

## Печатная 8-лучевая фазированная антенная решетка на основе матрицы Батлера с модифицированными фазовращателями и излучателями дипольного вида с концевым питанием

С. А. Алексейцев, А. П. Горбачев, Ю. Н. Паршин<sup>✉</sup>

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>✉</sup> [jurparmik@mail.ru](mailto:jurparmik@mail.ru)

### Аннотация

**Введение.** Представлены сравнительные результаты электродинамического моделирования и натурных измерений в безэховой камере опытного образца печатной 8-лучевой фазированной антенной решеткой на основе матрицы Батлера. Приведена математическая модель модифицированного дифференциального фазовращателя, защищенного патентом Российской Федерации и характеризующегося наибольшей на сегодняшний день широкополосностью. Предложена и охарактеризована топология инновационного излучателя дипольного вида с концевым питанием.

**Цель работы.** Проектирование на основе системного подхода 8-лучевой антенной решетки, моделирование ее основных электродинамических характеристик и сравнение с результатами натурных экспериментов.

**Материалы и методы.** В качестве методов для проектирования электродинамических моделей элементов и узлов диаграммообразующей схемы, а также излучателя используются метод наводимых электродвижущих сил, математические основы проектирования микрополосковой техники, процедуры электродинамического моделирования элементов и узлов микроволновой техники и СВЧ-устройств. В качестве материалов служит отечественный диэлектрический материал ФАФ-4Д с относительной диэлектрической проницаемостью 2.5.

**Результаты.** Экспериментально получены характеристики согласования и направленности 8-лучевой антенной решетки, и осуществлено их сравнение с результатами полноволнового электродинамического моделирования. В результате в полосе частот 2.02...2.37 ГГц наблюдается приемлемое совпадение измеренных и смоделированных результатов по положениям лучей, интенсивностям кроссполяризации, коэффициентам отражения и развязке между входами матрицы Батлера – не хуже –15 дБ.

**Заключение.** Проектирование и финальная доработка фазированных антенных решеток с улучшенными электродинамическими характеристиками при учете отечественных конструкторско-технологических норм и требований позволит создать предпосылки для качественного увеличения тактико-технических показателей приемопередающих устройств в целом, а также системно отработать процедуры синтеза таких решеток и их отдельных узлов.

**Ключевые слова:** фазированная решетка, многолучевой режим работы, матрица Батлера, диаграмма направленности, коэффициент отражения, кроссполяризация, технология печатных плат

**Для цитирования:** Алексейцев С. А., Горбачев А. П., Паршин Ю. Н. Печатная 8-лучевая фазированная антенная решетка на основе матрицы Батлера с модифицированными фазовращателями и излучателями дипольного вида с концевым питанием // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 1. С. 30–39. doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-30-39

---

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Источник финансирования.** Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20048 (<https://rscf.ru/project/24-29-20048/>), а также при финансовой поддержке Правительства Новосибирской области, соглашение № р-77.

Статья поступила в редакцию 07.06.2025; принята к публикации после рецензирования 16.09.2025; опубликована онлайн 27.02.2026

---



## Printed Butler Matrix Based Eight-Beam Phased Array with Modified Phasers and End-Fed Dipole-Like Radiators

Sergey A. Alekseytsev, Anatoly P. Gorbachev, Yuriy N. Parshin✉

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

✉ jurparmik@mail.ru

### Abstract

**Introduction.** This paper presents comparative results of electrodynamic modeling and field measurements in an anechoic chamber of a prototype of a printed eight-beam phased antenna array based on the Butler matrix. A mathematical model of a modified differential phase shifter protected by a patent of the Russian Federation and characterized by the highest broadband to date is presented. The topology of an innovative dipole-type radiator with end feeding is proposed and characterized.

**Aim.** To design an eight-beam antenna array based on a systems approach, to model its main electrodynamic characteristics, and to compare them with the results of full-scale experiments.

**Materials and methods.** Electrodynamic models of elements and units of the diagram-forming circuit, as well as the emitter, were designed using the method of induced electromotive forces, mathematical foundations of designing microstrip technologies, procedures for electrodynamic modeling of elements and units of microwave technology and microwave devices. The FAF-4D domestic dielectric material with a relative permittivity of 2.5 was used.

**Results.** The characteristics of the matching and directivity of the eight-beam antenna array were obtained followed by their comparison with the results of full-wave electrodynamic modeling. As a result, in the frequency band of 2.02...2.37 GHz, an acceptable coincidence of the measured and modeled results is observed for the positions of the beams, cross-polarization intensities, reflection coefficients, and decoupling between the Butler matrix inputs of no worse than 15 dB.

**Conclusion.** The design and final refinement of phased antenna arrays with improved electrodynamic characteristics, taking domestic design and technological standards into account, will form a basis for a qualitative increase in the tactical and technical performance of transceiver devices as a whole, allowing procedures for synthesizing such arrays and their individual units to be developed.

**Keywords:** phased array, multi-beam mode, Butler matrix, radiation pattern, reflection coefficient, crosspolarization, printed circuit board technology

**For citation:** Alekseytsev S. A., Gorbachev A. P., Parshin Yu. N. Printed Butler Matrix Based Eight-Beam Phased Array with Modified Phasers and End-Fed Dipole-Like Radiators. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 1, pp. 30–39.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-1-30-39

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Source of funding.** The study was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 24-29-20048 (<https://rscf.ru/project/24-29-20048/>), as well as with the financial support of the Government of the Novosibirsk Region, agreement No. p-77.

Submitted 07.06.2025; accepted 16.09.2025; published online 27.02.2026

**Введение.** Многолучевые фазированные решетки на основе матрицы Батлера являются неотъемлемой частью многих современных проектов микроволновой связи [1–3]. Все эти решетки начинаются с пионерских работ [4, 5]. Впоследствии были созданы матрицы Батлера [6–8], которые подходят для питания 8-лучевых решеток. Видное место среди них занимают печатные решетки, когда в качестве ключевого из-

лучающего компонента используется ординарный центрально-питаемый диполь (ДЦП) [9, 10] вместе с соответствующим симметрирующим устройством (balance unit – balun). Все эти фазированные решетки являются удачными решениями с точки зрения диаграмм направленности, рабочей полосы частот, линейности поляризации, малых входных коэффициентов отражения, приемлемых массы и стоимости и т. д.

Печатная 8-лучевая фазированная антенная решетка на основе матрицы Батлера

с модифицированными фазовращателями и излучателями дипольного вида с концевым питанием

Printed Butler Matrix Based Eight-Beam Phased Array with Modified Phasers and End-Fed Dipole-Like Radiators

Классические печатные решетки на основе диполей требуют подачи напряжений/токов на входные клеммы ДЦП, расположенные близко друг к другу на диэлектрической подложке. Это вызывает сгущение подводящих полосковых/микростриповых линий в центре подложки, увеличивает плотность трассировки, ведет к потерям в проводниках и диэлектриках, а также сказывается на возрастании входного коэффициента отражения и снижении усиления и линейности поляризации излучения в направлении главного лепестка.

В [11] представлен инновационный диполь с концевым питанием (ДКП), улучшающий свойства излучения антенн [12, 13]. Его реализация на печатной плате позволяет выпрямить подводящие полосковые линии и использовать различные делители мощности.

В данной статье предлагается 8-лучевая фазированная решетка на основе матрицы Батлера с дифференциальными фазовращателями [14] и модифицированными излучателями с концевым питанием [15]. Фазовращатель работает в максимально широкой на сегодняшний день полосе частот, улучшая качество излучения как в одно-, так и в двухдиапазонном режиме. Модифицированный ДКП повышает усиление каждого луча.

**Материалы и методы.** Проектирование дифференциального фазовращателя. В отличие от ординарного фазовращателя Шиффмана [16] (рис. 1, а) описываемый фазовращатель характеризуется непосредственным соединением короткой перемычкой выходов вторичной связанной линии классического направленного ответвителя с квадратурной связью (рис. 1, б). Это позволяет существенно изменить поведение вносимой фазочастотной характеристики такого фазовращателя [14], что приводит к максимально широкой полосе частот формирова-

ния дифференциального фазового сдвига среди всех фазовращателей, включая работу [17]. При практической реализации описанного фазовращателя (рис. 1, б) необходимо сначала разместить связанные линии ответвителя на разных сторонах тонкой диэлектрической пленки. Затем эти линии следует свернуть в вытянутое прямоугольное кольцо [14]. В результате, в отличие от фазовращателя [16], реализация такого фазовращателя на печатной плате не будет содержать никаких металлизированных переходных отверстий через диэлектрическую пленку вблизи связанных линий. Это обстоятельство во многих случаях рассматривается как существенное преимущество при последующей компоновке, связанной с внутренним содержанием матрицы Батлера.

Поскольку в ранее опубликованной работе [14] отсутствовал подробный расчет передаточной функции, связанной с фазовращателем, изображенным на рис. 1, б, целесообразно представить его в более компактной и наглядной форме.

Рассмотрим классический направленный ответвитель без потерь с обозначениями плеч 1', 2', 3', 4' (рис. 1, б, розовая окраска), имеющий матрицу рассеяния [18]:

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & 0 & S_{14} \\ S_{12} & 0 & S_{14} & 0 \\ 0 & S_{14} & 0 & S_{12} \\ S_{14} & 0 & S_{12} & 0 \end{bmatrix},$$

где  $S_{12} = jk \sin \theta / (\sqrt{1-k^2} \cos \theta + j \sin \theta)$ ;  $S_{14} = \sqrt{1-k^2} / (\sqrt{1-k^2} \cos \theta + j \sin \theta)$ ;  $k = \sqrt{\frac{Z_{0e} + Z_0}{Z_{0e} - Z_0}}$  – коэффициент связи;  $Z_{0e}$  – четное волновое сопротивление связанного участка линии;

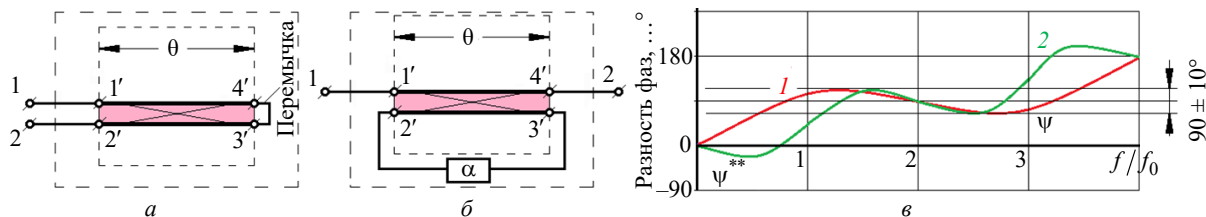


Рис. 1. Схемы фазовращателей и зависимости их разности фаз от частоты: а – фазовращатель Шиффмана; б – модифицированный дифференциальный фазовращатель; в – фазочастотная характеристика

Fig. 1. Phase shifter circuits and dependence of their phase difference on frequency: а – Schiffman phase shifter; б – modified differential phase shifter; в – phase-frequency characteristic

$Z_0 = \sqrt{Z_{0e}Z_{0o}}$  – сопротивление источника/нагрузки, относящееся к подводящим полосковым линиям ( $Z_{0o}$  – нечетное волновое сопротивление связанного участка линии);  $\theta = (\pi/2)(f/f_0)$  – электрическая длина сегмента связанной линии (рис. 1, б, розовая окраска);  $f$  – текущая частота в рабочей полосе частот;  $f_0$  – центральная/опорная частота, на которой  $\theta = \pi/2$ .

Далее, потребуем обязательного соединения плеч 2' и 3' обычной согласованной линией передачи (т. е. ее волновое сопротивление равно  $Z_0$ ) с электрической длиной  $\alpha \ll \theta$  (т. е. направленный ответвитель сложен в вытянутое узкое кольцо). Применяя методику, описанную в [19], можно найти матрицу рассеяния фазовращателя  $[Q]$  для нумерации плеч 1 и 2 (рис. 1, б):

$$[Q] = [S_{pp}] + [S_{pc}]([F] - [S_{cc}])^{-1}[S_{cp}],$$

$$\text{где } [S_{pp}] = \begin{bmatrix} 0 & S_{14} \\ S_{14} & 0 \end{bmatrix}; [F] = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}; [S_{pc}] =$$

$$= [S_{cp}] = \begin{bmatrix} S_{12} \exp(-j\alpha/2) & 0 \\ 0 & S_{12} \exp(-j\alpha/2) \end{bmatrix};$$

$$[S_{cc}] = \begin{bmatrix} 0 & S_{14} \exp(-j\alpha) \\ S_{14} \exp(-j\alpha) & 0 \end{bmatrix}.$$

Подставляя эти матрицы в матричное уравнение для  $[Q]$ , можно записать результат следующим образом:

$$[Q] = \begin{bmatrix} 0 & Q_{12} \\ Q_{21} & 0 \end{bmatrix};$$

$$Q_{12} = Q_{21} = S_{14} + \frac{S_{12}^2 \exp(-j\alpha)}{1 - S_{14} \exp(-j\alpha)}.$$

После этого можно изобразить разность фаз  $\psi$  между угловой функцией  $q_{12} = \text{tg}^{-1}[\text{Re}(Q_{12})/\text{Im}(Q_{12})]$  (другими словами,  $q_{12}$  обозначает фазовый сдвиг в канале матрицы Батлера, содержащем фазовращатель) и задержкой фазы  $\varphi_{\text{ref}}$ , внесенной в другой канал матрицы Батлера опорной линией с электрической длиной  $270^\circ$  на частоте  $f = 2f_0$ , т. е.  $\varphi_{\text{ref}}(f = 2f_0) = -270^\circ$ . Например, рис. 1, в ча-

стично воспроизводит график из [14, рис. 3, красная окраска] для описанного фазовращателя, где  $k = 0.885$  и  $\alpha \approx 0$  (т. е. вытянутое прямоугольное кольцо фазовращателя в соответствии с рис. 3 из [14] весьма тонкое). Видно, что кривая  $\psi = q_{12} - \varphi_{\text{ref}}$  похожа на часть равнопульсирующего полинома в полосе частот  $f = [0.6f_0 \dots 3.4f_0]$  с номинальной разностью фаз  $\psi_{\text{ном}} = 90^\circ$  и пульсацией  $\Delta\psi \approx \pm 10^\circ$ . Для полноты и сравнения на рис. 1, в также представлена кривая  $\psi^{**}$  (зеленая окраска), относящаяся к фазовращателю, предложенному в [17].

Забегая вперед, отметим, что значения  $\psi_{\text{ном}}$  и  $\Delta\psi$  выбраны из [14, 20] исходя из расчетных требований, относящихся ко всей фазированной решетке.

*Проектирование модифицированного многоэлементного излучателя дипольного вида с концевым питанием.* Названный излучатель был запатентован ранее в [11] и затем модифицирован в [15]. Модификация заключалась в параллельном соединении нескольких идентичных ДКП. Благодаря этому удалось увеличить общий коэффициент усиления модифицированного многоэлементного ДКП (МДКП). После этого была проведена нелинейная параметрическая оптимизация МДКП в [21]. При этом МДКП был реализован на российском диэлектрическом материале "ФАФ-4Д" (относительная диэлектрическая проницаемость 2.5;  $\text{tg } \delta = 0.005$  на частоте 10 ГГц), изначально покрытом медной фольгой с обеих сторон (рис. 2). Оптимизированные геометрические параметры МДКП были воспроизведены позднее в [22] с его характеристиками излучения, которые показали приемлемое соответствие между полноволновым 3D-моделированием [23] и измерениями.

*Проектирование фазированной антенной решетки.* Описанные выше компоненты были использованы для реализации 8-лучевой фазированной решетки на основе матрицы Батлера. Подробное описание процесса такого синтеза было представлено в [21]. Прокомментируем основные этапы процедуры синтеза с соответствующими иллюстрациями и дополнениями.

Прежде всего полезно представить общий вид макета антенны (рис. 3). Устройство пред-

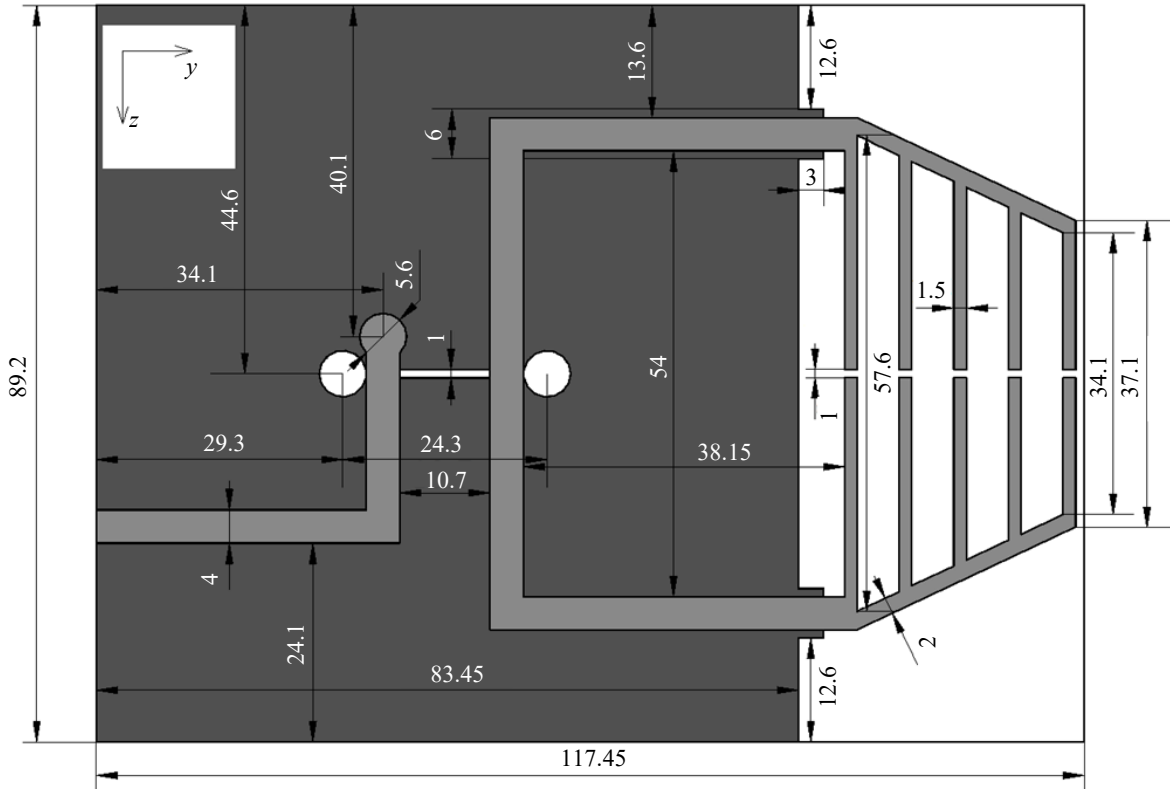


Рис. 2. Топология излучателя: светло-серая окраска – верхний слой; темно-серая – заземленный нижний металлический слой  
 Fig. 2. Radiator topology: light gray paint – top layer; dark gray – grounded lower metal layer

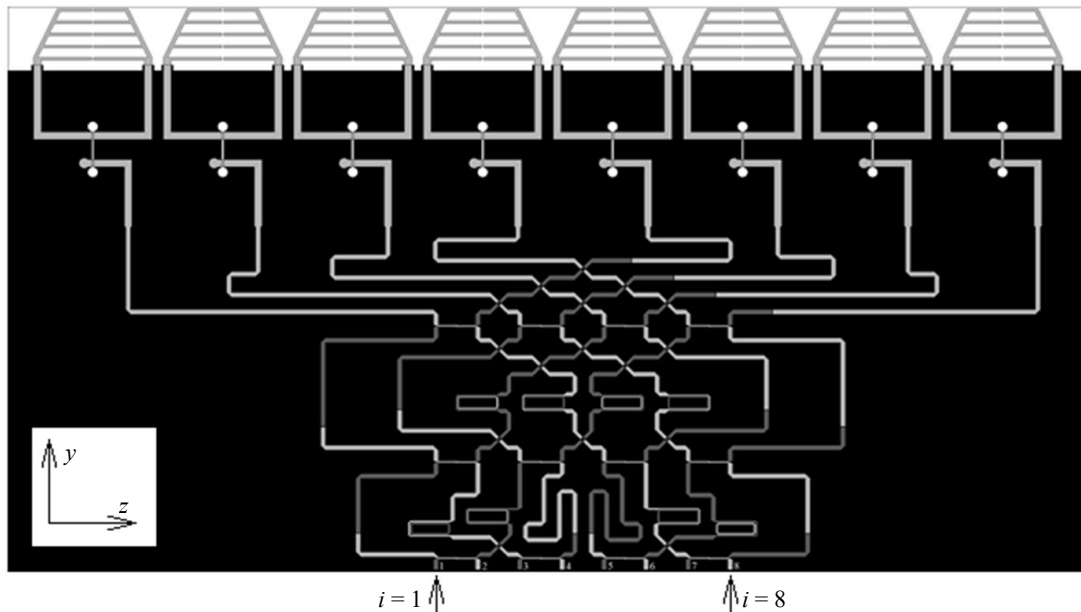


Рис. 3. Комбинированная топология 8-лучевой решетки  
 Fig. 3. Combined eight-beam array topology

ставляет собой сэндвич из трех плат "ФАФ-4Д", где между двумя листами металлизированного диэлектрика ( $h = 1.5$  мм) заключена диэлектрическая пленка ( $h = 0.3$  мм) с токопроводящим рисунком, выполненным методом

травления медной фольги с пробельных мест, при этом толщина фольги  $t_f = 0.035$  мм.

Диэлектрическая пленка (рис. 4, а) содержит: верхнюю часть матрицы Батлера вместе с излучающей верхней частью МДКП (рис. 2); ниж-

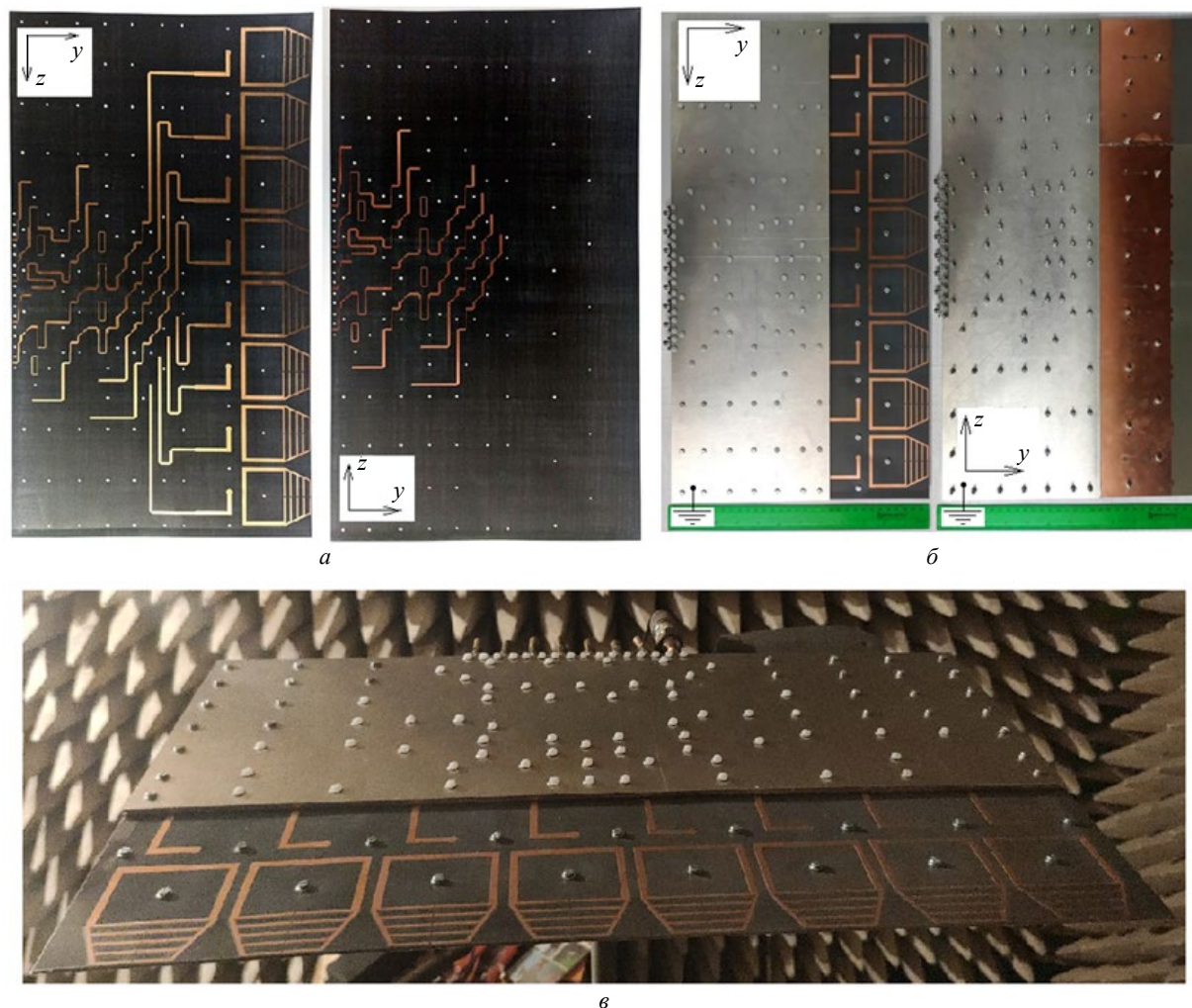


Рис. 4. Фотографии: а – металлические слои на тонкой пленке; б – обе стороны изготовленной решетки; в – изготовленная решетка внутри безэховой камеры

Fig. 4. Photos: а – metal layers on a thin film; б – both sides of the manufactured grating; в – manufactured grating inside an anechoic chamber

нюю часть матрицы. На нижней стороне первой толстой диэлектрической подложки ( $h = 1.5$  мм) расположены заземленные фрагменты (рис. 2) всех восьми излучателей. Именно в этом слое лежат гантельные пазы и прямоугольные пьедесталы. Кроме того, металлизация с внутренних сторон наружных диэлектриков отсутствует. Она полностью удаляется травлением.

На следующем этапе после сборки всей ФАР с чередованием слоев получается сэндвич (рис. 4, б). Для этого используются 2 плоских заземленных металлических листа. Размеры ФАР составляют  $550 \times 185 \times 13.3$  мм. При сборке использовались как стандартные металлические винты, так и пластиковые винты вблизи краев внутренних полосковых линий внутри матрицы Батлера.

**Результаты.** Измерения фазированной антенной решетки. Измерения антенн проводились стандартными методами внутри безэховой камеры (рис. 4, в). В ходе измерений использовались вращающееся крепление (пьедестал), стандартный передающий пирамидальный рупор, аналоговый генератор сигналов E8257D PSG и анализатор цепей Agilent N5241A (PNA-X). На рис. 5 показаны результаты моделирования и измерений, относящиеся к входным отражениям каждого луча. На рис. 6 представлены смоделированные и измеренные диаграммы направленности для поперечного сечения в плоскости вектора электрического поля  $E$ . Уровень развязки между входами матрицы, полученный в результате моделирования и подтвержденный в ходе реальных измерений, оказался не хуже  $-15$  дБ в полосе частот  $2.02 \dots 2.37$  ГГц.

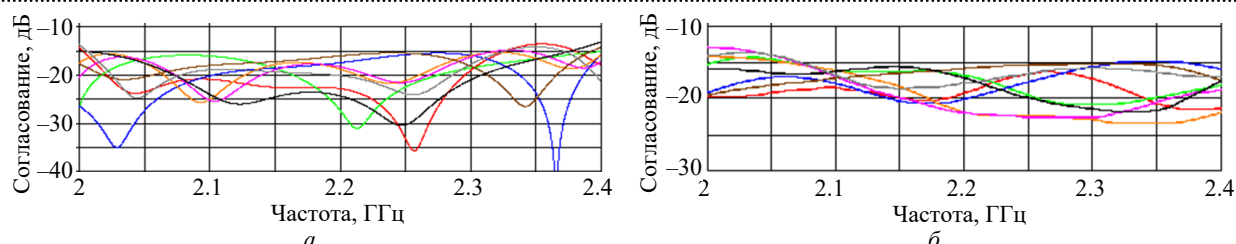


Рис. 5. Результаты моделирования и измерений для каждого входного порта: *a* – моделирование; *б* – эксперимент  
 Fig. 5. Modeling and measurement results for each input port: *a* – modeling; *б* – experiment

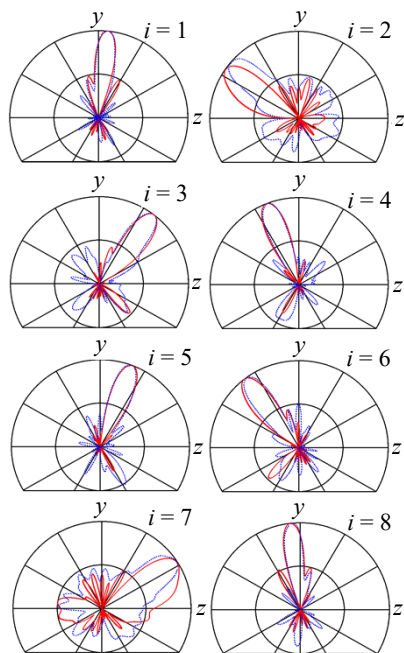


Рис. 6. Все лучи ДН: красные кривые – смоделированные; синие – измеренные

Fig. 6. All beams of the array pattern: red curves – modeled; blue – measured

Экспериментальные диаграммы направленности в плоскости вектора магнитного поля **H** имеют форму, похожую на кардиоиду из-за наличия массивного металлического экрана, образованного двумя наружными пластинами. Все минимумы кардиоид лежат в нижней полусфере ( $y < 0$ ). Кроме того, измеренные и смоделированные интенсивности кросс-поляризации также находились в приемлемом согласии. Они были зафиксированы ниже максимума главного лепестка диаграммы направленности на  $-15$  дБ в плоскости **E** и на  $-17$  дБ в соответствующих плоскостях **H**, наклоненных к оси  $y$  и проходящих через ось лучей.

**Заключение.** Описана 8-лучевая фазированная решетка на основе матрицы Батлера. Этот проект важен для региональной системы микроволновой связи. Многие другие особенности и более подробные технологические аспекты, связанные с этим проектом, можно найти в [24, 25].

### Список литературы

1. Handbook of Antenna Technologies. Singapore: Springer, 2016. 3473 p.
2. Butler matrix based beamforming networks for phased array antenna systems: a comprehensive review and future directions for 5G applications / A. K. Vallappil, M. K. A. Rahim, B. A. Khawaja, N. A. Murad, M. G. Mustapha // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 3970–3987. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047696
3. Orthogonal versus zero-forced beamforming in multibeam antenna systems: review and challenges for future wireless networks / Y. Aslan, A. Roederer, N. J. G. Fonseca, P. Angeletti, and A. Yarovoy // IEEE J. of Microwaves. 2021. Vol. 1, № 4. P. 879–901. doi: 10.1109/JMW.2021.3109244
4. Butler J., Lowe R. Beam forming matrix simplifies design of electronically scanned antennas // Electronic Design. 1961. Vol. 9. P. 170–173.
5. Pat. U.S. 3 255 450. Multiple beam antenna system employing multiple directional couplers in the leadin / J. L. Butler. Publ. 07.06.1966.
6. Wincza K., Gruszczynski S. Broadband integrated  $8 \times 8$  Butler matrix utilizing quadrature couplers and Schiffman phase shifters for multibeam antennas with broadside beam // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2016. Vol. 64, № 8. P. 2596–2604. doi: 10.1109/TMTT.2016.2582877
7. Dual-function radar-communication system design via sidelobe manipulation based on FDA Butler matrix / S. Y. Nusenu, S. Huaizong, P. Ye, W. Xuehan, A. Basit // IEEE Antennas Wireless Propag. Let. 2019. Vol. 18, № 3. P. 452–456. doi: 10.1109/LAWP.2019.2894015
8. Nasser H., Bemani M., Ghaffarlou A. A new method for arbitrary amplitude distribution generation in  $4 \times 8$  Butler matrix // IEEE Microwave and Wireless Components Let. 2020. Vol. 30, № 3. P. 249–252. doi: 10.1109/LMWC.2020.2966929
9. Jenn D. C., Chua E.-H. Two-port hybrid ring dipole with simultaneous sum and difference element patterns // Electronics Let. 2003. Vol. 39, № 12. P. 892–894. doi: 10.1049/el:20030584
10. Alhalabi R. A., Rebeiz G. M. Differentially-fed millimeter-wave Yagi-Uda antennas with folded dipole

feed // IEEE Trans. Antennas. Propag. 2010. Vol. 58, № 3. P. 966–969.

doi: 10.1109/TAP.2009.2039320

11. Пат. RU 2472261 С1. Дипольный излучатель / Д. А. Бухтияров, А. П. Горбачев, Ю. О. Филимонова. Оpubл. 10.01.2013.

12. Bukhtiyarov D. A., Gorbachev A. P., Zhelezko S. Yu. Improvement of the quasi-Yagi antenna performances by using an ends-fed dipole driver // Universal J. of Electrical and Electronic Engineering. 2014. Vol. 2, № 1. P. 6–17.

doi: 10.13189/ujee.2014.020102

13. Alekseytsev S. A., Gorbachev A. P. The novel printed dual-band quasi-Yagi antenna with end-fed dipole-like driver // IEEE Trans. Antennas Propag. 2020. Vol. 68, № 5. P. 4088–4090.

doi: 10.1109/TAP.2019.2950837

14. Gorbachev A., Parshin Yu. All-pass phaser on a base of half-wave coupled-line section and its application // Microw. Opt. Technol. Let. 2021. Vol. 63, iss. 10. P. 2570–2575.

doi: 10.1002/mop.32925

15. Alekseytsev S. A., Gorbachev A. P., Parshin Yu. N. An analysis of microwave radiators in order to diminish the array scan blindness // 1<sup>st</sup> Intern. Conf. Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10–11 Dec. 2020. IEEE, 2020. P. 64–68.

doi: 10.1109/PIERE51041.2020.9314639

16. Schiffman B. M. A new class of broad-band microwave 90-degree phase shifters // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1958. Vol. 6, № 2. P. 232–237.

doi: 10.1109/TMTT.1958.1124543

17. Lyu Y.-P., Zhu L., Cheng C.-H. Design and analysis of Schiffman phase shifter under operation of its second phase period // IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 2018. Vol. 66, № 7. P. 3263–3269.

doi: 10.1109/TMTT.2018.2829170

18. Brenner H. E. Perturbations of the critical parameters of quarter-wave directional couplers // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1967. Vol. 15, № 6. P. 384–385.

doi: 10.1109/TMTT.1967.1126481

19. Monaco V. A., Tiberio P. Computer-aided analysis of microwave circuits // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1974. Vol. 22, № 3. P. 249–263.

doi: 10.1109/TMTT.1974.1128208

20. Parshin Yu. N. Wideband phase shifters at 22.5, 45 and 67.5 degrees // 1<sup>st</sup> Intern. Conf. Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10–11 Dec. 2020. IEEE, 2020. P. 84–87.

doi: 10.1109/PIERE51041.2020.9314688

21. Паршин Ю. Н. Печатные многолучевые антенные решетки с модифицированными фазовращателями и излучателями дипольного вида: дис. ... канд. техн. наук / Новосибирск, 2023. 198 с.

22. Kolesnikov A. A., Parshin Yu. N., Alekseytsev S. A. Four-beam phased antenna array based on multi-element end-fed dipole-like radiator // IEEE 25<sup>th</sup> Intern. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM), Novosibirsk, 28 Jun–2 July 2024. IEEE, 2024. P. 430–434.

doi: 10.1109/EDM61683.2024.10615015

23. CST Studio Suite. URL: <https://www.3ds.com/products/catia/student-license-program> (дата обращения: 06.06.2025).

24. Алексейцев С. А., Горбачев А. П. Печатные двухдиапазонные директорные антенны с концевым питанием возбуждителя дипольного вида. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2022. 216 с.

25. Горбачев А. П., Паршин Ю. Н. Печатные многолучевые антенные решетки с модифицированными фазовращателями и излучателями дипольного вида. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2023. 176 с.

## Информация об авторах

**Алексейцев Сергей Александрович** – кандидат технических наук (2021), доцент кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Автор 42 научных публикаций. Сфера научных интересов: электродинамика; антенны; СВЧ-техника.

Адрес: Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, д. 20, Новосибирск, 630073, Россия

E-mail: [alekseytsev.94@mail.ru](mailto:alekseytsev.94@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-5000-7786>

**Горбачев Анатолий Петрович** – доктор технических наук (1999), профессор кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Автор 103 научных публикаций. Сфера научных интересов: антенны; СВЧ-устройства; фазированные антенные решетки.

Адрес: Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, д. 20, Новосибирск, 630073, Россия

E-mail: [argor1904@yandex.ru](mailto:argor1904@yandex.ru)

<https://orcid.org/0009-0004-8066-4946>

**Паршин Юрий Николаевич** – кандидат технических наук (2022), научный сотрудник Новосибирского государственного технического университета. Автор 46 научных публикаций. Сфера научных интересов: антенны; СВЧ-устройства; фазированные антенные решетки.

Адрес: Новосибирский государственный технический университет, пр. К. Маркса, д. 20, Новосибирск, 630073, Россия

E-mail: [jurparnik@mail.ru](mailto:jurparnik@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-8598-4154>

## References

1. Handbook of Antenna Technologies. Singapore, Springer, 2016, 3473 p.
2. Vallappil A. K., Rahim M. K. A., Khawaja B. A., Murad N. A., Mustapha M. G. Butler Matrix Based Beamforming Networks For Phased Array Antenna Systems: a Comprehensive Review and Future Directions for 5G Applications. *IEEE Access*. 2021, vol. 9, pp. 3970–3987. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3047696
3. Aslan Y., Roederer A., Fonseca N. J. G., Angeletti P., Yarovoy A. Orthogonal Versus Zero-Forced Beamforming in Multibeam Antenna Systems: Review and Challenges for Future Wireless Networks. *IEEE J. of Microwaves*. 2021, vol. 1, no. 4, pp. 879–901. doi: 10.1109/JMW.2021.3109244
4. Butler J., Lowe R. Beam Forming Matrix Simplifies Design of Electronically Scanned Antennas. *Electronic Design*. 1961, vol. 9, pp. 170–173.
5. Butler J. L. Multiple Beam Antenna System Employing Multiple Directional Couplers in the Leadin. U.S. Pat. 3 255 450. Publ. 07.06.1966.
6. Wincza K., Gruszczynski S. Broadband Integrated 8×8 Butler Matrix Utilizing Quadrature Couplers and Schiffman Phase Shifters for Multibeam Antennas with Broadside Beam. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2016, vol. 64, no. 8, pp. 2596–2604. doi: 10.1109/TMTT.2016.2582877
7. Nusenu S. Y., Huaizong S., Ye P., Xuehan W., Basit A. Dual-Function Radar-Communication System Design Via Sidelobe Manipulation Based on FDA Butler Matrix. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2019, vol. 18, no. 3, pp. 452–456. doi: 10.1109/LAWP.2019.2894015
8. Nasser H., Bemani M., Ghaffarlou A. A New Method for Arbitrary Amplitude Distribution Generation in 4×8 Butler Matrix. *IEEE Microwave and Wireless Components Lett.* 2020, vol. 30, no. 3, pp. 249–252. doi: 10.1109/LMWC.2020.2966929
9. Jenn D. C., Chua E.-H. Two-Port Hybrid Ring Dipole with Simultaneous Sum and Difference Element Patterns. *Electronics Lett.* 2003, vol. 39, no. 12, pp. 892–894. doi: 10.1049/el:20030584
10. Alhalabi R. A., Rebeiz G. M. Differentially-Fed Millimeter-Wave Yagi-Uda Antennas with Folded Dipole Feed. *IEEE Trans. Antennas. Propag.* 2010, vol. 58, no. 3, pp. 966–969. doi: 10.1109/TAP.2009.2039320
11. Bukhtiyarov D. A., Gorbachev A. P., Filimonova Yu. O. Dipole emitter. Pat. RU 2472261. Publ. 10.01.2013. (In Russ.)
12. Bukhtiyarov D. A., Gorbachev A. P., Zhelezko S. Yu. Improvement of the Quasi-Yagi Antenna Performances by Using an Ends-Fed Dipole Driver. *Universal J. of Electrical and Electronic Engineering*. 2014, vol. 2, no. 1, pp. 6–17. doi: 10.13189/ujee.2014.020102
13. Alekseytsev S. A., Gorbachev A. P. The Novel Printed Dual-Band Quasi-Yagi Antenna with End-Fed Dipole-Like Driver. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2020, vol. 68, no. 5, pp. 4088–4090. doi: 10.1109/TAP.2019.2950837
14. Gorbachev A., Parshin Yu. All-Pass Phaser on a Base of Half-Wave Coupled-Line Section and Its Application. *Microw. Opt. Technol. Lett.* 2021, vol. 63, iss. 10, pp. 2570–2575. doi: 10.1002/mop.32925
15. Alekseytsev S. A., Gorbachev A. P., Parshin Yu. N. An Analysis of Microwave Radiators in Order to Diminish the Array Scan Blindness. 1<sup>st</sup> Intern. Conf. Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10–11 Dec. 2020. *IEEE*, 2020, pp. 64–68. doi: 10.1109/PIERE51041.2020.9314639
16. Schiffman B. M. A New Class of Broad-Band Microwave 90-Degree Phase Shifters. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1958, vol. 6, no. 2, pp. 232–237. doi: 10.1109/TMTT.1958.1124543
17. Lyu Y.-P., Zhu L., Cheng C.-H. Design and Analysis of Schiffman Phase Shifter under Operation of Its Second Phase Period. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2018, vol. 66, no. 7, pp. 3263–3269. doi: 10.1109/TMTT.2018.2829170
18. Brenner H. E. Perturbations of the Critical Parameters of Quarter-Wave Directional Couplers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1967, vol. 15, no. 6, pp. 384–385. doi: 10.1109/TMTT.1967.1126481
19. Monaco V. A., Tiberio P. Computer-Aided Analysis of Microwave Circuits. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1974, vol. 22, no. 3, pp. 249–263. doi: 10.1109/TMTT.1974.1128208
20. Parshin Yu. N. Wideband Phase Shifters at 22.5, 45 and 67.5 Degrees. 1<sup>st</sup> Intern. Conf. Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE), Novosibirsk, 10–11 Dec. 2020. *IEEE*, 2020, pp. 84–87. doi: 10.1109/PIERE51041.2020.9314688
21. Parshin Yu. N. Printed Multi-Beam Phased Arrays with Modified Phase Shifters and Dipole-Like Radiators. Ph. D. dissertation, Radio and Electronic Dept., Novosibirsk State Technical Univ., Novosibirsk, 2022. (In Russ.)
22. Kolesnikov A. A., Parshin Yu. N., Alekseytsev S. A. Four-Beam Phased Antenna Array Based on Multi-Element End-Fed Dipole-Like Radiator. *IEEE 25<sup>th</sup> Intern. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*, Novosibirsk, 28 Jun–2 July 2024. *IEEE*, 2024, pp. 430–434. doi: 10.1109/EDM61683.2024.10615015
23. CST Studio Suite. Available at: <https://www.3ds.com/products/catia/student-license-program> (accessed: 06.06.2025).
24. Alekseytsev S. A., Gorbachev A. P. Pechatnye dvukhdiapazonnyye direktornyye anteny s kontsevym pitaniem vzbuditel'ya dipol'nogo vida [Printed Dual-Band Director-Type Antennas with an End Supply Dipole Exciter]. Novosibirsk, NSTU Publisher, 2022, 216 p. (In Russ.)
25. Gorbachev A. P., Parshin Yu. N. Pechatnye mnogoluchevyye antenyne reshetki s modifitsirovannymi fazovrashchatel'nyami i izluchatel'nyami dipol'nogo vida [Printed Multi-Beam Antenna Arrays with Dipole-Type Emitters]. Novosibirsk, NSTU Publisher, 2023, 176 p. (In Russ.)

### Information about the authors

**Sergey A. Alekseytsev**, Cand. Sci. (Eng.) (2021), Associate Professor of the Department of Data Collection and Processing Systems of Novosibirsk State Technical University). The author of 42 scientific publications. Area of expertise: electrodynamics; antennas; microwave technology.

Address: Novosibirsk State Technical University, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk 630073, Russia

E-mail: [alekseytsev.94@mail.ru](mailto:alekseytsev.94@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0001-5000-7786>

**Anatoly P. Gorbachev**, Dr Sci. (Eng.) (1999), Professor of the Department of Radio Receiving and Transmitting Devices of Novosibirsk State Technical University. The author of 103 scientific publications. Area of expertise: antennas; microwave devices; phased array antennas.

Address: Novosibirsk State Technical University, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk 630073, Russia

E-mail: [apgor1904@yandex.ru](mailto:apgor1904@yandex.ru)

<https://orcid.org/0009-0004-8066-4946>

**Yuriy N. Parshin**, Cand. Sci. (Eng.) (2022), Research Fellow Novosibirsk State Technical University. The author of 46 scientific publications. Area of expertise: antennas; microwave devices; phased array antennas.

Address: Novosibirsk State Technical University, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk 630073, Russia

E-mail: [jurparnik@mail.ru](mailto:jurparnik@mail.ru)

<https://orcid.org/0000-0002-8598-4154>

---