

Научная статья

УДК 621.396

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185645>

EDN: <https://www.elibrary.ru/DZEKEX>

РЕАЛИЗАЦИЯ ЧАСТОТНО-СКАНИРУЮЩЕЙ АНТЕННЫ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЫСОКОМОБИЛЬНЫХ МАЛЫХ ОБЪЕКТОВ

**Евгения Дмитриевна Егорова¹, Евгений Алексеевич Ищенко^{2, ✉},
Александр Евгеньевич Медведев³, Юрий Геннадьевич Пастернак⁴,
Дмитрий Константинович Проскурин⁵, Сергей Михайлович Федоров⁶**

^{1,2,3,4,5,6}Воронежский государственный технический университет,

Воронеж, Россия

¹evgenia_egorova23@mail.ru

²kursk1998@yandex.ru ✉

³medvedev.vzломhik1999@mail.ru

⁴pasternakyg@mail.ru

⁵rector@cchgeu.ru

⁶zar36@yandex.ru

Аннотация: В работе рассматривается конструкция частотно-сканирующая антенная система радиолокатора, которая построена на основе дифракционной антенной решетки эшелетт, которая формирует отражающую поверхность в антенной системе. Полученная антенная система позволяет реализовать частотное сканирование лучом в азимутальной плоскости, а также путем изменения амплитудно-фазового распределения в угломестной. В работе приводятся две основные конструкции

антенной системы на основе формирующей решетки эшелетт – когда в роли линий возбуждения применяется десять решеток на основе диско-стержневых линий; когда для возбуждения применяется линия в виде высокочастотного эшелетта. В работе приводятся конструкции антенной системы, а также картины диаграмм направленности антенной системы при изменении частоты работы антенной системы. Применение конструкции на основе системы эшелетт позволило обеспечить широкий диапазон рабочих частот, а также обеспечить малые размеры радиолокационной антенны. Полученная антенна обладает высокой разрешающей способностью, а также высоким уровнем коэффициента направленного действия, что позволяет ее эффективно применять для обнаружения высокоомобильных малых объектов, как беспилотные летательные аппараты. В статье приводится моделирование основных характеристик антенны, а также демонстрируется частотное сканирование основным лучом антенной системы.

Ключевые слова: радиолокационная антенна, частотное сканирование, антенная решетка, дифракционная решетка

Финансирование: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания "молодежная лаборатория" № FZGM-2024-0003

Для цитирования: Егорова Е.Д., Ищенко Е.А., Медведев А.Е., Пастернак Ю.Г., Проскурин Д.К., Фёдоров С.М. Реализация частотно-сканирующей антенны для радиолокационной системы обнаружения высокоомобильных малых объектов // Труды МАИ. 2025. № 143. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185645>

Original article

IMPLEMENTATION OF A FREQUENCY-SCANNING ANTENNA FOR A RADAR SYSTEM FOR DETECTING HIGHLY MOBILE SMALL OBJECTS

Evgeniya D. Egorova¹, Evgeny A. Ishchenko²✉, Alexander E. Medvedev³,
Yuri G. Pasternak⁴, Dmitry K. Proskurin⁵, Sergey M. Fedorov⁶

^{1,2,3,4,5,6}Voronezh State Technical University

Voronezh, Russia

¹evgenia_egorova23@mail.ru

²kursk1998@yandex.ru✉

³medvedev.vzломhik1999@mail.ru

⁴pasternakyg@mail.ru

⁵rector@cchgeu.ru

⁶zar36@yandex.ru

Abstract. At present, one of the most important and urgent tasks in modern radio electronics is the detection of small, highly mobile objects such as unmanned aerial vehicles (UAVs). The increasing use of drones in both civilian and military applications has created significant challenges for radar surveillance systems, particularly due to their low radar cross-section (RCS) and ability to operate at low altitudes. To address these challenges, advanced radar systems must be developed with high resolution and rapid scanning capabilities, where the antenna system plays a crucial role. This paper presents a novel radar antenna design capable of frequency scanning in the azimuthal plane. The proposed system offers significant advantages over traditional mechanically scanned or phased-array antennas by eliminating moving parts and complex phase shifters, thereby improving reliability and reducing mechanical wear. The antenna achieves electronic beam steering through frequency

modulation using an echelette diffraction grating, while pyramidal horns excited by single-wire transmission lines serve as efficient radiating elements. Through rigorous modeling using the finite element method (FEM), we investigated two configurations: a disc-rod single-wire line and an echelette-echelette line. Our analysis focused on key performance parameters including impedance matching, radiation efficiency, and beamforming characteristics. The optimized design demonstrates exceptional performance with a directivity exceeding 20 dB, making it particularly suitable for long-range detection applications. Operating in the X-band, the antenna provides a narrow beamwidth that enables precise target localization even in challenging environments. The proposed antenna offers several key advantages. Its frequency scanning capability enables rapid electronic beam steering without requiring mechanical rotation, significantly improving system response time. The simplified architecture eliminates the need for phase shifters or complex beamforming networks, reducing both cost and potential failure points. Furthermore, the narrow radiation lobe provides high resolution, significantly enhancing detection capability for small UAVs with low radar cross-sections. Experimental validation through comprehensive simulations confirmed the antenna's performance characteristics. Return loss (S_{11}) analysis demonstrated stable impedance matching across the operational bandwidth, while radiation pattern measurements showed consistent beam steering with minimal sidelobe levels. These features make the proposed antenna a promising solution for modern radar systems tasked with countering low-observable aerial threats. Future work will focus on experimental prototyping and field testing to further validate the design for practical deployment in real-world surveillance and defense applications.

Keywords: radar antenna, frequency scanning, antenna array, diffraction grating

Funding: The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment "youth laboratory" No. FZGM-2024-0003

For citation: Egorova E.D., Ishchenko E.A., Medvedev A.E., Pasternak Yu.G., Proskurin D.K., Fedorov S.M. Implementation of a frequency-scanning antenna for a radar system for detecting highly mobile small objects. *Trudy MAI*. 2025. No. 143. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=185645>

Введение

Реализация антенных систем радиолокаторов является важной и актуальной задачей. Характеристики систем радиолокации во многом определяются характеристиками используемой антенной системы, которая должна обеспечивать высокую направленность, а также высокое разрешение основного лепестка. Однако важно отметить, что при реализации системы радиолокации необходимо обеспечивать сканирование основным лучом антенны. Существует несколько основных путей реализации сканирования лучом в пространстве. Стандартным методом выступает применение поворотного устройства для антенной системы, но такое решение имеет малую надежность, высокую стоимость и вносит дополнительные потери в конструкцию антенны на излучение и передачу электромагнитных волн. Другим методом реализации сканирования луча в пространстве является использование перестраиваемого амплитудно-фазового распределения антенной решетки. Применение такой системы позволяет реализовать быстрое сканирование пространства, однако дорога в реализации и имеет

ограниченный период применения ввиду износа и малой надежности фазовращателей. Третьим методом реализации системы сканирования является применение частотно-перемещаемого луча антенны – частотное сканирование. Реализация такого метода требует специальной конструкции антенны, а также широкого диапазона рабочих частот для антенны.

Рассмотрение конструкций антенн для радиолокационных систем следует начать с простейших конструкций на основе печатных (планарных) излучателей [1]. Конструкция антенной решетки, которая приводится в работе [1] имеет единую линию питания, что позволяет сделать вывод о том, что предложенная конструкция предназначена для установки на поворотном устройстве. Также важно отметить, что антенна ввиду использования делителей сигналов имеет узкий диапазон рабочих частот, что не позволяет реализовывать высокоэффективную антенную систему радиолокатора.

Аналогичную конструкцию предлагают авторы работы [2], однако важно отметить, что используется несимметричная конструкция антенной решетки, что позволяет реализовать веерность диаграммы направленности, а также расширить диапазон рабочих частот, что позволяет использовать антенну для линейно-частотно манипулируемого радара (ЛЧМ). Однако для реализации системы пространственного сканирования также требуется применение поворотного устройства. Также важно отметить, что часто для реализации больших антенных решеток применяют систему из подрешеток, что обеспечивает дополнительное расширение диапазона рабочих частот, что также важно для радиолокационных систем [3].

Особый интерес вызывают антенные системы с частотным сканированием [4]. Реализация такой системы сканирования тесно связана с преломлением электромагнитных волн в системе подрешеток или формирования требуемой системы амплитудно-фазового распределения. Для реализации такой системы важно использование антенн с широким диапазоном рабочих частот, как антенные элементы типа Вивальди [5]. Другими методами является использование длинных линий [6-9], так как при подаче сигналов разных частот будет обеспечиваться неравномерное затухание волн, что сформирует частотно-перестраиваемый луч. Однако также важно учитывать появление паразитных лепестков антенны [10], которые могут привести к потерям эффективности, а также к ухудшению разрешающих характеристик антенны. Особенно важными являются радиолокаторы, которые поддерживают ЛЧМ модуляцию сигналов, а следовательно, работают в широком диапазоне частот [11]. Также широкополосные антенные системы требуются для радиопеленгационных комплексов [12]. Особо важно также отметить выбор диапазона рабочих частот, так одним из наиболее актуальных диапазонов для систем радиолокации – X [13-15]. Многие антенные системы радиолокаторов и пеленгаторов имеют изогнутый профиль [16, 17].

В данной работе предлагается конструкция радиолокационной антенной системы с частотным сканированием в азимутальной плоскости и амплитудно-фазовым в элевационной. Для реализации частотного сканирования используется дифракционная решетка типа эшелетт, что позволяет реализовать высокоэффективную высоконаправленную антенную системы. Особенностью предлагаемого решения является возможность реализации радиолокационной

системы как для обнаружения крупных объектов, так и для обнаружения малых БПЛА, что достигается благодаря двухосевому сканированию по частоте.

Конструкция антенной решетки системы радиолокационной антенны с частотным сканированием

В основе предлагаемой конструкции антенной системы лежит дифракционная решетка типа эшелетт [18], которая позволяет обеспечить отражение электромагнитных волн путем объединения отраженных решеткой лучей в единый луч – рис. 1.

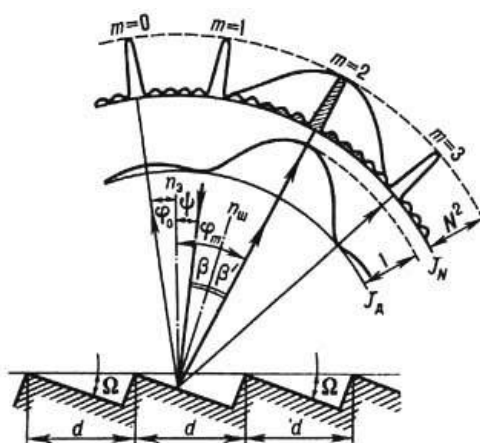
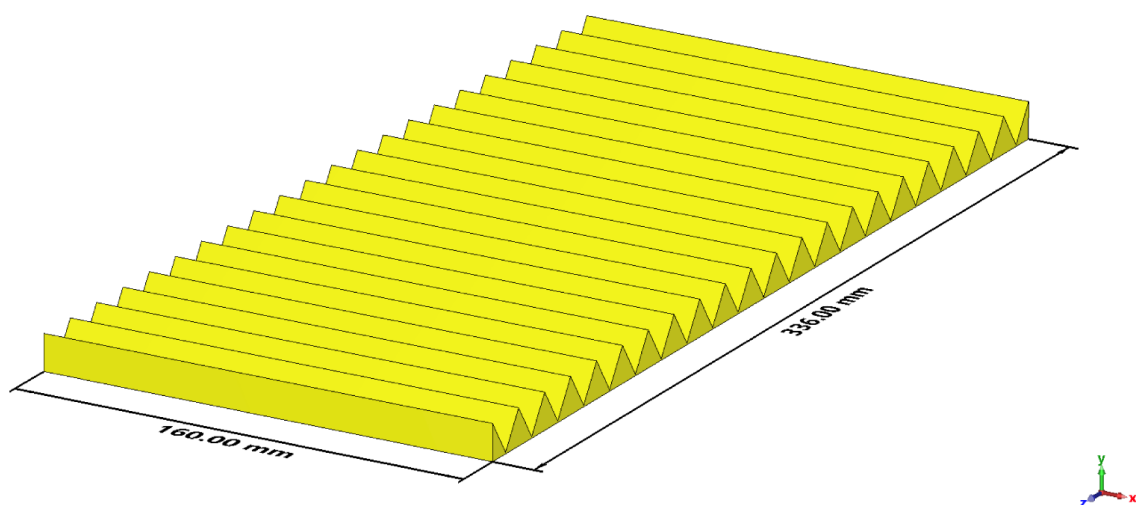


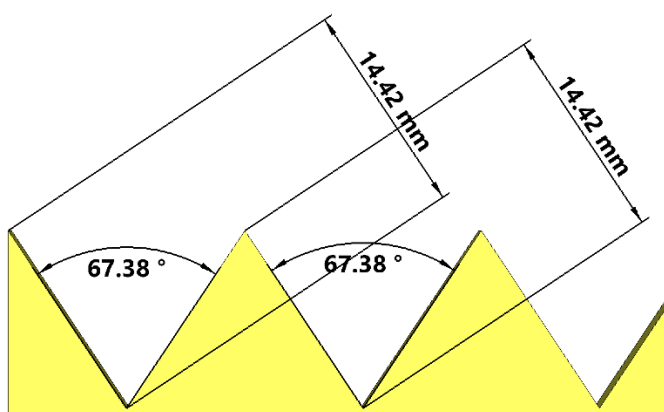
Рис. 1. Решетка эшелетт

Как видно, решетка эшелетт имеет периодическую структуру, которая служит для отражения и фокусировки лучей. Плоскости дифракционной решетки параллельны друг другу, а также имеют одинаковый угол наклона от нормали – Ω . Благодаря такой конструкции решетка эшелетт позволяет эффективно концентрировать до 70-80% энергии, что позволяет обеспечить эффективное

использование антенной системы. Разрабатываемая антенная решетка радиолокатора предназначена для работы на частоте в 10 ГГц, а также формируется на основе 10 излучающих систем в виде линий передачи. На рис. 2 приводится вид конструкции решетки эшелетт, которая предназначена для реализации высоконаправленного излучения.



а)



б)

Рис. 2. Решетка эшелетт для формирования направленного излучения: а) Решетка эшелетт; б) Размеры решетки эшелетт

Как видно, дифракционная решетка эшелетт имеет размеры 160x336 мм, а излучающая поверхность имеет длину ребра в 14.42 мм и угол раскрыва 67.38° . На основании полученной конструкции дифракционной решетки были сформированы антенные системы на основе диско-стержневой излучающей системы, а также системы эшелетт-эшелетт.

Антенная система радиолокатора на основе диско-стержневой системы эшелетт

Антенная система на основе диско-стержневой линии запитывается рупорными излучателями, которые подают электромагнитное излучение на диско-стержневую линию, при этом начальные дисковые элементы имеют меньший размер, чтобы обеспечить экспоненциальное возбуждение волн. На рис. 3 приводится вид антенны с диско-стержневой системой питания.

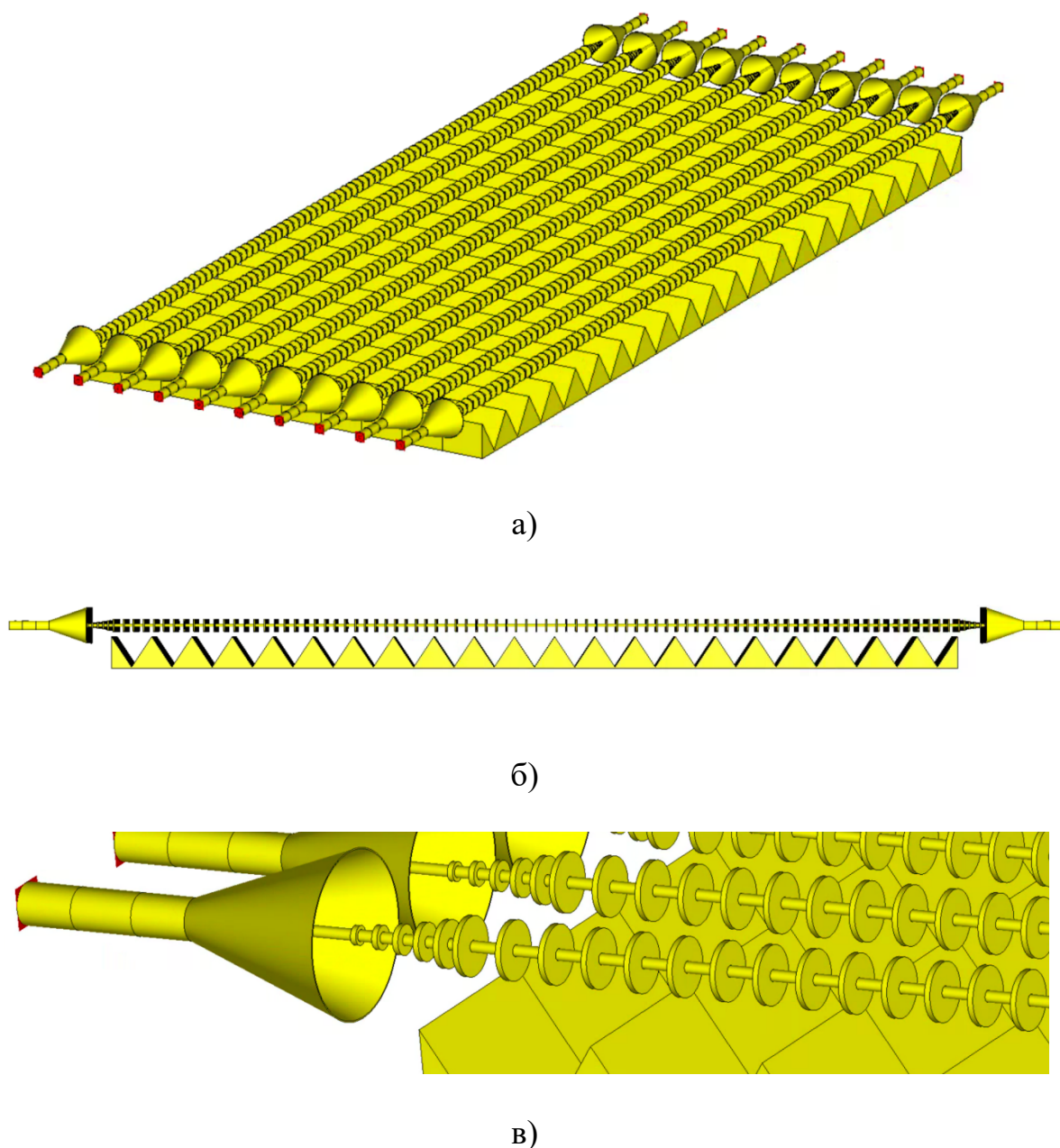
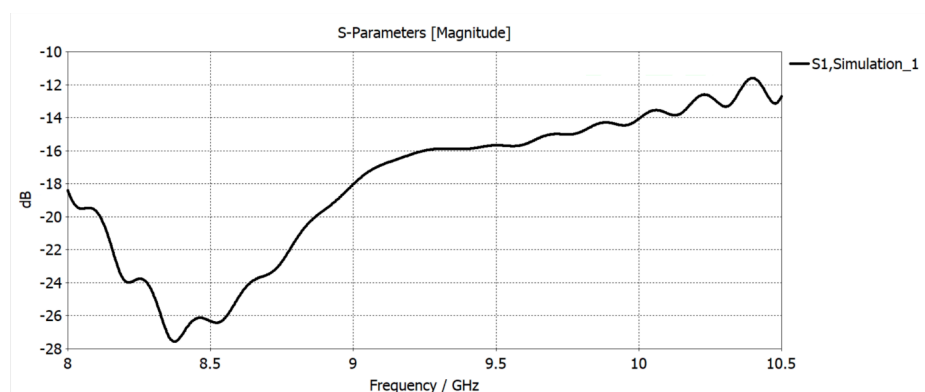


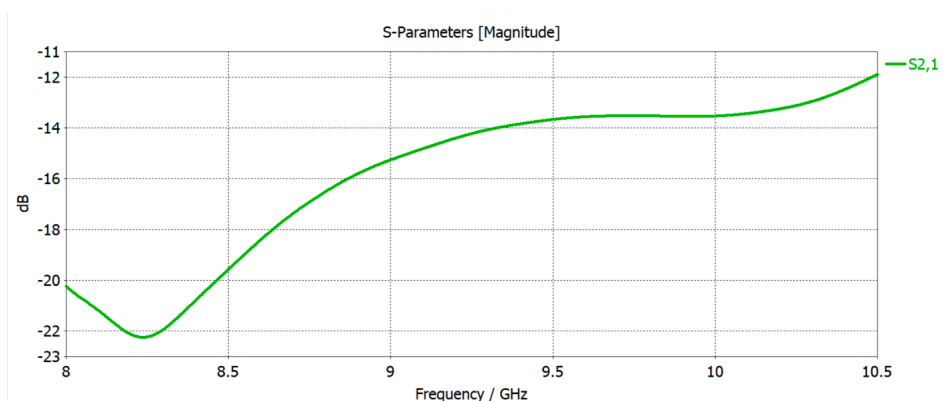
Рис. 3. Дisko-стержневая антенная система на основе решетки эшелетт: а) Антенная система из 10 излучающих линий; б) Вид антенной линии; в) Дискoвая система

Антенная система состоит из 10 излучающих линий, которые запитываются рупорными антенными элементами, что позволяет обеспечить широкий диапазон рабочих частот. Основная дискoвая система имеет диаметр 5 мм, толщину 0.5 мм, расстояние между соседними дисками составляет 3.5 мм. Полная длина

однопроводной линии от начала раскрыва рупоров составляет 387.5 мм. Возбуждающая дисковая система в начале состоит из постепенно увеличивающихся дисков с диаметрами: 1.63, 2.05, 2.56, 3.2, 4 мм соответственно. Такое распределение позволяет обеспечить экспоненциальное возбуждение. Для обеспечения максимальной эффективности работы антенной системы должна обеспечиваться передача из одного порта линии в другую уровня сигнала, который соответствует коэффициенту передачи в -10 дБ. На рис. 4 приводится вид графика возвратных потерь для антенной системы, а также коэффициент передачи с одного конца однопроводной линии на другой.



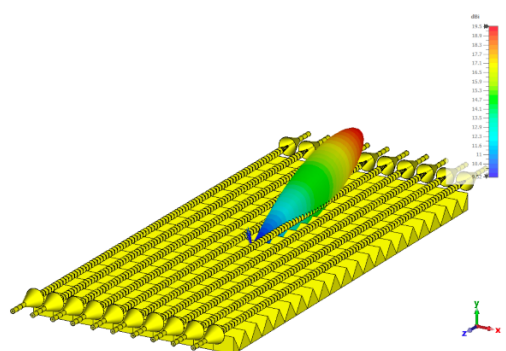
a)



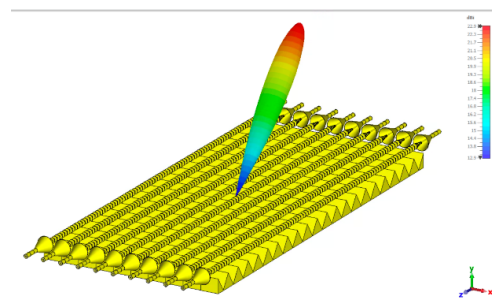
б)

Рис. 4. Характеристики согласования антенной системы

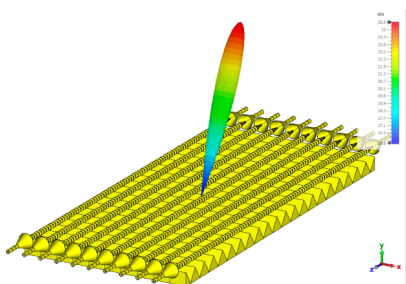
Полученная антенная система обеспечивает стабильную работу в диапазоне частот от 8 до 10.5 ГГц. На рис. 5 приводится вид диаграмм направленности антенной системы, что позволяет оценить возможность частотного сканирования.



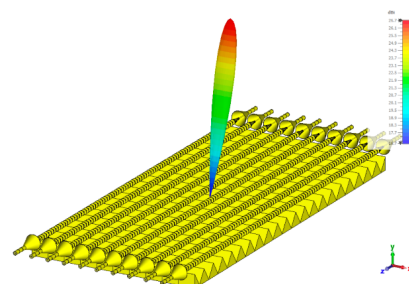
а) $f=8$ ГГц



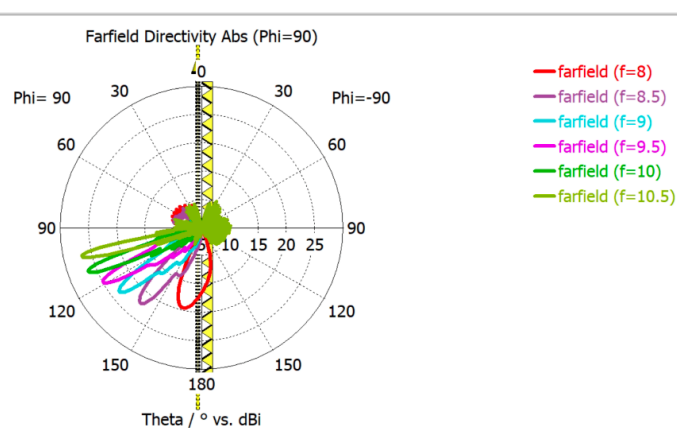
б) $f=8.8$ ГГц



в) $f=9.7$ ГГц



г) $f=10.5$ ГГц



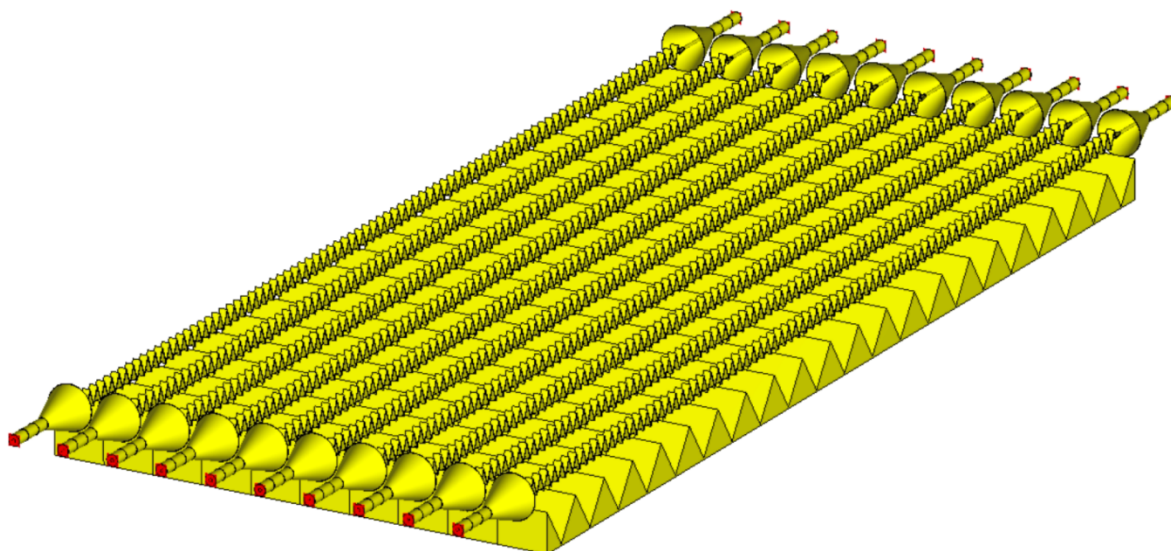
д)

Рис. 5. Картины диаграмм направленности диско-стержневой антенной системы

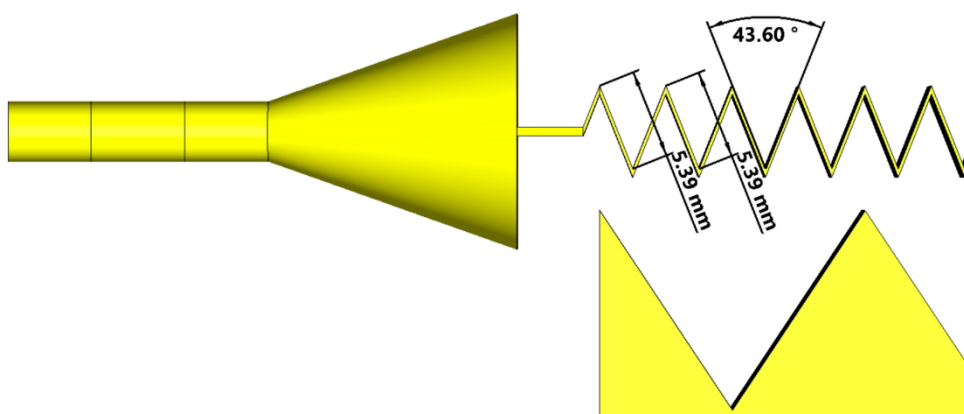
Полученная антенная система обеспечивает частотное сканирование в диапазоне частот от 8 до 10.5 ГГц, при этом центральный лепесток в азимутальной плоскости перемещается в диапазоне углов от 13 до 77 градусов, что позволяет обеспечить высокоэффективное сканирование пространства. Для сканирования в угломестной плоскости необходимо изменить амплитудно-фазовое распределение входной группы портов. Полученная антенна обладает минимальным уровнем КНД в 19.5 дБ, уровень боковых лепестков -9 дБ, таким образом, обеспечивается высокая эффективность работы даже в краевых режимах. В области центрального излучения центральный лепесток обладает уровнем КНД в 26.7 дБ, уровнем боковых лепестков в -13.3 дБ. КПД антенны превышает 70% во всем используемом диапазоне рабочих частот, что соответствует предельным характеристикам дифракционной решетки эшелетт. Реализация приведённой конструкции достаточно сложна, так как требуется дополнительная фиксация диско-стержневой системы. Однако использование системы эшелетт позволяет реализовать ответную решетку для излучения, что упростит возможность реализации антенной системы.

Антенная система радиолокатора на основе решеток эшелетт-эшелетт

Для реализации антенной системы радиолокатора на основе системы эшелетт-эшелетт для возбуждения также используется система из конических рупоров, которые формируют антенную решетку из 10 элементов. На рис. 6 приводится вид антенной системы на основе решетки эшелетт-эшелетт.



а)

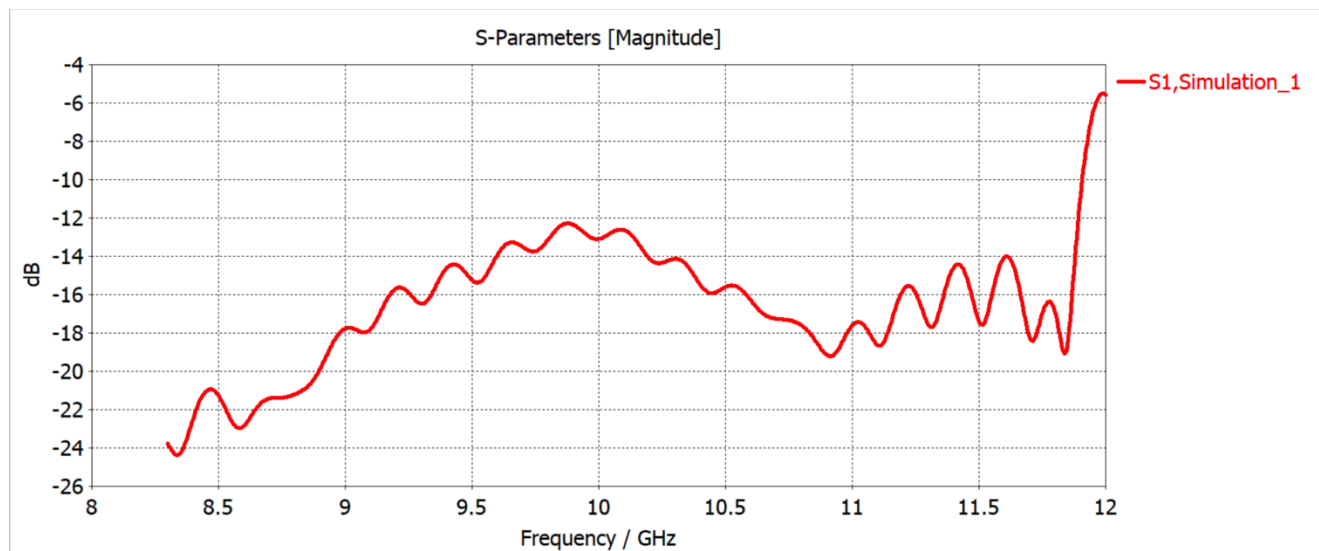


б)

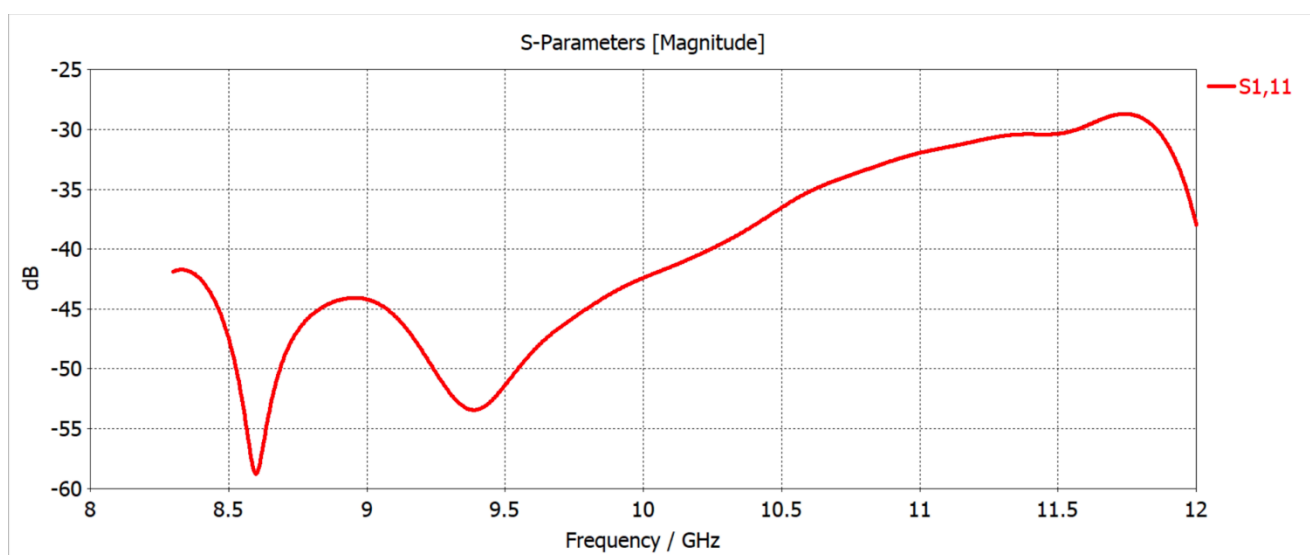
Рис. 6. Конструкция антенной системы эшелетт-эшелетт

Как видно из конструкции, антенная система обладает двумя решетками эшелетт – одна – дифракционная решетка, формирующая отражающую поверхность, вторая – система возбуждения с длиной стороны в 5.39 мм и углом решетки в 43.60° ; полная длина решетки возбуждения составляет 338 мм. Так как используется система питания, которая представляет из себя дифракционную решетку, то следует ожидать

ухудшение связи между началом и концом линии, что показывают характеристики линии передачи, которые приводятся на рис. 7.



а)

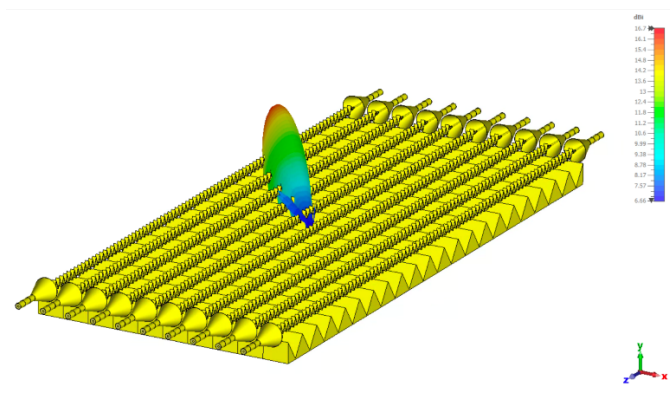


б)

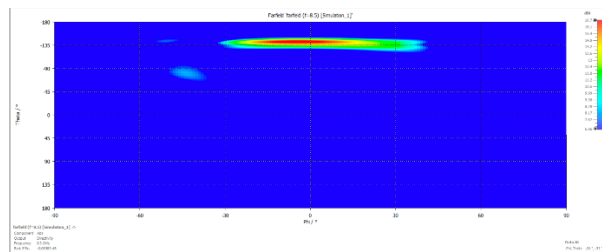
Рис. 7. Характеристики согласования антенной системы эшелетт-эшелетт

Полученные результаты показывают, что антенная система обеспечивает эффективную работу в диапазоне частот от 8.5 до 11.7 ГГц, при этом КПД антенны

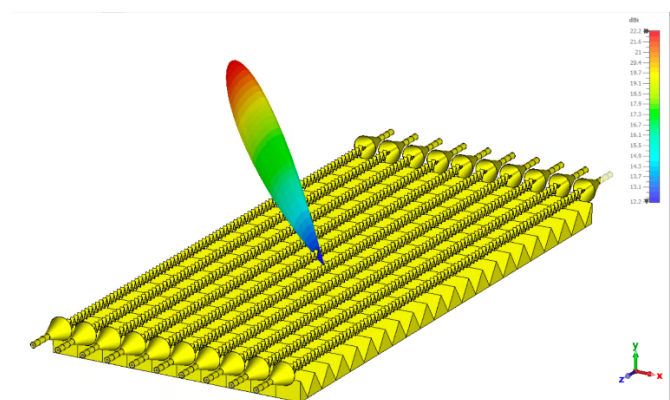
более 70%. На рис. 8 приводится вид диаграмм направленности антенны, при этом в линию питания внесено измененное амплитудно-фазовое распределение, что позволяет продемонстрировать сканирование как в азимутальной – частотное сканирование, так и в угломестной плоскости.



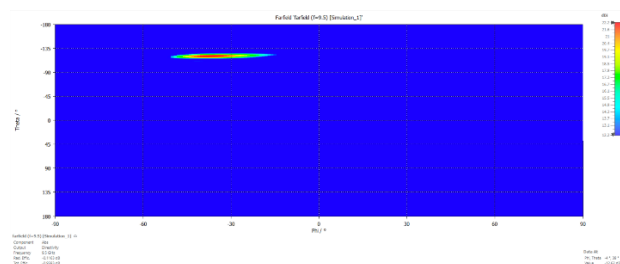
а) $f=8.5$ ГГц



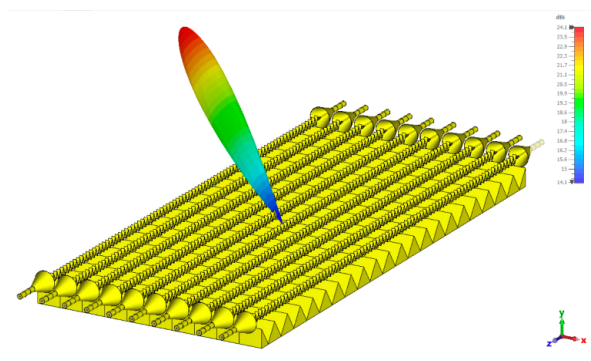
б) $f=8.5$ ГГц



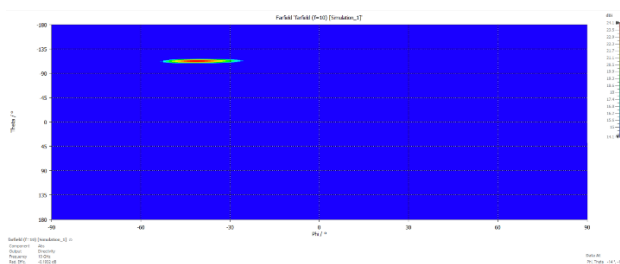
в) $f=9.5$ ГГц



г) $f=9.5$ ГГц



д) $f=10$ ГГц



е) $f=10$ ГГц

Рис. 8. Диаграммы направленности системы эшелетт-эшелетт

Полученная антенная система позволяет обеспечить частотное сканирование в диапазоне частот от 8.3 до 12 ГГц, при этом сохраняется высокий уровень КНД. Минимальный уровень КНД составил 14.8 дБ, а максимальный уровень составил 23.2 дБ. Угол сканирования сохранился и остался неизменным, как при использовании диско-стержневой антенны.

Заключение

Рассмотренные в данной работе антенные системы радиолокатора позволяют обеспечить частотное сканирование в пространстве, что позволяет обеспечить высокую эффективность работы антенной системы радиолокатора. Полученная антенная система реализует высокую направленность в азимутальной плоскости с перестроением по частоте благодаря применению дифракционной решетки эшелетт. Для реализации сканирования по угломестной плоскости применяется изменение амплитудно-фазового распределения, которое может быть сформировано путем применения диаграммообразующего устройства, как линза Ротмана [19] или апланатическая линза [20]. При этом важно отметить, что разработанная антенная система обладает малыми размерами, что позволяет ее использовать в задачах построения высококомобильных комплексов радиолокации.

Список источников

1. G. Jie, D. Jinsong, T. Xing, C. Rigang. Design of radar antenna based on HFSS // 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE). Shanghai, China, 2017. P. 460-463. DOI: [10.1109/ICRAE.2017.8291430](https://doi.org/10.1109/ICRAE.2017.8291430)

2. M. Pehlivan, Y. Asci, K. Yegin, C. Ozdemir. X band patch array antenna design for marine radar application // 2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON). Poznan, Poland, 2018. P. 50-51. DOI: [10.23919/MIKON.2018.8405268](https://doi.org/10.23919/MIKON.2018.8405268)
3. P. Gaboardi, L. Rosa, A. Cucinotta, S. Selleri. Patch Array Antenna for UWB Radar Applications // 2006 European Radar Conference. Manchester, UK, 2006. P. 281-284. DOI: [10.1109/EURAD.2006.280329](https://doi.org/10.1109/EURAD.2006.280329)
4. S.A. Seguin, B.D. Cordill, L. Cohen. Radar system impacts due to spectrum attributes of frequency-steerable phased array antennas // 2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13). Ottawa, ON, Canada, 2013. P. 1-5. DOI: [10.1109/RADAR.2013.6586135](https://doi.org/10.1109/RADAR.2013.6586135)
5. Jiyu Guo, Qing zhao, Jiao Jiao, Chunguang Ma, Jianjian Huo, Shuzhang Liu. An Ultrawideband Antipodal Vivaldi Antenna for borehole radar application // 2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR). Edinburgh, 2017. P. 1-5. DOI: [10.1109/IWAGPR.2017.7996044](https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2017.7996044)
6. X. Lv, W. Cao, Z. Zeng, S. Shi. A Circularly Polarized Frequency Beam-Scanning Antenna Fed by a Microstrip Spoof SPP Transmission Line // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018. V. 17, No. 7. P. 1329-1333. DOI: [10.1109/LAWP.2018.2844288](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2844288)
7. N.M. Boskovic, B.S. Jekanovi, A.D. Nesic. Compact frequency scanning antenna array with SRR phase shifters // 2013 11th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS). Nis, Serbia, 2013. P. 437-439. DOI: [10.1109/TELSKS.2013.6704415](https://doi.org/10.1109/TELSKS.2013.6704415)
8. M. Ranjbar Naeini, M. Fakharzadeh, F. Farzaneh. Travelling-wave Ka-band Frequency Scanning Antennas for millimeter-wave imaging applications // 2016 8th International

Symposium on Telecommunications (IST). Tehran, Iran, 2016. P. 591-595. DOI: [10.1109/ISTEL.2016.7881890](https://doi.org/10.1109/ISTEL.2016.7881890)

9. R. Huang, Y. Shi, W. Cao, W. Ma, S. Shi. A Frequency Scanning Array Antenna Based on Magneto-Electric Dipole Structure With Enhanced Scanning Range and Gain Flatness // 2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Shanghai, China, 2020. P. 1-3. DOI: [10.1109/ICMMT49418.2020.9386793](https://doi.org/10.1109/ICMMT49418.2020.9386793)

10. M. R. Naeini, M. Fakharzadeh. Sidelobe Level Improvement in a Frequency Scanning Antenna at Ka-band // 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. Boston, MA, USA, 2018. P. 1511-1512. DOI: [10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609043](https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609043)

11. Мелёшин Ю.М., Хасанов М.С., Карпов В.Н., Лялин К.С. ММО радиолокатор на базе линейно-частотно модулированных сигналов с медленной фазокодовой манипуляцией // Труды МАИ. 2024. № 138. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182670>

12. Славянский А.О., Латышев А.Е., Безкаравайный В.А., Миронов П.Н., Нелина М.В., Скрынский В.Р. Исследование методов пеленгации наземных радиоэлектронных систем управления навигационными космическими аппаратами // Труды МАИ. 2024. № 137. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=181882>

13. Мелёшин Ю.М. Исследование и разработка антенны X-диапазона частот для формирования волн с ненулевым орбитальным угловым моментом // Труды МАИ. 2024. № 135. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=179687>

14. Каменский К.В. Влияние траекторных нестабильностей и характеристик бортовой навигационной системы на качество радиолокационного изображения при

- синтезировании апертуры // Труды МАИ. 2022. № 125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168186>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)
15. V. Alagumurugesan, A. Birwal, S.S. Srikant, M. Hannan, S. Ghosh. Design and Analysis of a Slotted Rectangular Patch Antenna for Dual-Band Radar Applications in C and X Bands // 2024 9th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). Coimbatore, India, 2024. P. 88-93. DOI: [10.1109/ICCES63552.2024.10859496](https://doi.org/10.1109/ICCES63552.2024.10859496)
16. Король Д.Г., Темченко В.С. Исследование цилиндрической конформной антенной решетки с печатным излучателем для БПЛА // Труды МАИ. 2023. № 129. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=173026>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-14)
17. M. Angelilli, L. Infante, P. Pacifici. A family of Secondary Surveillance Radars based on Conformal Antenna array geometries // 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf). Seattle, WA, USA, 2017. P. 1681-1684. DOI: [10.1109/RADAR.2017.7944477](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944477)
18. E.V. Kuposova, S.N. Vlasov. Diffraction at gratings in quasi-optical systems // Proc. SPIE 2211, Millimeter and Submillimeter Waves, (19 August 1994). URL: <https://doi.org/10.1117/12.183025>
19. T. K. Vo Dai, T. Nguyen, O. Kilic. A compact microstrip Rotman lens design // 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). Boulder, CO, USA, 2017. P. 1-2. DOI: [10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878311](https://doi.org/10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878311)
20. A.L. Belostotsky, A.S. Leonov. Design of aplanatic waveguide Fresnel lenses and aberration-free planar optical systems // Journal of Lightwave Technology. 1993. V. 11, No. 8. P. 1314-1319. DOI: [10.1109/50.254089](https://doi.org/10.1109/50.254089)

References

1. G. Jie, D. Jinsong, T. Xing, C. Rigang. Design of radar antenna based on HFSS. *2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE)*. Shanghai, China, 2017. P. 460-463. DOI: [10.1109/ICRAE.2017.8291430](https://doi.org/10.1109/ICRAE.2017.8291430)
2. M. Pehlivan, Y. Asci, K. Yegin, C. Ozdemir. X band patch array antenna design for marine radar application. *2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)*. Poznan, Poland, 2018. P. 50-51. DOI: [10.23919/MIKON.2018.8405268](https://doi.org/10.23919/MIKON.2018.8405268)
3. P. Gaboardi, L. Rosa, A. Cucinotta, S. Selleri. Patch Array Antenna for UWB Radar Applications. *2006 European Radar Conference*. Manchester, UK, 2006. P. 281-284. DOI: [10.1109/EURAD.2006.280329](https://doi.org/10.1109/EURAD.2006.280329)
4. S.A. Seguin, B.D. Cordill, L. Cohen. Radar system impacts due to spectrum attributes of frequency-steerable phased array antennas. *2013 IEEE Radar Conference (RadarCon13)*. Ottawa, ON, Canada, 2013. P. 1-5. DOI: [10.1109/RADAR.2013.6586135](https://doi.org/10.1109/RADAR.2013.6586135)
5. Jiyu Guo, Qing zhao, Jiao Jiao, Chunguang Ma, Jianjian Huo, Shuzhang Liu. An Ultrawideband Antipodal Vivaldi Antenna for borehole radar application. *2017 9th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar (IWAGPR)*. Edinburgh, 2017. P. 1-5. DOI: [10.1109/IWAGPR.2017.7996044](https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2017.7996044)
6. X. Lv, W. Cao, Z. Zeng, S. Shi. A Circularly Polarized Frequency Beam-Scanning Antenna Fed by a Microstrip Spoof SPP Transmission Line. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2018. V. 17, No. 7. P. 1329-1333. DOI: [10.1109/LAWP.2018.2844288](https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2844288)
7. N.M. Boskovic, B.S. Jokanovic, A.D. Nesic. Compact frequency scanning antenna array with SRR phase shifters. *2013 11th International Conference on Telecommunications in*

- Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS)*. Nis, Serbia, 2013. P. 437-439. DOI: [10.1109/TELSKS.2013.6704415](https://doi.org/10.1109/TELSKS.2013.6704415)
8. M. Ranjbar Naeini, M. Fakharzadeh, F. Farzaneh. Travelling-wave Ka-band Frequency Scanning Antennas for millimeter-wave imaging applications. *2016 8th International Symposium on Telecommunications (IST)*. Tehran, Iran, 2016. P. 591-595. DOI: [10.1109/ISTEL.2016.7881890](https://doi.org/10.1109/ISTEL.2016.7881890)
9. R. Huang, Y. Shi, W. Cao, W. Ma, S. Shi. A Frequency Scanning Array Antenna Based on Magneto-Electric Dipole Structure With Enhanced Scanning Range and Gain Flatness. *2020 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*. Shanghai, China, 2020. P. 1-3. DOI: [10.1109/ICMMT49418.2020.9386793](https://doi.org/10.1109/ICMMT49418.2020.9386793)
10. M. R. Naeini, M. Fakharzadeh. Sidelobe Level Improvement in a Frequency Scanning Antenna at Ka-band. *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*. Boston, MA, USA, 2018. P. 1511-1512. DOI: [10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609043](https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609043)
11. Meleshin Yu.M., Khasanov M.S., Karpov V.N., Lyalin K.S. MIMO radar based on chirps with slow phase shift keying. *Trudy MAI*. 2024. No. 138. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182670>
12. Slavyanskii A.O., Latyshev A.E., Bezkaravainyi V.A., Mironov P.N., Nelina M.V., Skrynskii V.R. Investigation of direction finding methods for Ground-based radioelectronic control systems for navigation spacecraft. *Trudy MAI*. 2024. No. 137. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=181882>

13. Meleshin Yu.M. Research and development of x-band antenna for wave formation with non-zero orbital angular momentum. *Trudy MAI*. 2024. No. 135. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=179687>
14. Kamenskii K.V. Trajectory instabilities and onboard navigation system characteristics influence on synthetic aperture radar image quality. *Trudy MAI*. 2022. No. 125. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=168186>. DOI: [10.34759/trd-2022-125-14](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-14)
15. V. Alagumurugesan, A. Birwal, S.S. Srikant, M. Hannan, S. Ghosh. Design and Analysis of a Slotted Rectangular Patch Antenna for Dual-Band Radar Applications in C and X Bands. *2024 9th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. Coimbatore, India, 2024. P. 88-93. DOI: [10.1109/ICCES63552.2024.10859496](https://doi.org/10.1109/ICCES63552.2024.10859496)
16. Korol' D.G., Temchenko V.S. Study of a cylindrical conformal antenna array with a patch emitter for UAV. *Trudy MAI*. 2023. No. 129. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=173026>. DOI: [10.34759/trd-2023-129-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-14)
17. M. Angelilli, L. Infante, P. Pacifici. A family of Secondary Surveillance Radars based on Conformal Antenna array geometries. *2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)*. Seattle, WA, USA, 2017. P. 1681-1684. DOI: [10.1109/RADAR.2017.7944477](https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944477)
18. E.V. Kuposova, S.N. Vlasov. Diffraction at gratings in quasi-optical systems. *Proc. SPIE 2211, Millimeter and Submillimeter Waves, (19 August 1994)*. URL: <https://doi.org/10.1117/12.183025>
19. T. K. Vo Dai, T. Nguyen, O. Kilic. A compact microstrip Rotman lens design. *2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM)*. Boulder, CO, USA, 2017. P. 1-2. DOI: [10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878311](https://doi.org/10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878311)

20. A.L. Belostotsky, A.S. Leonov. Design of aplanatic waveguide Fresnel lenses and aberration-free planar optical systems. *Journal of Lightwave Technology*. 1993. V. 11, No. 8. P. 1314-1319. DOI: [10.1109/50.254089](https://doi.org/10.1109/50.254089)

Статья поступила в редакцию 20.03.2025

Одобрена после рецензирования 31.03.2025

Принята к публикации 25.08.2025

The article was submitted on 20.03.2025; approved after reviewing on 31.03.2025; accepted for publication on 25.08.2025