

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.120>

## ИЗЛУЧАЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ МАЛОЭЛЕМЕНТНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Научная статья

Садыков А.Р.<sup>1,\*</sup>, Седельников Ю.Е.<sup>2</sup>, Петров А.В.<sup>3</sup>, Скачков В.А.<sup>4</sup><sup>1</sup>ORCID : 0009-0003-2016-8150;<sup>1,2,4</sup>Казанский национальный исследовательский технический университет, Казань, Российская Федерация<sup>3</sup>Научно-производственное объединение «Радиоэлектроника» имени В. И. Шимко, Казань, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (pro3452000[at]gmail.com)

**Аннотация**

Работа посвящена вопросам построения антенн для перспективных низкоорбитальных многоспутниковых систем передачи данных. Рассмотрены ограничения построения многолучевых малоэлементных антенных решеток, устанавливаемых на космических аппаратах.

Применение малоэлементных антенных решеток в низкоорбитальной спутниковой связи предлагает значительные преимущества в плане производительности, эффективности и экономии ресурсов. Они способствуют развитию более доступных, надежных и высокопроизводительных спутниковых коммуникационных систем, открывая новые возможности для глобального подключения и обмена данными.

Результатом работы является разработанная авторами антенна круговой поляризации для задач низкоорбитальной спутниковой связи, основным достоинством которой являются уменьшенные габариты. Работоспособность указанного варианта антенны подтверждена результатами электродинамического моделирования и экспериментальными данными.

**Ключевые слова:** антенная решетка, многолучевая антенная решетка, антенны космических аппаратов, запердельный волновод.

## RADIATING ELEMENT FOR SMALL-ELEMENT ANTENNA ARRAYS

Research article

Sadykov A.R.<sup>1,\*</sup>, Sedelnikov Y.E.<sup>2</sup>, Petrov A.V.<sup>3</sup>, Skachkov V.A.<sup>4</sup><sup>1</sup>ORCID : 0009-0003-2016-8150;<sup>1,2,4</sup>Kazan National Research Technical University, Kazan, Russian Federation<sup>3</sup>Scientific and Production Association "Radioelectronics" named after V. I. Shimko, Kazan, Russian Federation

\* Corresponding author (pro3452000[at]gmail.com)

**Abstract**

The work is dedicated to the issues of antennas construction for perspective low-orbit multi-satellite data transmission systems. The limitations of construction of multibeam small-element antenna arrays installed on spacecraft are examined.

The application of small-element antenna arrays in low orbiting satellite communications offers significant advantages in terms of performance, efficiency and resource savings. They contribute to the development of more affordable, reliable and high-performance satellite communications systems, opening up new opportunities for global connection and data exchange.

The result of the work is a circular polarization antenna developed by the authors for low orbiting satellite communication tasks, the main advantage of which is the reduced size. The performance of this antenna variant is confirmed by the results of electrodynamic modelling and experimental data.

**Keywords:** antenna array, multibeam antenna array, spacecraft antennas, below cutoff waveguide.

**Введение**

«Сфера» – один из ключевых проектов Роскосмоса, направленный на развитие космических информационных технологий и ликвидацию так называемого «цифрового неравенства». Благодаря ей будет создана самая современная система коммуникаций и мониторинга, включающая как существующую, так и перспективную космическую инфраструктуру.

Создание современной системы коммуникаций и мониторинга включает использование многоспутниковых с целью обеспечения глобального покрытия всей поверхности Земли. Этой цели служит реализация проекта «Сфера» – одного из ключевых проектов ближайшего будущего. В состав указанной системы входят орбитальные спутниковые группировки малогабаритных аппаратов [1], [2].

Для аппаратуры указанного класса характерно использование антенных решеток с небольшим числом элементов. Примером может служить космический аппарат (рис. 1) Марафон [2].

Глобальная сеть аппаратов «Марафон IoT» охватит всю планету и будет работать в 12 орбитальных плоскостях с удалением около 750 км от Земли. Спутники этого типа будут обеспечивать услугами по доступу в интернет наших спасателей, авиаторов, силовиков, а также обеспечивать сервисы «интернета вещей» (IoT, Internet of Things) в любых точках мира. Появление спутников «Марафон» на орбите станет для нашей страны таким же важным этапом развития, как система ГЛОНАСС, которая сегодня используется очень активно миллионами потребителей.

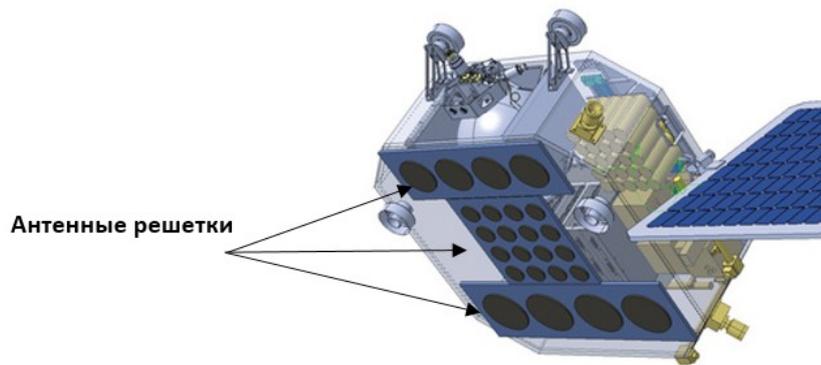


Рисунок 1 - Искусственный спутник Земли «Марафон IoT»  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.120.1>

В целях повышения технических показателей бортовой приемо-передающей радиоаппаратуры в составе ИСЗ данного назначения целесообразно использование антенн с управляемыми диаграммами направленности [3]. Среди них наиболее просты в реализации многолучевые антенные решетки. Использование их позволяет существенно повысить эффективно излучаемую мощность в необходимом и достаточно широком секторе углов.

### 1.1. Многолучевые антенны

Классическая схема выполнения многолучевой антенны с небольшим числом элементов включает систему излучателей и диаграммообразующую схему [4] (Рис. 2)

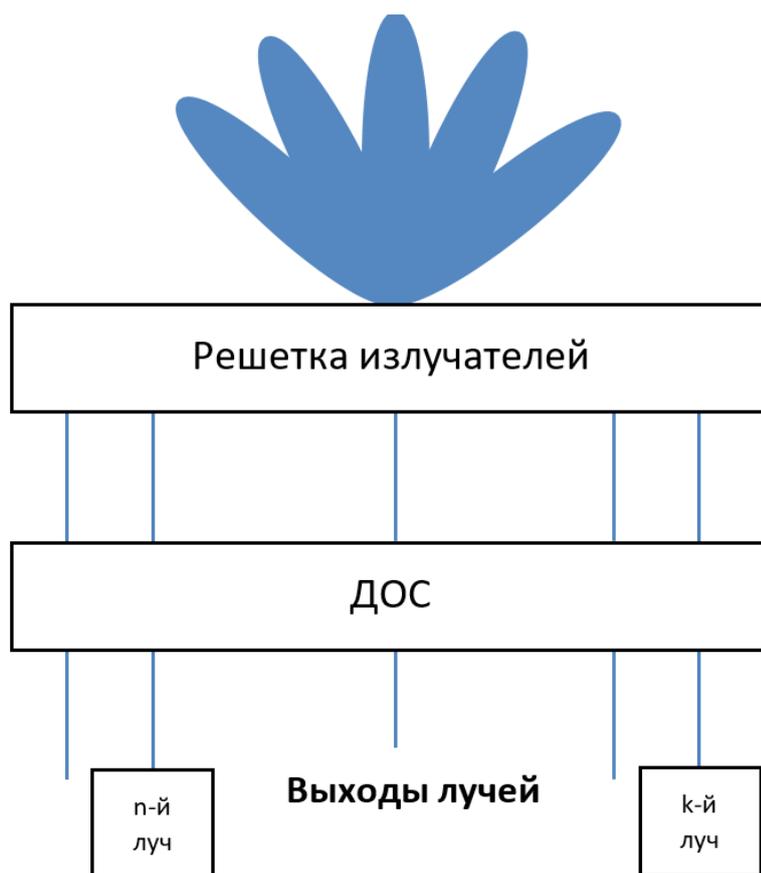


Рисунок 2 - Схема многолучевой антенны  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.120.2>

Диаграммообразующая схема представляет собой СВЧ-устройство, обладающее (в общем случае)  $N_{\text{вх}}$  входами и  $N_{\text{вых}}$  выходами, соединенными с элементами решетки. Каждому из входов соответствует возбуждение в решетке АФР, формирующего соответствующий луч в ДН. При равном числе входов и выходов это матрица Батлера [5] рис. 3а. При произвольном их соотношении – матрица Нолена [6] (рис. 3б), а также устройство квазиоптического типа на основе линзы Ротмана [7] (рис. 3в).

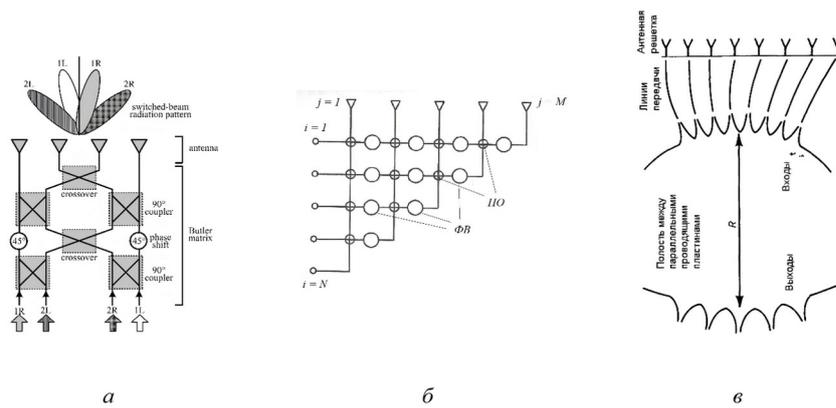
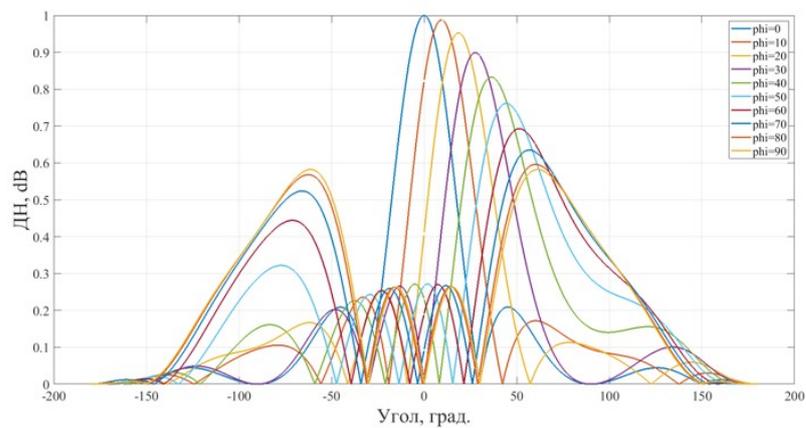
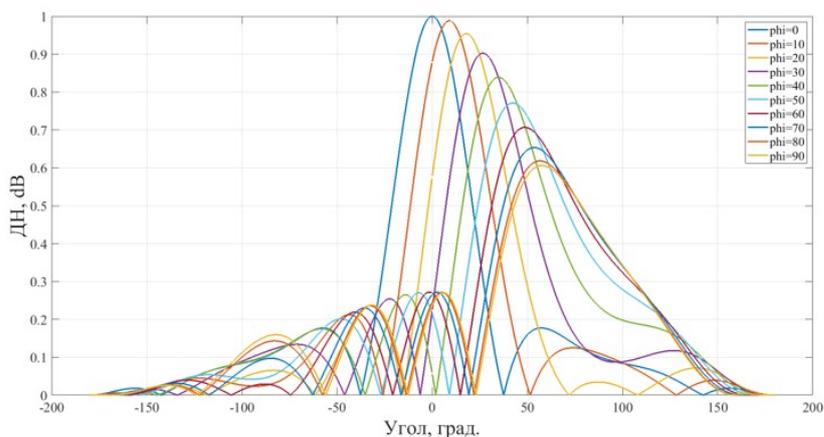


Рисунок 3 - Диаграммообразующие схемы:  
 а - Матрица Батлера; б - Матрица Нолена; в - Линза Ротмана  
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.120.3>

Важная особенность малоэлементных антенных решеток состоит в том, что формирование веера лучей в широком секторе углов возможно только при уменьшении значений шага решетки, так как при достижении определенного угла луча неприемлемо возрастает уровень боковых лепестков, в силу того, что в зону видимых углов начинают заходить вторичные дифракционные максимумы (рис. 4).



а



б

Рисунок 4 - ДН линейной антенной решетки при различном отклонении луча от нормали:  
 а – ДН при значениях шага решетки  $0,5\lambda$ ; б – ДН при значениях шага решетки  $0,41\lambda$   
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.120.4>

Это обстоятельство предъявляет принципиально важное требование к используемому элементу антенной решетки. Для построения подобных антенн требуются излучатели с поперечными размерами несколько меньшими половины длины волны. Большинство классических решений, например, турникетный элемент [8], открытый конец круглого волновода [9] и др., не отвечает данному требованию. Кроме того, ряд известных приемов, например, использование круглого волновода с диэлектрическим заполнением [10], не может быть использован, так как на космическом аппарате предъявляют повышенные требования к устойчивости к внешним воздействующим факторам (ВВФ).

Целью работы является разработка малогабаритного элемента применимого в составе малоэлементных антенных решеток для задач низкоорбитальной связи.

#### Постановка задачи

К излучателям антенн рассматриваемого назначения предъявляется ряд специфических требований. Во-первых, они должны обладать в режимах передачи и приема излучений круговой поляризации весьма широкими диаграммами направленности. Во-вторых, иметь поперечные размеры, соответствующие требованию формирования многолучевых диаграмм направленности в широком секторе углов, а именно меньше половины длины волны. Размеры в продольном направлении для них также ограничены условиями размещения на космическом аппарате. И, наконец, применяемые конструкции и материалы должны отвечать условиям применения.

Эти обстоятельства затрудняют или даже исключают использование большинства «классических» вариантов антенн, таких как турникетный вибратор, большинство видов спиральных антенн, волноводных излучателей круглого или квадратного сечения. Для использования в составе рассматриваемых МАР предложен излучатель, представляющий собой модернизацию антенны щелевого типа, ранее разработанной для использования в аппаратуре радиотермометрии [11], [12]. Ее особенностью является использование в качестве устройства для обеспечения режима одностороннего излучения отрезка запредельного волновода.

#### Обсуждение результатов моделирования с помощью программы CST Studio и экспериментальных результатов

С принципиальной точки зрения указанная антенна представляет собой кольцевую щель, возбуждаемую в пространственной и временной квадратуре. Щель расположена в торце цилиндрического резонатора круглого поперечного сечения, исключающего возможность распространения волн типа  $H_{11}$  [13], [14], [15].

В целях проверки возможности построения антенн этого типа проведено исследование основных характеристик антенны путем электродинамического моделирования [15]. Рассматривалась антенна с поперечными размерами 132 мм ( $0,44\lambda$ ), рабочая частота  $1\pm 10\%$  ГГц. На рис. 5-6 показаны модель антенны и результаты расчетов.

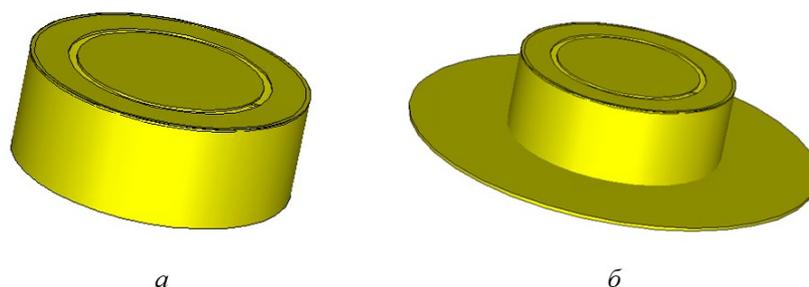


Рисунок 5 - Электродинамическая модель антенны:

*a* – вид сбоку; *б* – вид с экраном

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.120.5>

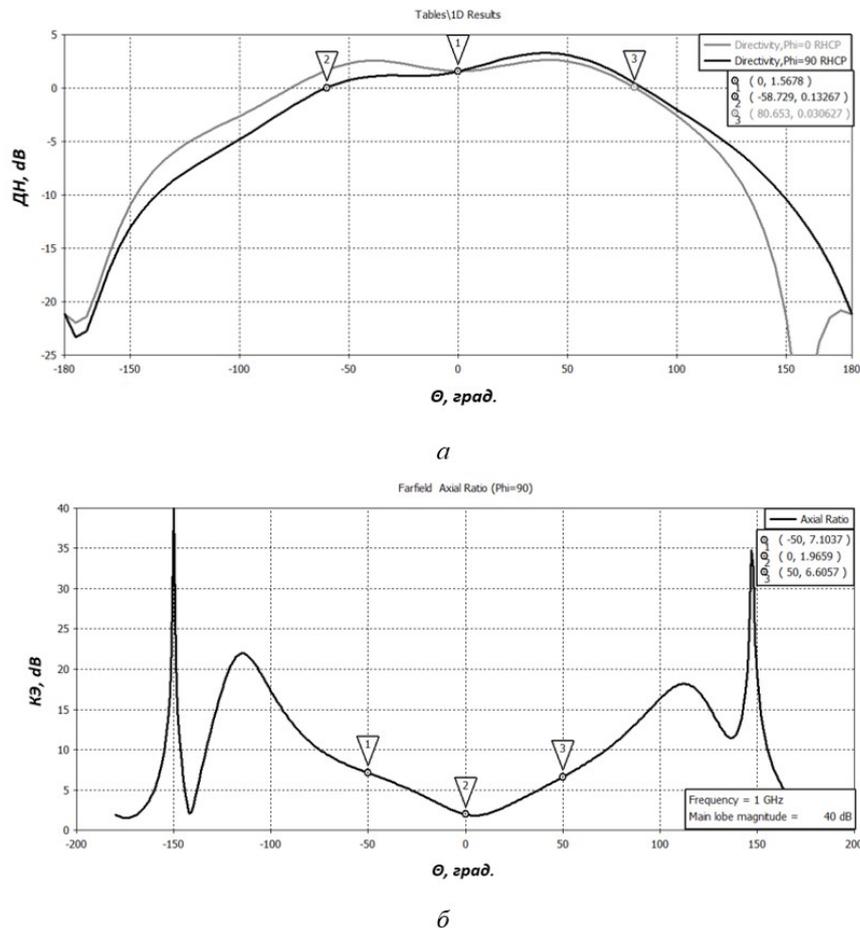


Рисунок 6 - Результаты расчетов:

*a* – ДН антенны в вертикальной и горизонтальной плоскостях на частоте 1 ГГц; *б* – КЭ антенны

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.120.6>

Исходя из рисунка 6, следует вывод, что поляризация правая круговая и КЭ 1,96 дБ (или 0,79). Ширина ДН в горизонтальной плоскости примерно  $140^\circ$ , в вертикальной плоскости  $150^\circ$ .

При практической реализации кольцевой антенны круговой поляризации должно быть обеспечено возбуждение первой пространственной гармоники тока в щели и устранено возбуждение нулевой, наличие которой вызывает асимметрию диаграммы направленности (рис. 6а). С этой целью разработана конструкция, показанная на рисунке 7.

Данные технические результаты достигаются тем, что в резонаторе в виде запердельного волновода с кольцевой щелью в торцевой стенке имеются перемычки в форме дугового участка и двух прямолинейных отрезков, причем радиус дугового участка равен  $r = (\lambda/2 - D)/(\pi - 2)$ . Указанные перемычки выполняют функцию фильтра волн в волноводе с нулевой вариацией в азимутальном направлении. Соответственно, подавление этих волн обеспечивает формирование симметричной диаграммы направленности.

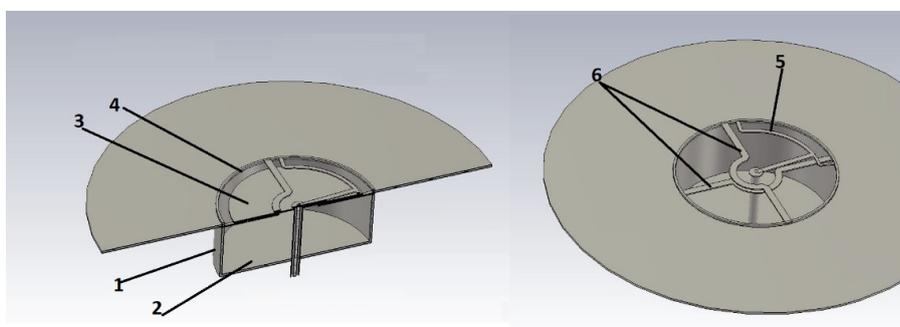


Рисунок 7 - Внешний вид антенны круговой поляризации:

1 – отрезок волновода; 3 – торцевая стенка; 4 – возбуждающее устройство, представляющее собой кольцевую щель, расположенную на торцевой стенке 3 круглого волновода 1 и возбуждаемую в квадратуре через коаксиальный кабель; 5, 6 – уставленные перемычки в форме дугового участка и двух прямолинейных отрезков

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.120.7>

Антенна согласована на частоту 2,08 ГГц с полосой  $\pm 60$  МГц, радиус резонатора  $0,22 \cdot \lambda$ . Моделируемый излучатель выполнен на основе цилиндрического волновода с кольцевой щелью в торцевой стенке. Для волны данной частоты основного типа Н11 диаметр волновода должен быть не менее  $0,58\lambda$ . В предложенном варианте волновод в составе имеет поперечные размеры меньше критического значения, что исключает распространения ее. Построение антенны с «резонатором» в виде запертого волновода делает практически некритичным значение глубины цилиндра, что позволяет сократить не только поперечные, но и продольные габаритные размеры излучателя и, следовательно, антенны в целом. На рисунке 8 приведены результаты электродинамического моделирования.

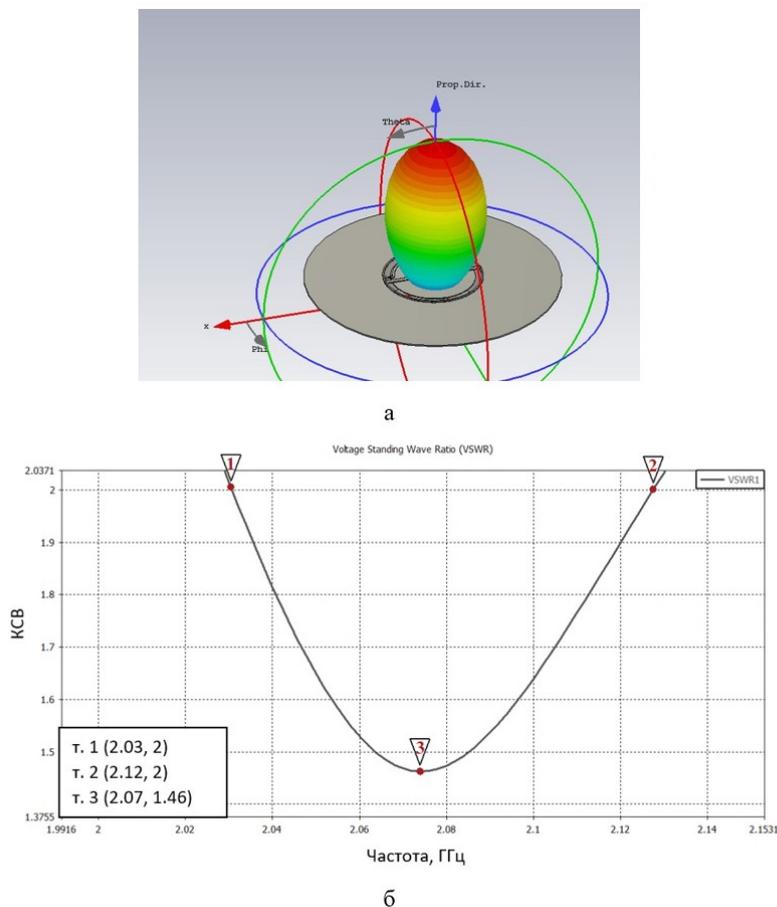


Рисунок 8 - Результаты электродинамического моделирования:

а – ДН антенны; б – КСВ антенны

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.120.8>

К достоинствам разработанной антенны относятся:

- Хорошие массогабаритные показатели.
- Симметричная диаграмма направленности круговой поляризации.

Габаритные размеры полученного излучателя позволяют перейти от «классического» значения шага решетки ( $0,5\lambda$ ) к уменьшенному, что, в свою очередь, позволяет ослабить присутствие вторичного дифракционного максимума при широкоугольном сканировании, что подтверждается результатами проведенного электродинамического моделирования. На рисунке 10 приведены расчетные диаграммы направленности 4-х элементной антенной решетки (рис. 9) с различными значениями шага решетки ( $0,43\lambda$ ,  $0,46\lambda$ ,  $0,5\lambda$ ).

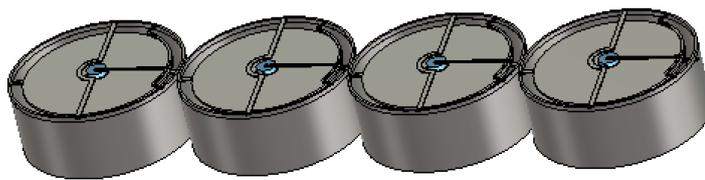


Рисунок 9 - Внешний вид антенной решетки  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.120.9>

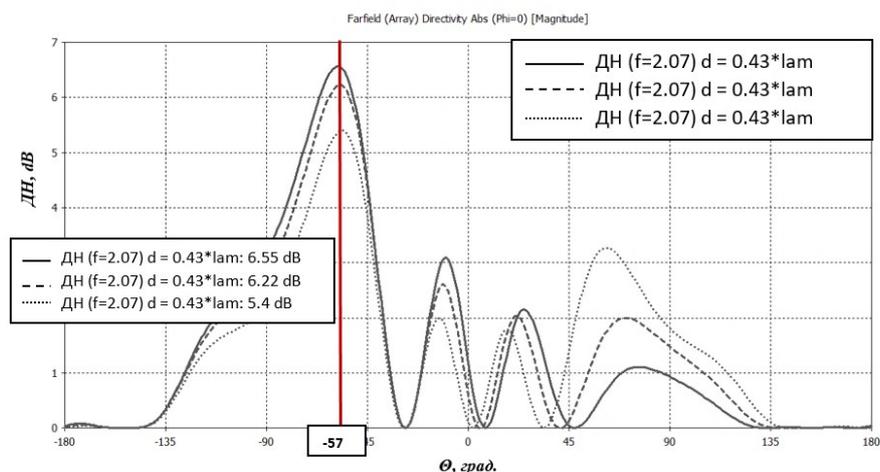


Рисунок 10 - ДН антенной решетки при отклонении и луча на 57 градусов  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.147.120.10>

Как видно из результатов, при отклонении луча от нормали на более чем 50 градусов при стандартном шаге решетки ( $0,5\lambda$ ) сильно возрастает уровень боковых лепестков, наблюдается недопустимое возрастание уровня дальних боковых лепестков ДН. При использовании предложенного элемента решетки вследствие возможности уменьшения шага решетки этого явления не наблюдается.

Результаты проведенного моделирования подтверждают, что предложенный вариант излучателя является работоспособным, позволяющим рассматривать его как основу для разработки практических вариантов конструкции малоэлементных антенных решеток круговой поляризации.

### Заключение

Разработан вариант излучателя многолучевой антенной решетки круговой поляризации на основе волновода с частотой ниже критической, что позволяет уменьшить расстояние между элементами антенной решетки со стандартного шага ( $0,5\lambda$ ) до более плотного расположения (например,  $0,43\lambda$ ). Симметричность ДН элемента контролируется переключками в форме дугового участка и двух прямолинейных отрезков, радиус дугового участка равен  $r = (\lambda/2 - D)/(\pi - 2)$ .

Уменьшение размеров самого элемента приводит к улучшению характеристик антенны, а именно исключению влияния вторичных дифракционных максимумов на ДН и уменьшению общих массогабаритных размеров системы, что позволяет применять разработанный вариант в малоэлементных АР, в том числе новых разработках систем низкоорбитальной связи.

Применение малоэлементных антенных решёток в низкоорбитальной спутниковой связи предлагает значительные преимущества в плане производительности, эффективности и экономии ресурсов. Они способствуют развитию более доступных, надёжных и высокопроизводительных спутниковых коммуникационных систем, открывая новые возможности для глобального подключения и обмена данными.

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Проект «Сфера» переходит к практической реализации. — URL: <https://www.roscosmos.ru/33771> (дата обращения: 30.03.2024)
2. Первый российский спутник Марафон IoT будет собран до конца 2023 года. — URL: <https://dzen.ru/a/ZCpkuhMCLi570ZCQ> (дата обращения: 30.03.2024)
3. Vendik O.G. Influence of mutual coupling and current distribution errors on advanced phased antenna array nulling synthesis / O.G. Vendik // Open Journal of Antennas and Propagation. — 2013. — № 3. — P. 2-35.
4. Шишлов А.В. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи / А.В. Шишлов, Б.А. Левитан, С.А. Топчиев [и др.] // Журнал радиоэлектроники. — 2018. — № 7.
5. Горбачев А.П. Проектирование 4-лучевой печатной фазированной антенной решетки с матрицей Батлера / А.П. Горбачев, Ю.Н. Паршин // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. — 2019. — № 3.
6. Fonseca N.J.G. Printed S-Band 4x4 Nolen Matrix for Multiple Beam Antenna Applications / N.J.G. Fonseca // IEEE transactions on antennas and propagation. — 2009. — № 6. — P. 1673-1678.
7. Рыжиков А.Г. Исследование характеристик антенной решетки на основе линзы Ротмана и антенн с эллиптическими плечами / А.Г. Рыжиков, С.А. Слинчук, С.М. Фёдоров [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2013. — № 2. — С. 49-52.
8. Пат. 2624596 Российская Федерация, МПК2016137659 H01Q 21/26. Турникетная малогабаритная антенна на полусфере / Белостоцкая К.К.; — № 2016137659; заявл. 2016-09-21; опубл. 2017-07-04. — 11 с.
9. Мительман Ю.Е. Двухэлементная фазированная антенная решетка на основе открытого конца круглого волновода / Ю.Е. Мительман // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. — 2013. — № 12. — С. 106-109.
10. Лонкина Д.В. Электродинамический анализ круглых волноводов со сложными металлическими гребнями и диэлектрическим заполнением / Д.В. Лонкина, В.В. Земляков, Д.С. Губский // Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии. — 2019. — № 2.
11. Sedelnikov Y.E. Antenna-applicator for Non-invasive Detection of Internal Tissues Anomalies of Biological Objects / Y.E. Sedelnikov, S. Adel'R, V.A. Skachkov // Antennas Design and Measurement International Conference. — 2021. — № 1.
12. Пат. 2744537 Российская Федерация, МПК2020109529 A61B 5/01. Антенна-аппликатор для измерения температуры внутренних тканей биологического объекта / Седелников Ю.Е.; — № 2020109529; заявл. 2020-03-03; опубл. 2021-03-11. — 10 с.
13. Кириллов Л.Г. Особенности современных щелевых антенн / Л.Г. Кириллов, Ю.А. Жуков // Зарубежная радиоэлектроника. — 1976. — № 6.
14. Веденькин Д.А. Сфокусированные антенны для систем радиосвязи с группой малоразмерных летательных аппаратов / Д.А. Веденькин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2007. — № 5.
15. Седелников Ю.Е. Многолучевые антенны для перспективных спутниковых систем связи / Ю.Е. Седелников, А.Р. Садыков, В.А. Скачков // Радиолокация, навигация, связь. — 2023. — № 4.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Proekt «Sfera» perehodit k prakticheskoj realizacii [The Sphere project is moving to practical implementation]. — URL: <https://www.roscosmos.ru/33771> (accessed: 30.03.2024) [in Russian]
2. Pervyj rossijskij sputnik Marafon IoT budet sobran do konca 2023 goda [The first Russian IoT Marathon satellite will be assembled by the end of 2023]. — URL: <https://dzen.ru/a/ZCpkuhMCLi570ZCQ> (accessed: 30.03.2024) [in Russian]
3. Vendik O.G. Influence of mutual coupling and current distribution errors on advanced phased antenna array nulling synthesis / O.G. Vendik // Open Journal of Antennas and Propagation. — 2013. — № 3. — P. 2-35.
4. Shishlov A.V. Mnogoluchevye anteny dlja sistem radiolokatsii i svjazi [Multi-beam antennas for radar and communication systems] / A.V. Shishlov, B.A. Levitan, S.A. Topchiev [et al.] // Zhurnal radiojelektroniki [Journal of Radio Electronics]. — 2018. — № 7. [in Russian]
5. Gorbachev A.P. Proektirovanie 4-luchevoj pechatnoj fazirovannoj antennoj reshetki s matritsej Batlera [Design of a 4-beam printed phased antenna array with a Batler matrix] / A.P. Gorbachev, Ju.N. Parshin // Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii [Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences]. — 2019. — № 3. [in Russian]
6. Fonseca N.J.G. Printed S-Band 4x4 Nolen Matrix for Multiple Beam Antenna Applications / N.J.G. Fonseca // IEEE transactions on antennas and propagation. — 2009. — № 6. — P. 1673-1678.
7. Ryzhikov A.G. Issledovanie harakteristik antennoj reshetki na osnove linzy Rotmana i anten s ellipticheskimi plechami [Research of the characteristics of the antenna array based on the Rotman lens and antennas with elliptical arms] / A.G. Ryzhikov, S.A. Slinchuk, S.M. Fedorov [et al.] // Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta [Bulletin of the Voronezh State Technical University]. — 2013. — № 2. — P. 49-52. [in Russian]

8. Pat. 2624596 Russian Federation, MPK2016137659 H01Q 21/26. Turniketnaja malogabaritnaja antenna na polusfere [Turnstyle mini antenna on the hemisphere] / Belostotskaja K.K.; — № 2016137659; appl. 2016-09-21; publ. 2017-07-04. — 11 p. [in Russian]
9. Mitel'man Ju.E. Dvuhelmentnaja fazirovannaja antennaja reshetka na osnove otkrytogo kontsa kruglogo volnovoda [Two-element phased antenna array based on the open end of a circular waveguide] / Ju.E. Mitel'man // Aktual'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk [Actual problems of humanities and natural sciences]. — 2013. — № 12. — P. 106-109. [in Russian]
10. Lonkina D.V. Elektrodinamicheskij analiz kruglyh volnovodov so slozhnymi metallichesкими grebnjami i dielektricheskim zapolneniem [Electrodynamic analysis of circular waveguides with complex metal ridges and dielectric filling] / D.V. Lonkina, V.V. Zemljakov, D.S. Gubskij // Infokommunikacionnye i radioelektronnye tehnologii [Infocommunication and radioelectronic technologies]. — 2019. — № 2. [in Russian]
11. Sedelnikov Y.E. Antenna-applicator for Non-invasive Detection of Internal Tissues Anomalies of Biological Objects / Y.E. Sedelnikov, S. Adel'R, V.A. Skachkov // Antennas Design and Measurement International Conference. — 2021. — № 1.
12. Pat. 2744537 Russian Federation, MPK2020109529 A61B 5/01. Antenna-applikator dlja izmerenija temperatury vnutrennih tkanej biologičeskogo ob'ekta [Antenna-applicator for Non-invasive Detection of Internal Tissues Anomalies of Biological Objects] / Sedel'nikov Ju.E.; — № 2020109529; appl. 2020-03-03; publ. 2021-03-11. — 10 p. [in Russian]
13. Kirillov L.G. Osobennosti sovremennyh schelevyh antenn [Regularities of Modern Slot Antennas] / L.G. Kirillov, Ju.A. Zhukov // Zarubezhnaja radioelektronika [Foreign Radio Electronics]. — 1976. — № 6. [in Russian]
14. Veden'kin D.A. Sfokusirovannye anteny dlja sistem radiosvjazi s gruppoj malorazmernih letatel'nyh apparatov [Focused Antennas for Radio Communication Systems with the Group of Low-Sized Aircraft] / D.A. Veden'kin // Fizika volnovyh processov i radiotekhnicheskie sistemy [Physics of wave processes and radio engineering systems]. — 2007. — № 5. [in Russian]
15. Sedel'nikov Ju.E. Mnogoluchevye anteny dlja perspektivnyh sputnikovyh sistem svjazi [Multi-beam antennas for advanced satellite communication systems] / Ju.E. Sedel'nikov, A.R. Sadykov, V.A. Skachkov // Radiolokacija, navigacija, svjaz' [Radar, navigation, communications]. — 2023. — № 4. [in Russian]