

## Кольцевая многолучевая антенная решетка с частотным сканированием

Е.А. Ищенко , Ю.Г. Пастернак, Д.К. Проскурин, С.М. Федоров 

Воронежский государственный технический университет  
394006, Россия, г. Воронеж,  
ул. 20-летия Октября, 84

**Аннотация – Обоснование.** Реализация сканирующих антенн для систем помехозащищенной связи, радиолокационных систем является важной и актуальной задачей. Одним из наиболее перспективных методов отклонения луча является частотное сканирование, которое может эффективно сочетаться с коммутационным, что позволит обеспечить полноазимутальное и угломестное сканирование без применения фазовращателей. **Цель.** Произвести исследование и моделирование кольцевой многолучевой антенной системы с возможностью частотного сканирования, а также формирования нескольких лучей одновременно. Выполнить моделирование при запитывании разных портов для оценки возможностей формирования разных лучей антенны, а также в многолучевом режиме. Исследовать возможность отклонения луча по частоте с определением диапазона рабочих частот. **Методы.** Основные результаты получены на основе электродинамического моделирования, которое выполнялось с использованием метода конечных элементов в DS CST Studio Suite 2025. Основные методы анализа характеристик базировались на рассмотрении диаграмм направленности, а также их поведении при дифракции на решетках эшелетт. **Результаты.** Получены характеристики антенной системы в диапазоне частот от 8,3 до 10 ГГц. Доказано, что антенная система позволяет реализовать полноазимутальное сканирование путем коммутации разного числа входных портов. Показано, что предложенная конструкция антенной системы может управляться как по направлению луча, так и по ширине главного лепестка путем выполнения коммутации разного числа антенных элементов, при этом сохраняется частотное сканирование в широком диапазоне рабочих частот. Получено, что антенна позволяет обеспечивать формирование двух разнонаправленных лучей с частотным сканированием. **Заключение.** Предложенная антенная система может быть использована для реализации высокочастотного обнаружения малых целей и помехозащищенного канала связи с частотной перестройкой для удержания объекта в луче антенны. Особенность предложенной многолучевой антенны заключается в возможности реализации двухкоординатного сканирования на основании частотного сканирования и коммутационного подключения антенных элементов.

**Ключевые слова** – многолучевая антенна; частотное сканирование; помехозащищенная связь; кольцевая антенная решетка.

### Введение

В настоящее время актуальна реализация антенных систем для задач помехозащищенных каналов связи с высококомобильными роботизированными комплексами. Особый акцент в таких задачах стоит сделать на реализации систем связи с полноазимутальной многолучевой системой передачи данных, а также с возможностью отклонения луча диаграммы направленности. Для реализации антенных систем с возможностью отклонения луча используется множество методов. Так, в работе [1] авторы предлагают систему с отклонением луча на основе линзы. Особенностью предлагаемого решения является то, что благодаря предложенной конструкции линзы появляется возможность сформировать многомодовое излучение, которое отклоняет луч в пространстве. Помимо использования анизотропных линз, которые изменяют свои характеристики в зависимости от моды волны для формирования сканирующей антенны, могут быть применены диэлектрические линзы, как

это показано в [2]. Предложенное решение формирует двухфокальную линзу, которая обеспечивает фокусирование электромагнитных волн с последующим формированием направленного луча. Сканирование в такой конструкции осуществляется путем переключения облучателей, что значительно усложняет процесс разработки антенной системы, так как необходимо верно находить фокальные точки.

Особый интерес вызывает возможность реализации многолучевых сканирующих антенн [3–5]. Для реализации таких конструкций авторы приведенных работ используют антенны на основе волноводов, которые интегрированы в диэлектрическую подложку (SIW). Однако использование SIW-структур позволяет сформировать многолучевое и направленное излучение, но для отклонения луча приходится использовать диаграммообразующие устройства [3], сложные многослойные структуры [4], активные коммутационные устройства [5], метаматериалы [6]. Таким образом, для ре-

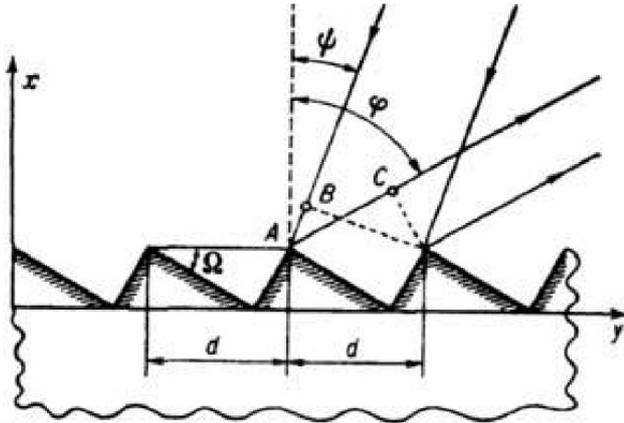


Рис. 1. Дифракционная решетка эшелетт  
 Fig. 1. Echelette diffraction grating

ализации высокоэффективной системы связи требуется решение ряда задач – достижения высокого уровня коэффициента направленного действия (КНД), управления лепестком антенны, а также возможностью формирования многолучевого режима. Большинство таких антенных систем представляют собой антенные решетки с активными линиями питания и системами диаграммообразования [7–9].

Особый интерес вызывает возможность формирования многоканальных антенн, что требует применения антенных решеток, которые способны работать в разных поляризациях [10], а также с возможностью многоканального сканирования путем коммутации лучей [11]. В данной работе предлагается конструкция кольцевой антенной решетки с возможностью формирования многолучевого режима излучения, а также с частотным сканированием лепестком в свободном пространстве. В данной работе предлагается конструкция кольцевой антенной решетки с возможностью формирования многолучевого режима излучения, а также с частотным сканированием лепестком в свободном пространстве.

### 1. Конструкция кольцевой антенной решетки с возможностью частотного санирования

В процессе реализации антенной решетки с возможностью частотного сканирования особое внимание необходимо уделить системе, которая будет обеспечивать частотозависимое формирование луча антенной системы. В предлагаемом решении в роли частотосканирующей формирующей системы служит решетка эшелетт (рис. 1). Она выступает в роли дифракционной системы, которая

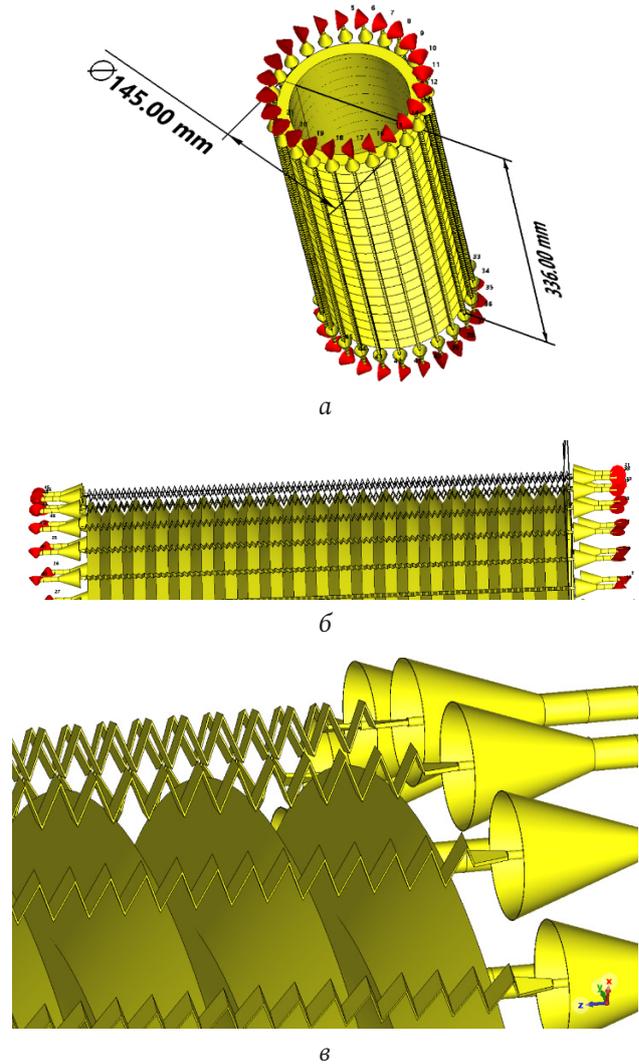
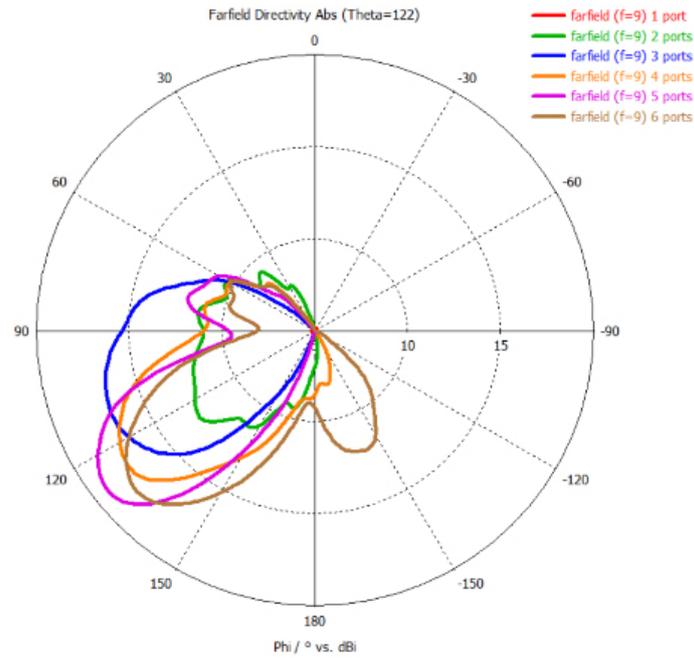


Рис. 2. Конструкция многолучевой частотосканирующей антенной системы с полноазимутальным обзором  
 Fig. 2. Design of a multi-beam frequency scanning antenna system with full azimuth coverage

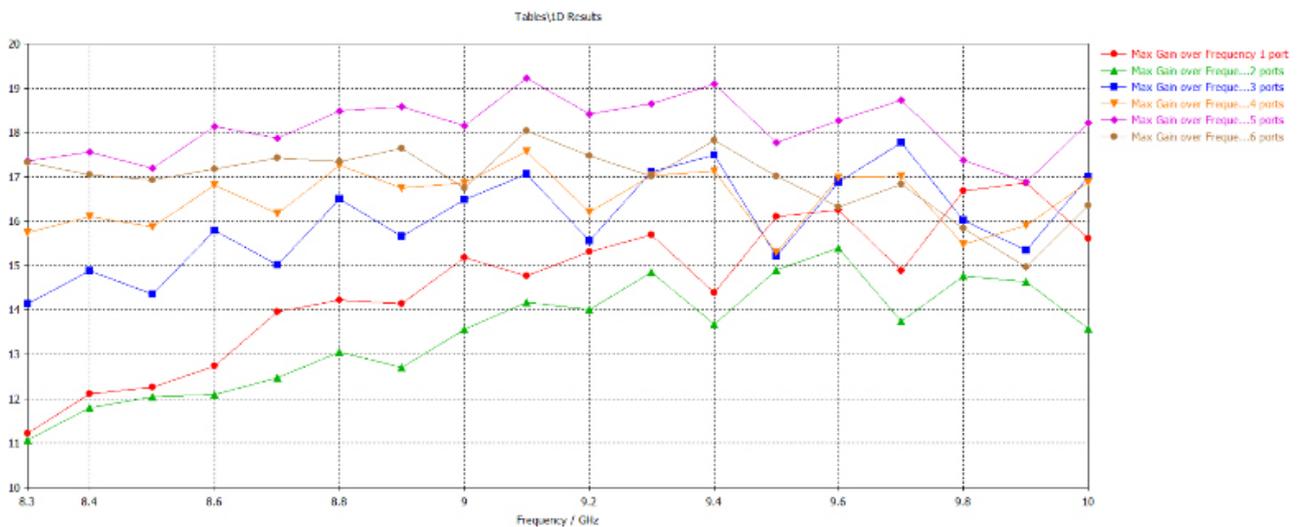
обладает постоянным периодом, при этом благодаря ее конструкции и отражению волн с последующей дифракцией и интерференцией происходит формирование лепестков с разными направлениями на различных частотах, что позволяет сформировать частотное сканирование в пространстве.

Для реализации полноазимутальной системы сканирования дифракционная решетка формирует цилиндр с дифракционным рисунком, над которым помещаются излучающие однопроводные линии, имеющие также форму дифракционной решетки. Для возбуждения антенной системы используются пирамидальные круглые рупорные излучатели. Конструкция антенны приводится на рис. 2.

Приведенная конструкция имеет полный внешний диаметр дифракционной решетки эшелетт



а



б

Рис. 3. Характеристики диаграмм направленности антенны при запитывании портов 1, 2, 3, 4, 5 и 6: а – срез диаграммы направленности в вертикальной плоскости; б – коэффициент усиления антенны в исследуемом диапазоне рабочих частот  
Fig. 3. Characteristics of the antenna radiation patterns when feeding ports 1, 2, 3, 4, 5 and 6: а – radiation pattern cut in the vertical plane; б – antenna gain in the studied operating frequency range

в 145 мм, полная высота антенной системы составляет 336 мм. Для формирования лучей в антенной решетке используются 24 однопроводные линии, которые устанавливаются по окружности с возможностью запитывания с двух концов. Разработанная антенная система предназначена для работы в диапазоне частот от 8,3 до 10 ГГц, что позволяет обеспечить высокоэффективную связь в X-диапазоне частот с возможностью повышения помехозащищенности канала связи с высококомбинированными роботизированными комплексами.

## 2. Применение многолучевой частотосканирующей антенной решетки для формирования направленного излучения

В процессе исследования основных характеристик кольцевой антенной решетки следует уделить внимание характеристикам лучей, которые могут быть сформированы при запитывании равноамплитудно и синфазно нескольких соседних портов. В процессе исследования рассматривалась ситуация, когда запитывание выполнялось

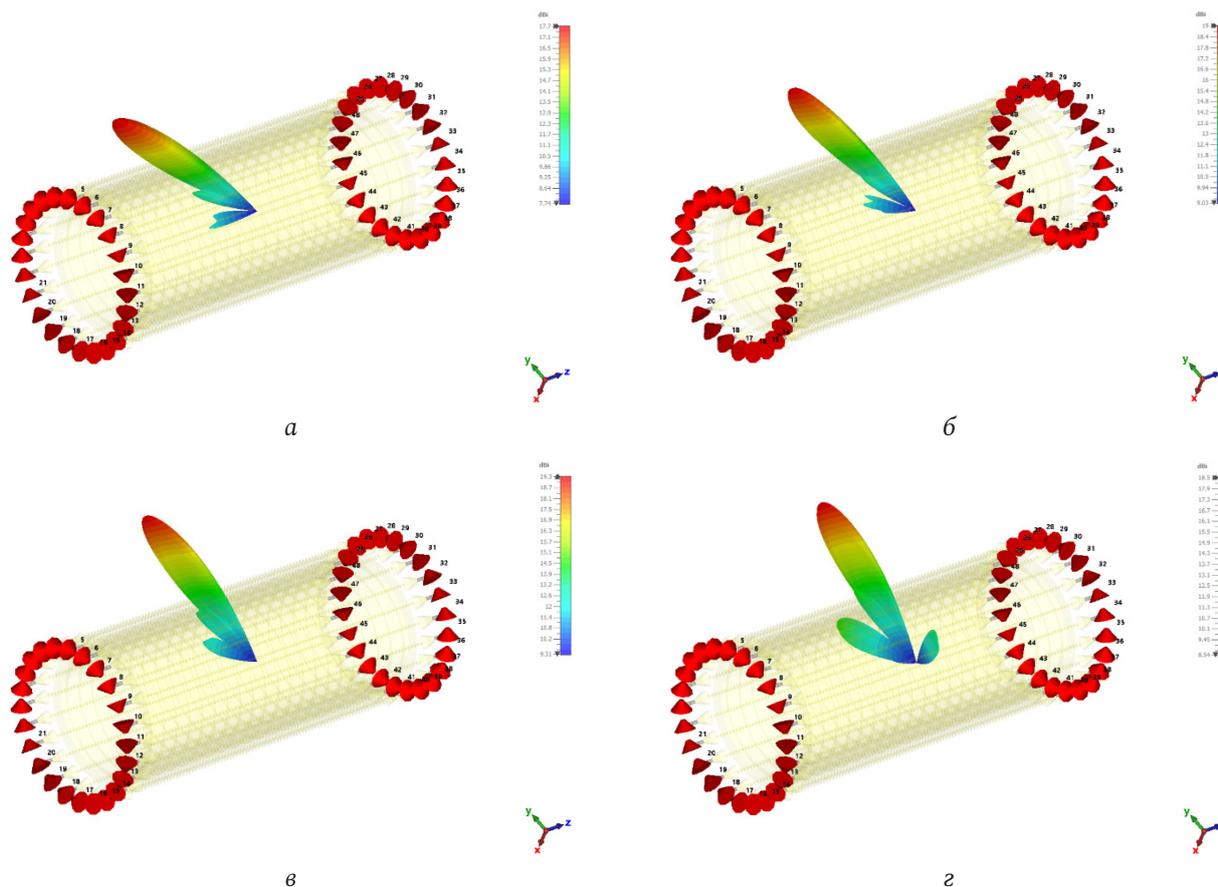


Рис. 4. Демонстрация частотного сканирования антенной системой:  $a - f = 8,4$  ГГц;  $б - f = 8,9$  ГГц;  $в - f = 9,5$  ГГц;  $г - f = 10$  ГГц  
 Fig. 4. Demonstration of frequency scanning by the antenna system:  $a - f = 8,4$  GHz;  $б - f = 8,9$  GHz;  $в - f = 9,5$  GHz;  $г - f = 10$  GHz

для портов 1, 2, 3, 4, 5 и 6 одновременно, при этом фазовый сдвиг принимался равным 0, а амплитуда была одинаковой для всех портов. На рис. 3 приводится вид диаграмм направленности для всех случаев на частоте 9 ГГц, а также уровень коэффициента усиления антенны в диапазоне исследуемых частот.

Полученные результаты показывают, что при запитывании 1 порта в антенне формирование луча не происходит, картина излучения нарушается, что вызвано взаимным влиянием соседних элементов, а также профилем дифракционной антенной решетки эшелетт. Аналогичная проблема возникает при запитывании 2 портов одновременно, поэтому применение данной антенной решетки при запитывании портов 1 и 2 не несет положительного эффекта. Особый интерес вызывают случаи синфазного возбуждения портов 3, 4 и 6 соответственно. В данных случаях КУ антенны лежит в диапазоне от 14 до 17 дБ, при этом ширина главного лепестка в азимутальной плоскости составляет более  $35^\circ$ , а в угломестной – менее  $7^\circ$ , что формирует веерную диаграмму направленности с максимальной эффективностью для обеспечения

связи с роботизированными комплексами. Пик характеристик антенны приходится на ситуацию, когда синфазно и равноамплитудно запитываются 5 портов. В таком случае достигается уровень КУ от 17 до 19,2 в рабочем диапазоне, ширина главного лепестка в угломестной плоскости менее  $7^\circ$ , а в азимутальной –  $32^\circ$ . Таким образом, получаем высокоэффективно работающую антенну с возможностью формирования направленного излучения. На рис. 4 приводится вид частотного сканирования при запитывании 5 портов в антенной системе.

Полученные результаты показывают, что в диапазоне частот от 8,3 до 10 ГГц антенная система сканирует лучом в азимутальной плоскости от  $49$  до  $15^\circ$  по отношению к оси нормали, при этом симметричная конструкция антенны позволяет осуществлять такое сканирование симметрично относительно основной оси.

Таким образом, кольцевая антенная решетка позволяет сформировать веерную диаграмму направленности с частотным сканированием, что обеспечивает связь с повышенной помехозащищенностью. Рассмотрим также случай, когда пред-

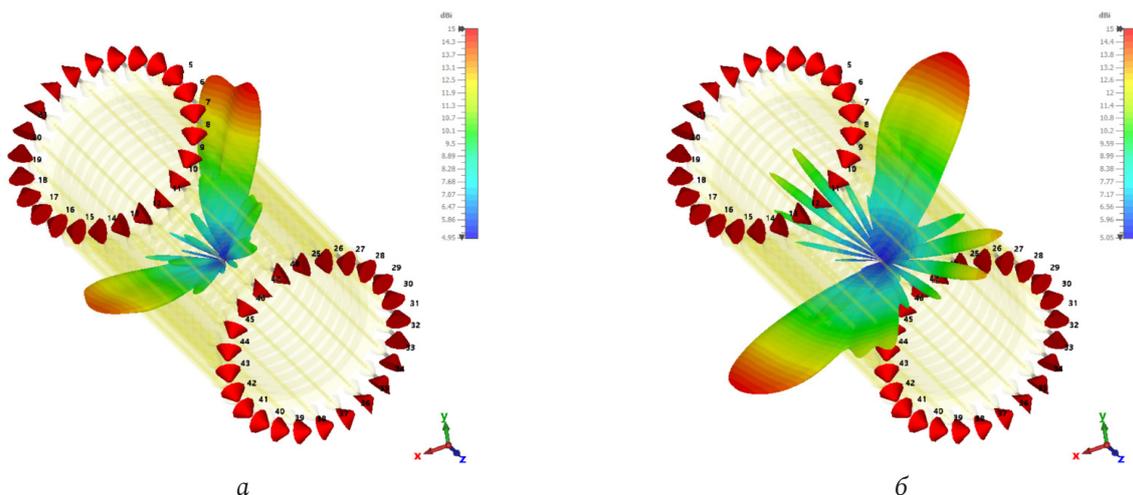


Рис. 5. Картины многолучевого режима работы антенны с частотным сканированием: а –  $f = 8,3$  ГГц; б –  $f = 9,4$  ГГц  
Fig. 5. Pictures of the multi-beam mode of operation of the antenna with frequency scanning: а –  $f = 8,3$  GHz; б –  $f = 9,4$  GHz

ложенная антенна формирует два луча. На рис. 5 приводится вид диаграмм направленности при запитывании двух пар по 6 портов, которые расположены на противоположных концах антенной системы.

Как видно, полученная антенная система позволяет обеспечить сканирование не только одним лепестком, но также и двумя лепестками с веерной диаграммой направленности. Таким образом, эта антенная система показывает высокую эффективность, а также благодаря возможности частотного сканирования данная антенная решетка может быть использована для частотно перестраиваемых систем передачи данных.

### Заключение

Полученные результаты показывают, что разработанная антенная система обеспечивает много-

лучевой режим работы с частотным сканированием. Реализованная в данной работе антенная система может быть использована для обеспечения высокоэффективной системы связи, при этом применение кольцевой антенной системы позволяет обеспечить полноазимутальную работу антенны, а применение частотного сканирования обеспечивает сканирование в угломестной плоскости. Полученная антенная система имеет малые размеры, что обуславливает высокоэффективную передачу данных в X-диапазоне.

### Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «молодежная лаборатория» № FZGM-2024-0003.

### Список литературы

1. Beam scanning lens antenna based on elliptic rotating phase distribution lens / H.-F. Wang [et al.] // 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS). Guangzhou, China, 2019. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/IWS.2019.8804122>
2. Design of medium-size dielectric bifocal lenses for wide-angle beam scanning antennas / T.V. La [et al.] // 2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). Prague, Czech Republic, 2012. P. 3287–3291. DOI: <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2012.6206003>
3. Kamalzadeh S., Soleimani M. Multibeam SIW leaky-wave antenna with beam scanning capability in two dimensions // Electronics. 2022. Vol. 11, no. 15. P. 2315. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11152315>
4. Planar millimeter-wave 2-D beam-scanning multibeam array antenna fed by compact SIW beam-forming network / J.-W. Lian [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66, no. 3. P. 1299–1310. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2797873>
5. Differentially-fed dual-polarized 2D multibeam antenna array for millimeter-wave applications / Q. Yang [et al.] // 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Shanghai, China, 2020. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMMT49418.2020.9386279>
6. Li Q., Zhang Y., Wu C.-T.M. Wide-angle frequent scanning metamaterial leaky wave antenna array for automotive radars // 2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Chengdu, China, 2018. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMMT.2018.8563472>
7. A digital multibeam array with wide scanning angle and enhanced beam gain for millimeter-wave massive MIMO applications / Y. Hu [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66, no. 11. P. 5827–5837. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2869200>

8. Feng P.-Y., Qu S.-W., Yang S. Wideband mechanical scanning lens antenna at Ku-band // 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Paris, France, 2017. P. 1076–1078. DOI: <https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928295>
9. Compact wide-angle scanning multibeam antenna array for V2X communications / M.K. Ishfaq [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2021. Vol. 20, no. 11. P. 2141–2145. DOI: <https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3100349>
10. Влияние кросс-поляризации двухполяризационных антенных элементов на эргодическую пропускную способность многоканальной системы / Е.В. Аверина [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2024. Т. 27, № 4. С. 59–67. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.4.59-67>
11. Пастернак Ю.Г., Пендюрин В.А., Сафонов К.С. Антенная решетка с коммутационным сканированием в угломестной плоскости // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 3. С. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.3.100-106>

## Информация об авторах

**Ищенко Евгений Алексеевич**, аспирант, ассистент кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* антенные системы.

*E-mail:* kursk1998@yandex.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

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

*Область научных интересов:* антенные системы, устройства СВЧ.

*E-mail:* pasternak@yandex.ru

**Проскурин Дмитрий Константинович**, кандидат физико-математических наук, ректор Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

*Область научных интересов:* антенные системы, устройства СВЧ.

*E-mail:* rector@cchgeu.ru

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

*Область научных интересов:* сверхширокополосные линзовые антенны.

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

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

---

## Physics of Wave Processes and Radio Systems

2025, vol. 28, no. 3, pp. 56–62

DOI [10.18469/1810-3189.2025.28.3.56-62](https://doi.org/10.18469/1810-3189.2025.28.3.56-62)

UDC 621.396

Original Research

Received 15 February 2025

Accepted 17 March 2025

Published 30 September 2025

## Frequency scanning ring multibeam antenna array

Evgeniy A. Ishchenko , Yury G. Pasternak, Dmitry K. Proskurin, Sergey M. Fedorov 

Voronezh State Technical University  
84, 20-letiya Oktyabrya Street,  
Voronezh, 394006, Russia

**Abstract – Background.** Implementation of scanning antennas for noise-immune communication systems and radar systems is an important and urgent task. One of the most promising methods of beam deflection is frequency scanning, which can be effectively combined with switching, which will provide full-azimuth and elevation scanning without using phase shifters. **Aim.** To study and simulate a ring multi-beam antenna system with the ability to frequency scan, as well as the ability to form several beams simultaneously. To perform simulation when feeding different ports to assess the capabilities of forming different antenna beams, as well as in multi-beam mode. To study the possibility of beam deflection by frequency with the determination of the range of operating frequencies. **Methods.** The main results are obtained on the basis of electrodynamic modeling, which was performed using the finite element method in DS CST Studio Suite 2025. The main methods of analyzing the characteristics were based on the consideration of the radiation patterns, as well as their behavior during diffraction on echelette gratings. **Results.** The characteristics of the antenna system were obtained in the frequency range from 8,3 to 10 GHz. It was found that the antenna system allows implementing full-azimuth scanning by switching a different number of input ports. It is shown that the proposed design of the antenna system can be controlled both in the beam direction and in the main lobe width by switching a different number of antenna elements, while maintaining frequency scanning in a wide range of operating frequencies. It is found that the antenna allows for the formation of two differently directed beams with frequency scanning. **Conclusion.** The proposed antenna system can be used to implement high-frequency detection of small targets, implement a noise-immune communication channel with frequency tuning to keep an object in the antenna beam. The peculiarity of the proposed multi-beam antenna is

the possibility of implementing two-coordinate scanning based on frequency scanning and switching connection of antenna elements.

*Keywords* – multi-beam antenna; frequency scanning; interference-resistant communication; ring antenna array.

✉ kursk1998@yandex.ru (Evgeniy A. Ishchenko)

 © Evgeniy A. Ishchenko et al., 2025

## References

1. H.-F. Wang et al., “Beam scanning lens antenna based on elliptic rotating phase distribution lens,” in *2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, Guangzhou, China, pp. 1–3, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/IEEE-IWS.2019.8804122>.
2. T. V. La et al., “Design of medium-size dielectric bifocal lenses for wide-angle beam scanning antennas,” in *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Prague, Czech Republic, pp. 3287–3291, 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/EuCAP.2012.6206003>.
3. S. Kamalzadeh and M. Soleimani, “Multibeam SIW leaky-wave antenna with beam scanning capability in two dimensions,” *Electronics*, vol. 11, no. 15, p. 2315, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/electronics11152315>.
4. J.-W. Lian et al., “Planar millimeter-wave 2-D beam-scanning multibeam array antenna,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 3, pp. 1299–1310, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2797873>.
5. Q. Yang et al., “Differentially-fed dual-polarized 2D multibeam antenna array for millimeter-wave applications,” in *2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Shanghai, China, pp. 1–3, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ICMMT49418.2020.9386279>.
6. Q. Li, Y. Zhang, and C.-T. M. Wu, “Wide-angle frequent scanning metamaterial leaky wave antenna array for automotive radars,” in *2018 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, Chengdu, China, pp. 1–3, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/ICMMT.2018.8563472>.
7. Y. Hu et al., “A digital multibeam array with wide scanning angle and enhanced beam gain for millimeter-wave massive MIMO applications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 66, no. 11, pp. 5827–5837, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2869200>.
8. P.-Y. Feng, S.-W. Qu, and S. Yang, “Wideband mechanical scanning lens antenna at Ku-band,” in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Paris, France, pp. 1076–1078, 2017, doi: <https://doi.org/10.23919/EuCAP.2017.7928295>.
9. M. K. Ishfaq et al., “Compact wide-angle scanning multibeam antenna array for V2X communications,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 20, no. 11, pp. 2141–2145, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/LAWP.2021.3100349>.
10. E. V. Averina et al., “Influence of crosspolarization of dual-polarized antenna elements on the ergodic capacity of a multichannel system,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 59–67, 2024, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2024.27.4.59-67>. (In Russ.)
11. Yu. G. Pasternak, V. A. Pendyurin, and K. S. Safonov, “Antenna array with switching scanning in elevation plane,” *Physics of Wave Processes and Radio Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 100–106, 2021, doi: <https://doi.org/10.18469/1810-3189.2021.24.3.100-106>. (In Russ.)

## Information about the Authors

**Evgeniy A. Ishchenko**, postgraduate student, assistant of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

*Research interests:* antenna systems.

*E-mail:* kursk1998@yandex.ru

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

**Yury G. Pasternak**, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

*Research interests:* antenna systems, microwave devices.

*E-mail:* pasternakg@mail.ru

**Dmitry K. Proskurin**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, rector of Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

*Research interests:* antenna systems, microwave devices.

*E-mail:* rector@cchgeu.ru

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

*Research interests:* ultra-wideband lens antennas.

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

*ORCID:* <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>