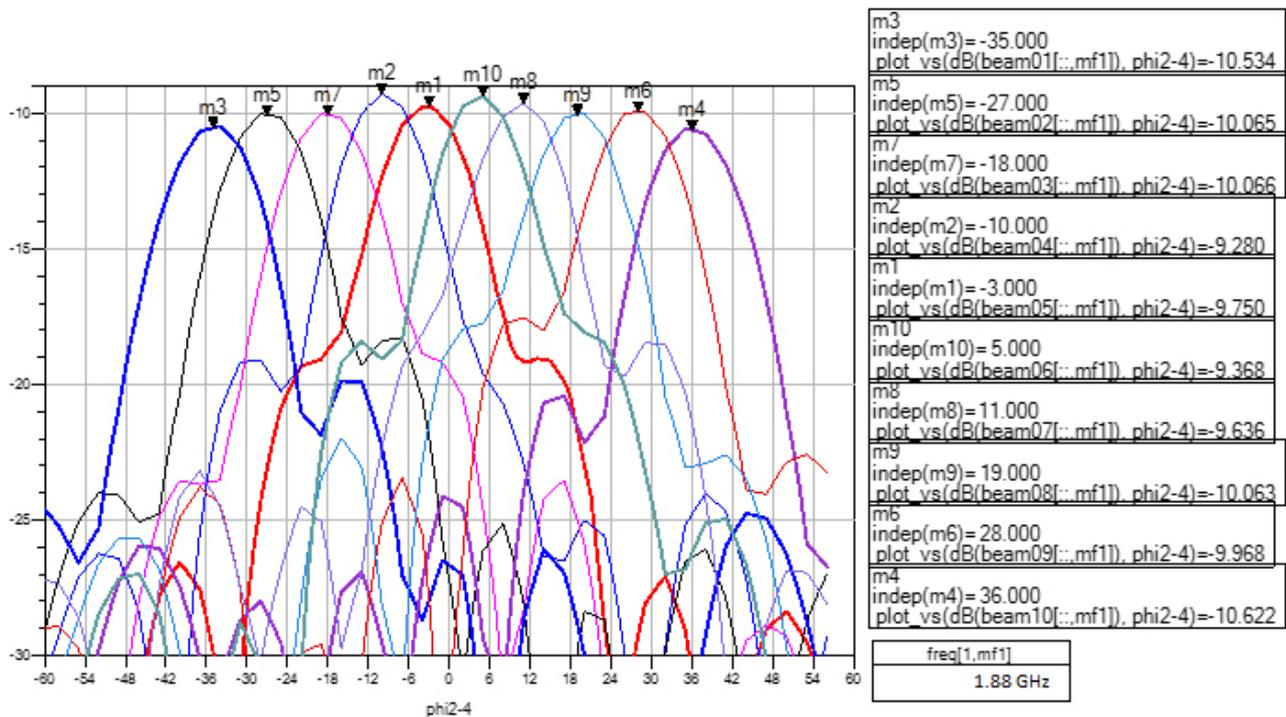


Рис. 4. Экспериментально измеренные 10 лепестков многолучевой антенной системы на основе линейной антенной решетки из 12 элементов (из которых средние 10 элементов используются для диаграммоформирования, а 1-й и 12-й элементы – для имитации периодичности решетки), частота измерения – 1,88 ГГц. По оси ординат отложен уровень сигнала в дБ относительно измерительной пирамидальной рупорной антенны

Fig. 4. Experimentally measured 10 lobes of a multi-beam antenna system based on a linear antenna array of 12 elements (of which the middle 10 elements are used for diagram formation, and the 1st and 12th elements are used to simulate the periodicity of the array), the measurement frequency is 1,88 GHz. The ordinate is the signal level in dB relative to the measuring pyramidal horn antenna

плоскости – около  $-8,5$  дБ. На краях азимутального сектора  $\pm 45^\circ$  уровень сигнала на верхней частоте составляет приблизительно  $-5,5$  дБ от максимального уровня сигнала, соответствующего направлению нормали к антенной решетке.

На рис. 5 представлены результаты моделирования трех электродинамических структур, состоящих из точечных излучателей:

1 – модели реальной антенной решетки, состоящей из 10 эквидистантных точечных излучателей с диаграммами направленности, соответствующими диаграмме направленности элемента Гюйгенса, они расположены с периодом 75 мм;

2 – модели интерполяционной виртуальной антенной решетки той же протяженности, как в модели реальной антенной решетки, но состоящей из 100 пространственных отсчетов в виде элементов Гюйгенса (в 10 раз больше, чем число элементов реальной антенной решетки) с периодом расположения 7,5 мм (в 10 раз меньше, чем период реальной антенной решетки);

3 – модели экстраполяционной антенной решетки, состоящей из 15 пространственных отсчетов в виде элементов Гюйгенса с периодом 75 мм, протяженность которой в 1,5 раза больше, чем протя-

женность модели реальной антенной решетки, периоды реальной и экстраполяционной антенных решеток одинаковые.

Для формирования интерполяционной антенной решетки применялся метод кубической сплайн-интерполяции [10]. Для формирования экстраполяционной решетки использовался метод линейного предсказания Берга (Burg) [11]. Амплитудное распределение во всех вышеупомянутых случаях было выбрано равномерным.

На рис. 5 изображены нормированные диаграммы направленности на частоте 1,88 ГГц: сплошные линии – физической («реальной») антенной решетки, состоящей из 10 элементов, расположенных с периодом 75 мм; точки – интерполяционная «виртуальная» антенная решетка, состоящая из 100 пространственных отсчетов с периодом 7,5 мм (местоположение первого и последнего пространственных отсчетов совпадает с местоположением центров излучения 2-го и 11-го элементов антенной решетки); штриховые линии – экстраполяционная антенная решетка, состоящая из 15 пространственных отсчетов с периодом 75 мм (местоположение 1-го и 10-го пространственных отсчетов совпадает с местоположением 2-го

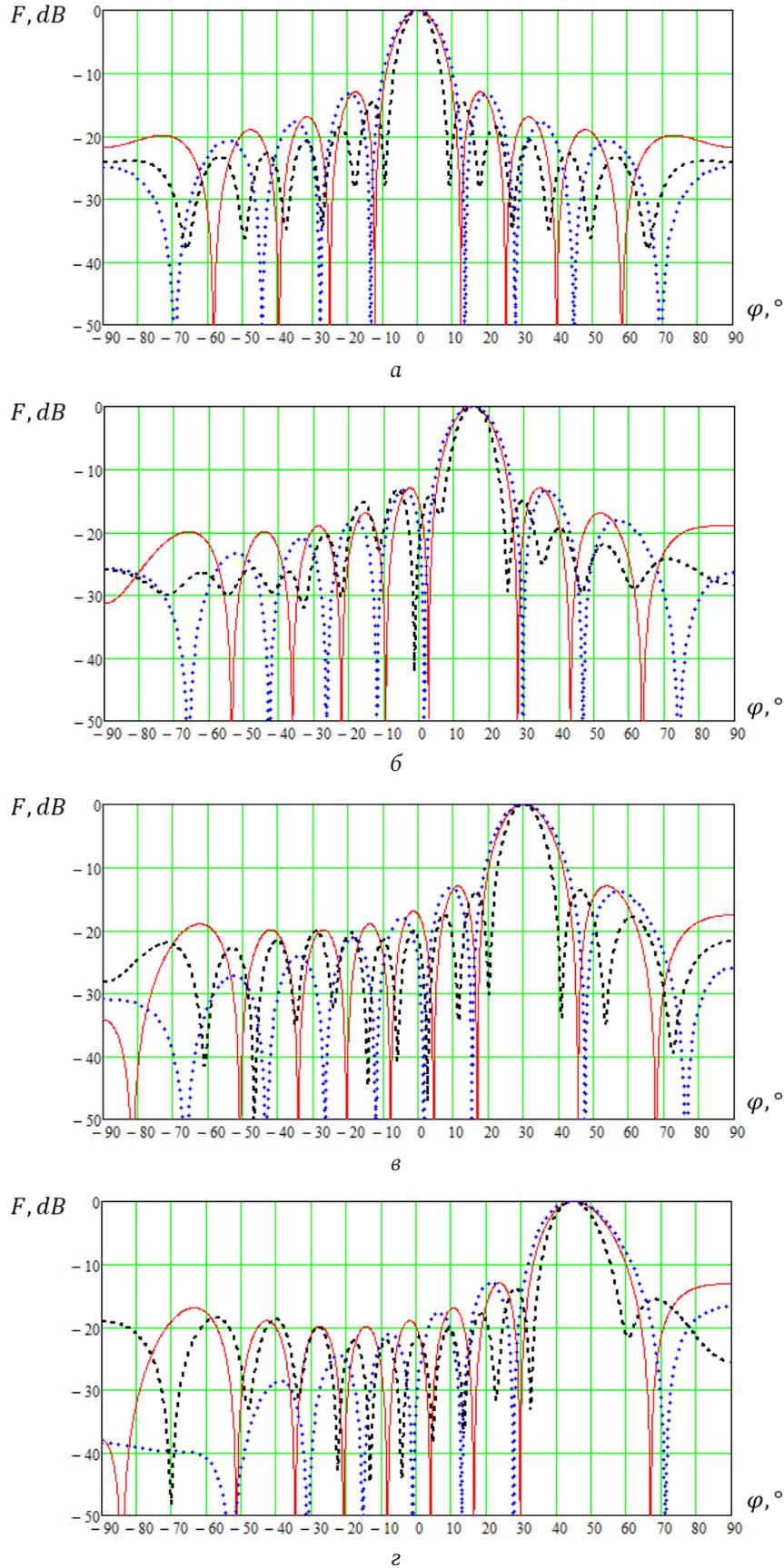
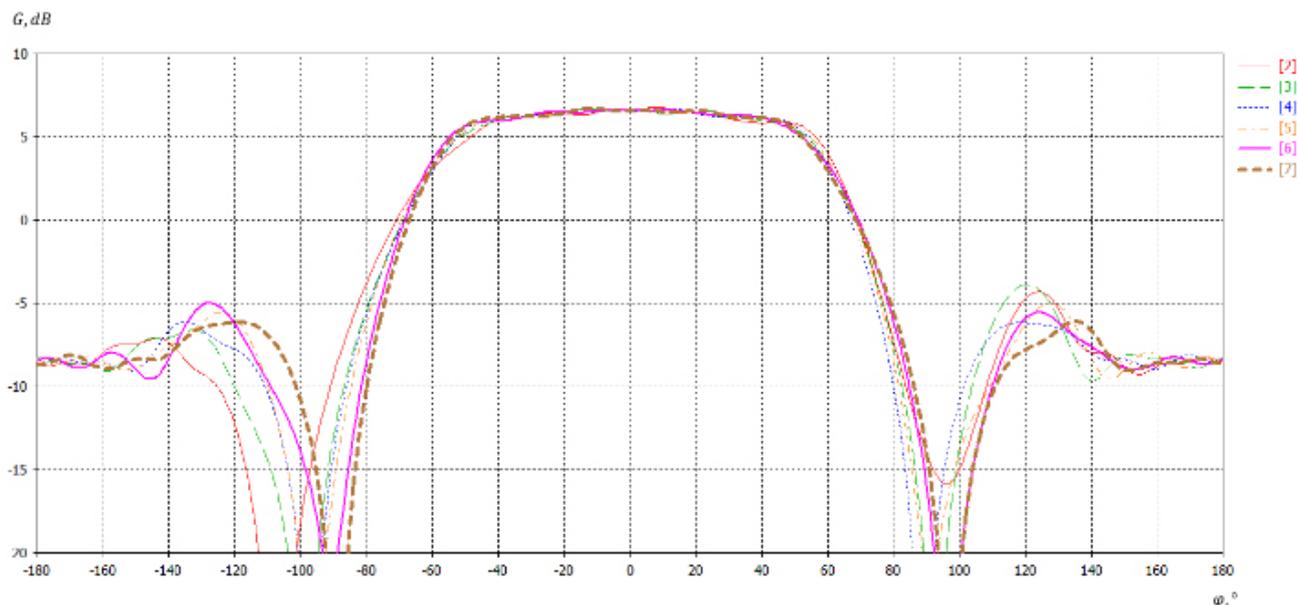
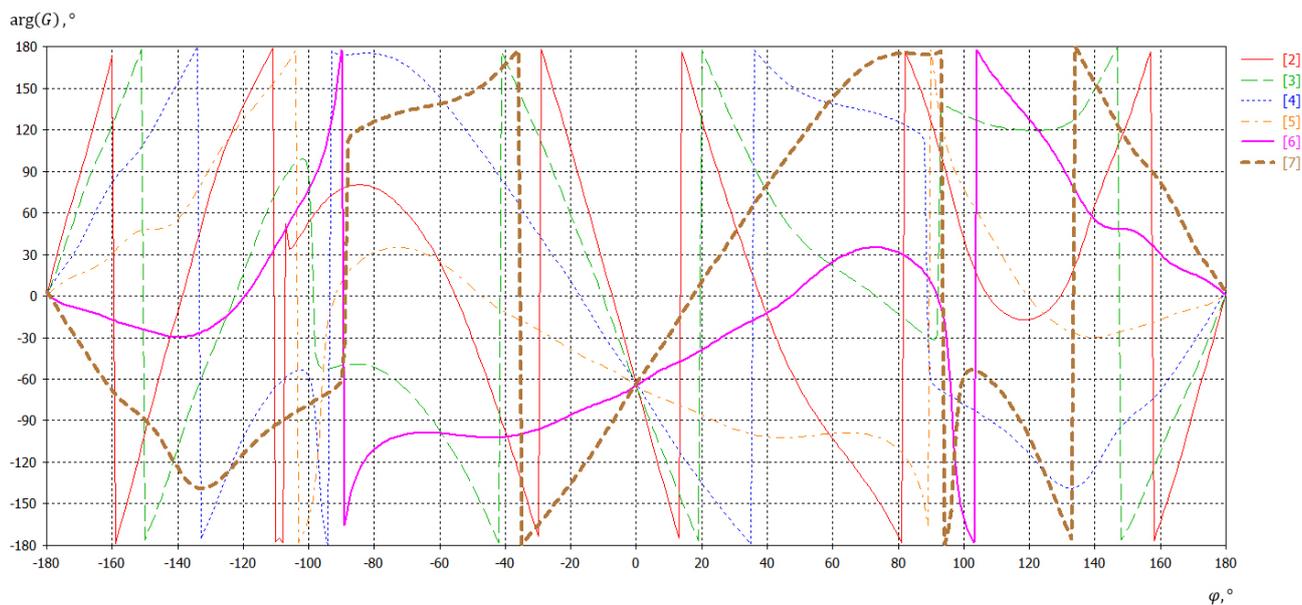


Рис. 5. Нормированные диаграммы направленности на частоте 1,88 ГГц: сплошные линии – физической («реальной») антенной решетки, штриховые линии – экстраполяционная антенная решетка: *a* –  $\varphi_0 = 0^\circ$ ; *б* –  $\varphi_0 = 15^\circ$ ; *в* –  $\varphi_0 = 30^\circ$ ; *г* –  $\varphi_0 = 45^\circ$   
 Fig. 5. Normalized radiation patterns at a frequency of 1,88 GHz: solid lines – physical («real») antenna array, dashed lines – extrapolation antenna array: *a* –  $\varphi_0 = 0^\circ$ ; *б* –  $\varphi_0 = 15^\circ$ ; *в* –  $\varphi_0 = 30^\circ$ ; *г* –  $\varphi_0 = 45^\circ$



а



б

Рис. 6. Амплитудные (а) и фазовые (б) диаграммы направленности 2-го – 7-го элементов, находящихся в составе антенной решетки из 12 элементов, в азимутальной плоскости для  $\theta$ -компоненты электрического поля  
 Fig. 6. Amplitude (a) and phase (b) directional diagrams of the 2nd – 7th elements, which are part of an antenna array of 12 elements, in the azimuthal plane, for the  $\theta$ -component of the electric field

и 11-го элементов антенной решетки, местоположение 11-го пространственного отсчета совпадает с местоположением 12-го элемента антенной решетки (сигнал с выхода которого не используется при формировании диаграммы направленности; 1-й и 12-й элементы «реальной» антенной решетки используются для имитации периодичности антенной решетки).

Из рис. 5 следует, что использование интерполяционной антенной решетки позволяет уменьшить коэффициент рассеяния мощности в боковых лепестках;

при этом ширина главного лепестка незначительно увеличивается. Использование экстраполяционной виртуальной антенной решетки позволяет сузить главный лепесток диаграммы направленности пропорционально увеличению протяженности решетки относительно реальной антенной решетки, а также уменьшить уровень боковых лепестков и снизить коэффициент рассеяния мощности в боковых лепестках при отклонении главного лепестка от нормали в пределах  $\pm 45^\circ$  относительно нормали.

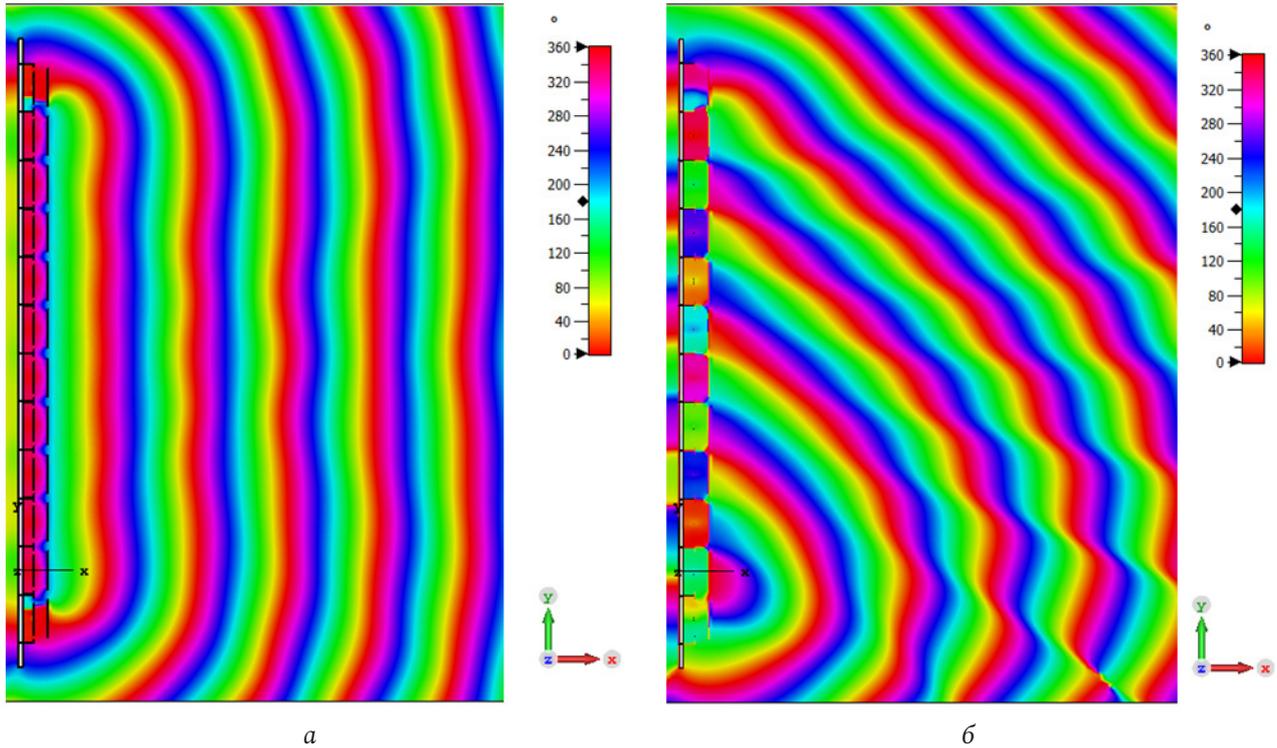


Рис. 7. Распределение фазы  $E_0$  компоненты поля (основной поляризации) вблизи антенной решетки при излучении по нормали к решетке (а) и под углом 45 градусов от нормали к решетке (б), частота 1,88 ГГц  
Fig. 7. Distribution of the phase  $E_0$  of the field component (main polarization) near the antenna array when emitted along the normal to the array (a) and at an angle of 45 degrees from the normal to the array (b), frequency 1,88 GHz

## 2. Численное электродинамическое моделирование

Путем численного электродинамического моделирования было выяснено, что фазовые диаграммы направленности элементов, находящихся в составе антенной решетки, сильно зависят от местоположения излучателя в решетке, поэтому при формировании интерполяционных и экстраполяционных антенных решеток необходимо измеренные комплексные амплитуды сигналов на выходах антенной решетки умножать на калибровочные множители  $10^{-G/10} e^{-i \arg(G)}$ , рис. 6.

При совместной запитке элементов антенной решетки, соответствующей направлению максимума ее излучения в требуемом направлении (линейный закон изменения фазы напряжений на элементах антенной решетки), пространственное распределение фазы поля в ближней зоне выравнивается (рис. 7), несмотря на то что фазовые диаграммы направленности элементов, находящихся в составе антенной решетки, могут весьма быстро изменяться даже в пределах главного лепестка амплитудной диаграммы направленности элементов, как это видно из рис. 6.

Применение экстраполяционной «виртуальной» антенной решетки позволяет разрешить источники радиоизлучения, угловое расстояние между ко-

торыми меньше ширины главного лепестка диаграммы направленности физической («реальной») антенной решетки, т. е. источники, не разрешимые по критерию Релея.

На рис. 8 показан пример разрешения двух источников радиоизлучения, не разрешимых «реальной» антенной решеткой. Параметры источников были выбраны следующими. 1-й источник: амплитуда 1, начальная фаза 45 град., азимут 0 град., частота 1,88 ГГц. 2-й источник: амплитуда 1,5, начальная фаза 0 град., азимут -15 град., частота 1,88 ГГц: сплошные линии – физическая («реальная») антенная решетка, состоящая из 10 элементов, расположенных с периодом 75 мм; штриховые линии – экстраполяционная антенная решетка, состоящая из 15 пространственных отсчетов с периодом 75 мм

В «реальной» антенной решетке для разрешения двух вышеупомянутых источников использовалось 10 центральных элементов, расположенных с периодом 75 мм. Экстраполяционная «виртуальная» антенная решетка состояла из 15 пространственных отсчетов поля, расположенных с периодом 75 мм.

## Заключение

Таким образом, в настоящей работе показано, что при функционировании антенной системы

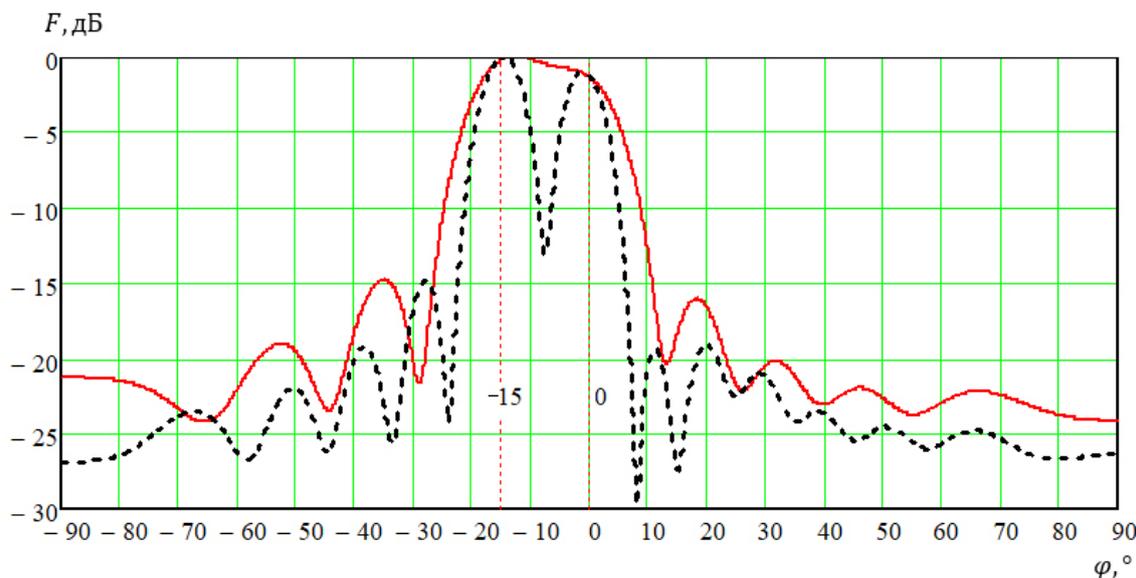


Рис. 8. Зависимость плотности распределения мощности источников радиоизлучения от азимута для двух источников радиоизлучения

Fig. 8. Dependence of the distribution density of the power of radio sources on the azimuth for two radio sources

в приемном режиме, формирование дополнительных пространственных отсчетов поля, которые могут рассматриваться как элементы «виртуальной» антенной решетки, можно использовать для уменьшения уровня боковых лепестков (интерполяционная и экстраполяционная «виртуальные» антенные решетки, число сформированных дополнительных пространственных отсчетов поля в которых больше числа элементов физической антенной решетки) и для увеличения коэффициента направленного действия приемной антенной

системы, что может использоваться для разрешения источников радиоизлучения, не разрешимых «реальной» антенной решеткой (экстраполяционная «виртуальная» антенная решетка, число сформированных дополнительных пространственных отсчетов поля в которой больше числа элементов физической антенной решетки).

### Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10109).

### Список литературы

1. Compact base station antenna based on image theory for UWB/5G RTLS embraced smart parking of driverless cars / A. Sharif [et al.] // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 180898–180909. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959130>
2. A cost-effective wideband switched beam antenna system for a small cell base station / P.I. Bantavis [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66, No. 12. P. 6851–6861. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2874494>
3. Lu S., Wang Z. Training optimization and performance of single cell uplink system with massive-antennas base station // IEEE Transactions on Communications. 2019. Vol. 67, No. 2. P. 1570–1585. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2876416>
4. Kang Y., Min M. Unified derivation of optimal feedback rate in downlink cellular systems with multi-antenna base stations // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 161871–161886. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951586>
5. 5G cellular and fixed satellite service spectrum coexistence in C-band / E. Lagunas [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 72078–72094. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985012>
6. Technologies for efficient amateur drone detection in 5G millimeter-wave cellular infrastructure / D. Solomitckii [et al.] // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56, No. 1. P. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700450>
7. From 2G to 5G spatial modeling of personal RF-EMF exposure within urban public trams / M. Celaya-Echarri [et al.] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 100930–100947. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997254>
8. Kumar V., Mehta N.B. Modeling and analysis of differential CQI feedback in 4G/5G OFDM cellular systems // IEEE Transactions on Wireless Communications. 2019. Vol. 18, no. 4. P. 2361–2373. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2903047>
9. MatSing – RF Lens Technologies. URL: <https://matsing.com>
10. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
11. Burg J.P. A new analysis technique for time series data // NATO Adv. Study Inst. on Signal Processing, Enschede, Netherlands, 1968; reprinted in Modern Spectrum Analysis (D.G. Childers, ed.), New York: IEEE Press, 1978. P. 42–48.

## References

1. Sharif A. et al. Compact base station antenna based on image theory for UWB/5G RTLS embraced smart parking of driverless cars. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 180898–180909. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959130>
2. Bantavis P.I. et al. A cost-effective wideband switched beam antenna system for a small cell base station. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 12, pp. 6851–6861. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2874494>
3. Lu S., Wang Z. Training optimization and performance of single cell uplink system with massive-antennas base station. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, vol. 67, no. 2, pp. 1570–1585. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2018.2876416>
4. Kang Y., Min M. Unified derivation of optimal feedback rate in downlink cellular systems with multi-antenna base stations. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 161871–161886. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2951586>
5. Lagunas E. et al. 5G cellular and fixed satellite service spectrum coexistence in C-band. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 72078–72094. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2985012>
6. Solomitckii D. et al. Technologies for efficient amateur drone detection in 5G millimeter-wave cellular infrastructure. *IEEE Communications Magazine*, 2018, vol. 56, no. 1, pp. 43–50. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1700450>
7. Celaya-Echarri M. et al. From 2G to 5G spatial modeling of personal RF-EMF exposure within urban public trams. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 100930–100947. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997254>
8. Kumar V., Mehta N.B. Modeling and analysis of differential CQI feedback in 4G/5G OFDM cellular systems. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, vol. 18, no. 4, pp. 2361–2373. DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2903047>
9. MatSing – RF Lens Technologies. URL: <https://matsing.com>
10. Kalitkin N.N. Numerical Methods. Moscow: Nauka, 1978, 512 p. (In Russ.)
11. Burg J.P. A new analysis technique for time series data. NATO Adv. Study Inst. on Signal Processing, Enschede, Netherlands, 1968; reprinted in Modern Spectrum Analysis (D.G. Childers, ed.), New York: IEEE Press, 1978, pp. 42–48.

## Physics of Wave Processes and Radio Systems 2021, vol. 24, no. 2, pp. 79–87

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.2.79-87

Received 19 October 2020  
Accepted 23 November 2020

### Formation of additional virtual reception channels when processing signals at the outputs of elements of the antenna array of a promising cellular base station

Alexander A. Bolkunov<sup>1</sup>, Leonid A. Ovcharenko<sup>1</sup>, Yuri G. Pasternak<sup>2</sup>,  
Vladimir A. Pendyurin<sup>3</sup>, Igor V. Popov<sup>4</sup>, Fyodor S. Safonov<sup>2</sup>, Sergey M. Fedorov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> JSC «STC EW»29, bldg. 135, Vereiskaya Street,  
Moscow, 121357, Russia<sup>2</sup> Voronezh State Technical University84, 20-letiya Oktyabrya Street,  
Voronezh, 394006, Russia<sup>3</sup> JSC NPP «Automated communication systems»108, Peshe-Streletskaya Street,  
Voronezh, 394062, Russia<sup>4</sup> JSC «Concern “Sozvezdie”»14, Plekhanovskaya Street,  
Voronezh, 394018, Russia

*Abstract* – The results of research on the layout of the antenna array for a promising cellular base station in the frequency range 1,8–1,88 GHz, which includes a linear antenna array of 12 slotted elements with rectangular directors, the diagram – forming scheme of which uses a modification of the Rotman lens, characterized in that for the sake of reducing its overall dimensions, the lens is folded in half – the earth is located in the center, and on both sides of it – the halves of the lens body with exponential strip transformers. It is shown that to reduce the level of the side lobes of the antenna system in the reception mode, interpolation and extrapolation antenna arrays can be used. An extrapolation array can also be formed in order to increase the directional coefficient of the receiving antenna system and resolve radio sources that are not resolved by the «real» antenna array.

*Keywords* – antenna array; base station; cellular communication; Rotman lens; directional coefficient.

## Информация об авторах

**Болкунов Александр Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, директор Центра системных исследований и разработок филиала АО «НТЦ РЭБ», г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* электродинамика и техника СВЧ в области радиоэлектронной борьбы.

*E-mail:* ntc\_reb@mail.ru

**Овчаренко Леонид Александрович**, доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией Центра системных исследований и разработок филиала АО «НТЦ РЭБ», г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* электродинамика и техника СВЧ в области радиоэлектронной борьбы.

*E-mail:* ntc\_reb@mail.ru

**Пастернак Юрий Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* электродинамика и техника СВЧ.

*E-mail:* pasternakyg@mail.ru

**Пендюрин Владимир Андреевич**, генеральный директор АО НПП «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* электродинамика и техника СВЧ.

*E-mail:* infonpp-acc.ru@yandex.ru

**Попов Игорь Владимирович**, ведущий научный сотрудник АО «Концерн “Созвездие”».

*Область научных интересов:* электродинамика и техника СВЧ.

*E-mail:* bvi@sozvezdie.ru

**Сафонов Фёдор Сергеевич**, аспирант кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, директор регионального консультационного центра «ОПОРА», г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* электродинамика и техника СВЧ.

*E-mail:* safonov\_fedia93@mail.ru

**Федоров Сергей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* электродинамика и техника СВЧ.

*E-mail:* fedorov\_sm@mail.ru

## Information about the Authors

**Alexander A. Bolkunov**, Candidate of Technical Sciences, associate professor, director of the Center for System Research and Development – a branch of JSC STC EW, Voronezh, Russia.

*Research interests:* electrodynamics and microwave technology in the field of electronic warfare.

*E-mail:* ntc\_reb@mail.ru

**Leonid A. Ovcharenko**, Doctor of Technical Sciences, associate professor, head of the laboratory of the Center for System Research and Development – a branch of JSC «STC EW», Voronezh, Russia.

*Research interests:* electrodynamics and microwave technology in the field of electronic warfare.

*E-mail:* ntc\_reb@mail.ru

**Yuri G. Pasternak**, Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the Department of Radio-Electronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

*Research interests:* electrodynamics and microwave technology.

*E-mail:* pasternakyg@mail.ru

**Vladimir A. Pendyurin**, director general of JSC NPP «Automated communication systems», Voronezh, Russia.

*Research interests:* electrodynamics and microwave technology.

*E-mail:* infonpp-acc.ru@yandex.ru

**Igor V. Popov**, leading researcher at JSC «Concern “Sozvezdie”», Voronezh, Russia.

*Research interests:* electrodynamics and microwave technology.

*E-mail:* bvi@sozvezdie.ru

**Fyodor S. Safonov**, post-graduate student of the Department of Radio-Electronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Director of the regional consulting center «ОПОРА», Voronezh, Russia.

*Research interests:* electrodynamics and microwave technology.

*E-mail:* safonov\_fedia93@mail.ru

**Sergey M. Fedorov**, Candidate of Technical Sciences, associate professor of the Department of Radio-Electronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

*Research interests:* electrodynamics and microwave technology.

*E-mail:* fedorov\_sm@mail.ru