

РАДИОФИЗИКА

УДК 621.396.967:621.396.677.85

DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).44-54

Поступила в редакцию / Received 13.02.2025

ГРНТИ 47.49.29+47.45.29

Специальность ВАК 2.2.14.

Принята к публикации / Accepted 08.04.2025

Научная статья

РЕАЛИЗАЦИЯ ДИАГРАММООБРАЗУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ АПЛАНТИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ СКАНИРУЮЩЕЙ АНТЕННОЙ СИСТЕМЫ РАДИОЛОКАТОРА

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

Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Россия)

Аннотация. В статье рассматривается диаграммообразующее устройство на основе аплантической линзы, которая формируется на основе полистиролового заполнения, которое заключается в волноводную систему. Разработанная система обладает возможностью реализации амплитудно-фазового распределения в широком диапазоне рабочих частот путем запитывания входной группы из двадцати пяти портов, которые обеспечивают реализацию диаграммообразования на выходных тринадцати портах. Для повышения эффективности работы разработанного устройства в конструкцию диаграммообразующего устройства были интегрированы двенадцать балластных портов, которые обеспечивают гашение побочных излучений, а также траекторий распространения электромагнитных волн. Приведенные в работе результаты показывают, что предлагаемая система диаграммообразования позволяет обеспечить управление характеристиками амплитудно-фазового распределения в широком диапазоне частот, при этом обеспечить минимальные потери и высокую эффективность передачи электромагнитных волн. Для подтверждения работоспособности разработанного диаграммообразующего устройства выполнялось моделирование как системы отдельно, так и в виде системы диаграммообразования для антенной системы радиолокатора. Полученные результаты показали, что применение системы диаграммообразования позволяет обеспечить сканирование лучом антенны в широком диапазоне рабочих частот, что особенно востребовано в системах радиолокации, а также при реализации одновременного частотного и амплитудно-фазового сканирования антенной системой.

Ключевые слова: *диаграммообразующее устройство, аплантическая линза, амплитудно-фазовое распределение, система запитывания антенны, широкополосное диаграммообразование.*

Для цитирования: Проскурин Д. К., Пастернак Ю. Г., Фёдоров С. М., Ищенко Е. А., Медведев А. Е. Реализация диаграммообразующего устройства на основе аплантической линзы для реализации сканирующей антенной системы радиолокатора // Вестник НовГУ. 2025. 1 (139). 44–54. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).44-54

Research Article

IMPLEMENTATION OF A BEAMFORMING DEVICE BASED ON AN APLANATIC LENS FOR THE IMPLEMENTATION OF A RADAR SCANNING ANTENNA SYSTEM

Proskurin D. K., Pasternak Yu. G., Fyodorov S. M., Ishchenko E. A., Medvedev A. E.

Voronezh State Technical University (Voronezh, Russia)

Abstract. The article considers a beamforming device based on an aplanatic lens, which is formed on the basis of a polystyrene filling, enclosed in a waveguide system. The developed system has the ability to implement amplitude-phase distribution in a wide range of operating frequencies by feeding the input group of twenty-five ports, which ensure the implementation of beamforming on the output of thirteen ports. To improve

the efficiency of the developed device, twelve ballast ports were integrated into the design of the beamforming device, which provide suppression of spurious emissions, as well as trajectories of electromagnetic wave propagation. The results presented in the work show that the proposed beamforming system allows for control of the characteristics of the amplitude-phase distribution in a wide frequency range, while ensuring minimal losses and high efficiency of electromagnetic wave transmission. To confirm the operability of the developed beamforming device, modeling was performed both as a separate system and as a beamforming system for the radar antenna system. The obtained results showed that the use of the beamforming system allows for scanning of the antenna beam in a wide range of operating frequencies, which is especially in demand in radar systems, as well as in the implementation of simultaneous frequency and amplitude-phase scanning by the antenna system.

Keywords: *beamforming device, aplanatic lens, amplitude-phase distribution, antenna feeding system, broadband beamforming.*

For citation: Proskurin D. K., Pasternak Yu. G., Fyodorov S. M., Ishchenko E. A., Medvedev A. E. Implementation of a beamforming device based on an aplanatic lens for the implementation of a radar scanning antenna system // Vestnik NovSU. 2025. 1 (139). 44–54. DOI: 10.34680/2076-8052.2025.1(139).44-54

Введение

Реализация антенных решеток для повышения направленных свойств антенн, а также реализация возможности отклонения луча путем изменения амплитудно-фазового распределения является важной и актуальной задачей. Для обеспечения требуемого амплитудно-фазового распределения на входах антенных элементов используются фазовращатели, линзовые системы, линии задержек и другие системы диаграммообразования. Наибольшей гибкостью с точки зрения настройки, а также управления характеристиками антенн обладают активные фазовращатели, которые способны обеспечивать точную настройку фазы и амплитуды сигналов. Однако высокая стоимость фазовращателей, а также необходимость запитывания каждого узла независимо приводит к значительному усложнению системы диаграммообразования. Для решения такой проблемы могут быть использованы специализированные линзовые системы, которые позволяют реализовать изменение амплитудно-фазового распределения на выходе системы, чем становится возможным обеспечение управлением лучом антенной системы, подключенной к линзе.

Реализация систем диаграммообразования на основе линз является популярной проблемой. В работе [1] авторы предлагают систему диаграммообразования на основе линзы Люнеберга. Система диаграммообразования на основе такой линзы реализуется за счет того, что протекающие волны через линзу Люнеберга выравнивают фронт волны, чем формируется плоская волна, а также обеспечивается требуемое амплитудно-фазовое распределение в антенной системе. Для этого необходимо смещать точку запитывания по сфере линзы для возбуждения антенной решетки. Недостатком же линз Люнеберга является то, что их производство – высокоточный и сложный процесс. В работе [1] авторы используют плоскую линзу, которая реализуется путем засверливания диэлектрика с разными диаметрами. Даже малая ошибка в изготовлении линзы Люнеберга может привести к серьезному нарушению фазы электромагнитных волн, протекающих в системе.

Другим методом реализации системы диаграммообразования являются линзы Ротмана [2–6]. Линза Ротмана является печатной системой диаграммообразования, что приводит к росту потерь в области частот более 10 ГГц. Особенностью линз Ротмана является то, что диаграммообразование в ее структуре возникает в процессе подачи сигналов на входную группу портов, каждый из которых имеет разные пути распространения [2], чем и формируется требуемое амплитудно-фазовое распределение. Линзы Ротмана могут быть модифицированы в процессе изготовления и реализации систем диаграммообразования, например, в работах [3, 4] линза Ротмана складывается вдвое, что позволяет уменьшить конструкцию. Для расчета характеристик линзы Ротмана применяются выражения, которые были выведены Ротманом-Тернером [5], при этом важную роль играют балластные порты, которые позволяют погасить побочные излучения и распространения электромагнитных волн. Однако даже с учетом возможности управления путями распространения электромагнитных волн в системе диаграммообразования на основе линзы Ротмана для ряда задач все равно требуется установка фазовращателей [6].

Помимо применения линзы Ротмана и фазовращателей для системы диаграммообразования применяется может быть использована система на основе апланатической линзы [7, 8]. Применение такой системы диаграммообразования позволяет уменьшить фазовые ошибки, так как распространение волн в ее теле подчиняется законам оптики для апланатических систем. В данной работе предлагается конструкция апланатической линзы для реализации системы диаграммообразования антенной решетки при реализации сканирования лучом антенны радиолокатора.

Конструкция системы диаграммообразования на основе апланатической линзы

Анализ конструкции следует начать с того, что апланатическая линза – поверхность распространения электромагнитных или оптических сигналов, которая при преломлении или отражении пучков не вызывает абберационных искажений. В процессе исследования используется апланатическая линза с одним изгибом, что позволит упростить конструкцию, а также расчет системы диаграммообразования [9].

В процессе исследования апланатическая линза формировалась на основе диэлектрических поверхностей на основе полистирола, которые формируют тело линзы, при этом для изоляции системы от внешних помех тело линзы помещается в волноводную структуру. На рисунке 1 приводится вид конструкции апланатической линзы для реализации системы диаграммообразования.

Полученная система диаграммообразования состоит из 25 входных портов (Source), которые позволят сформировать перестраиваемое амплитудно-фазовое распределение на группе из 13 выходных портов (Load). Для гашения побочных

траекторий распространения волн, а также повышения эффективности работы системы диаграммообразования в конструкцию была внедрена система из 12 балластных портов (Dummy). В процессе использования линзы для диаграммообразования на каждый порт входной группы подается сигнал, которые сформирует на выходе разные амплитудно-фазовые распределения. На 12 балластных портов необходимо обеспечить нагрузку 50 Ом, что позволит погасить побочные излучения, попадающие на них. Проведем электродинамическое моделирование системы диаграммообразования на основе апланатической линзы.

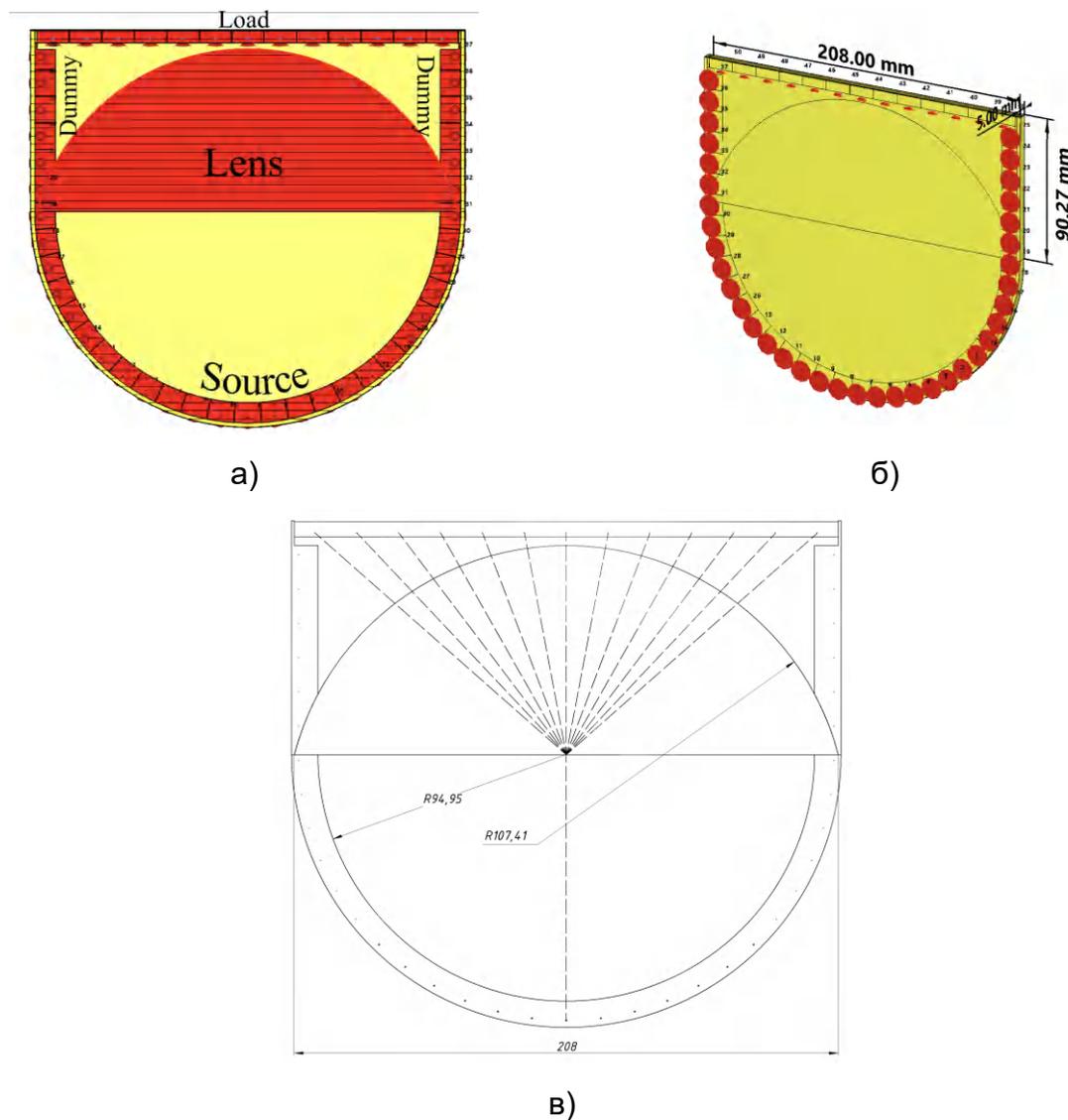
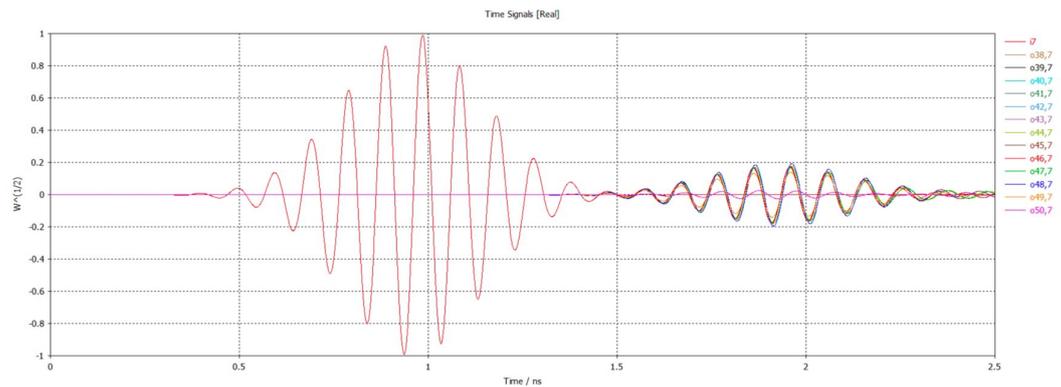


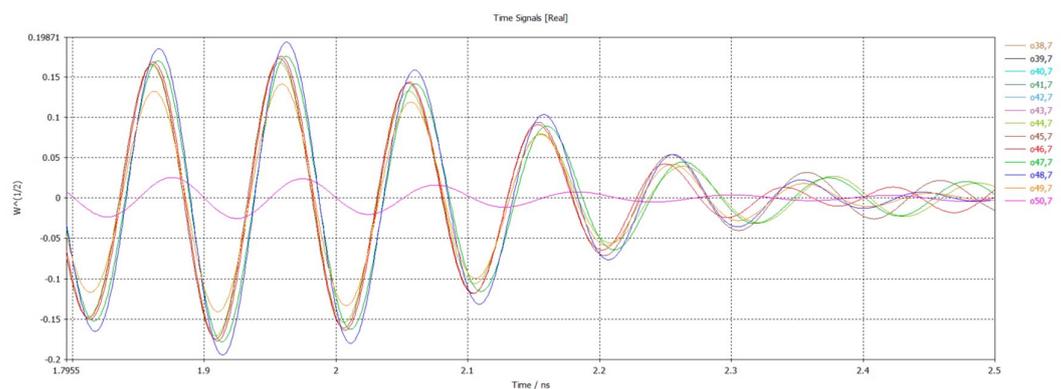
Рисунок 1. Конструкция апланатической линзы: а) тело линзы; б) волноводная система с помещенной системой диаграммообразования; в) тело линзы с ожидаемыми путями распространения лучей из центрального порта

Характеристики диаграммообразующей системы на основе апланатической линзы

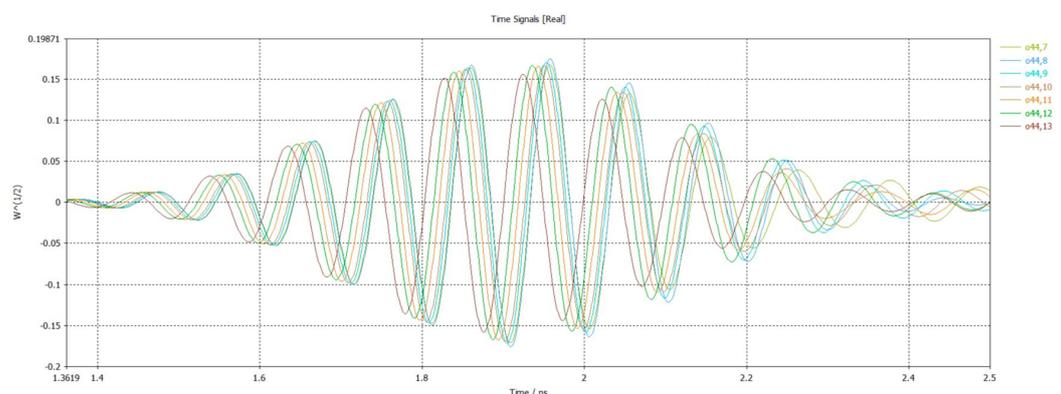
В процессе моделирования система диаграммообразования запитывалась от центрального порта против часовой стрелки семью портами поочередно. На рисунке 2 приводится вид сигналов при запитывании центрального порта (7), а также изменение сигнала на выходном центральном порту (44) при запитывании оставшихся портов (7–13).



а)



б)



в)

Рисунок 2. Характеристики сигналов при протекании через систему диаграммообразования на основе апланатической линзы: а), б) протекание сигналов при запитывании центрального порта (7); в) характеристики сигналов на выходном центральном порту при запитывании поочередно 7 портов на входе

Полученные результаты показывают, что применение предлагаемой линзы позволяет обеспечить управление характеристиками сигналов как по амплитуде, так и по смещению во времени, а следовательно, и по фазе. Важно отметить, что два крайних порта на выходе системы диаграммообразования имеют малый уровень сигнала, что вызвано малым распространением до точек нагрузки, а также действием балластных портов, как это показано на рисунке 3.

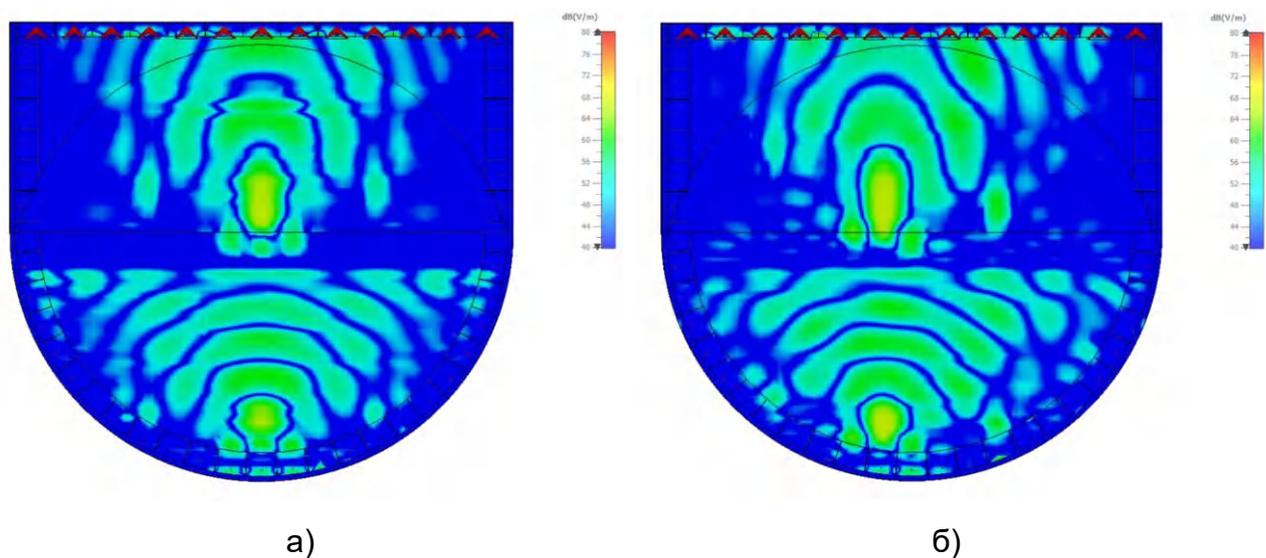
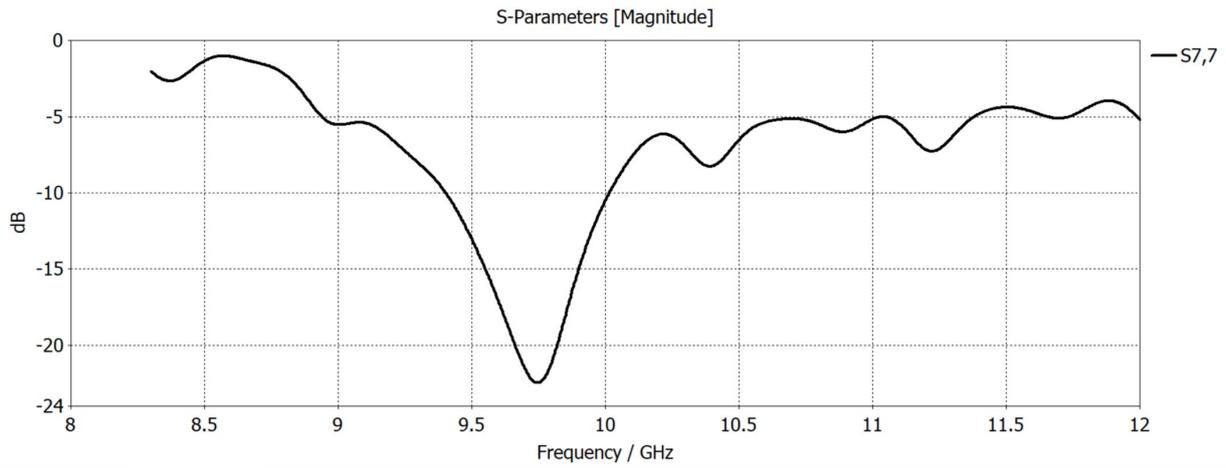


Рисунок 3. Картины распространения E-поля на частоте 10 ГГц: а) запитывание центрального порта; б) запитывание соседнего порта от центрального

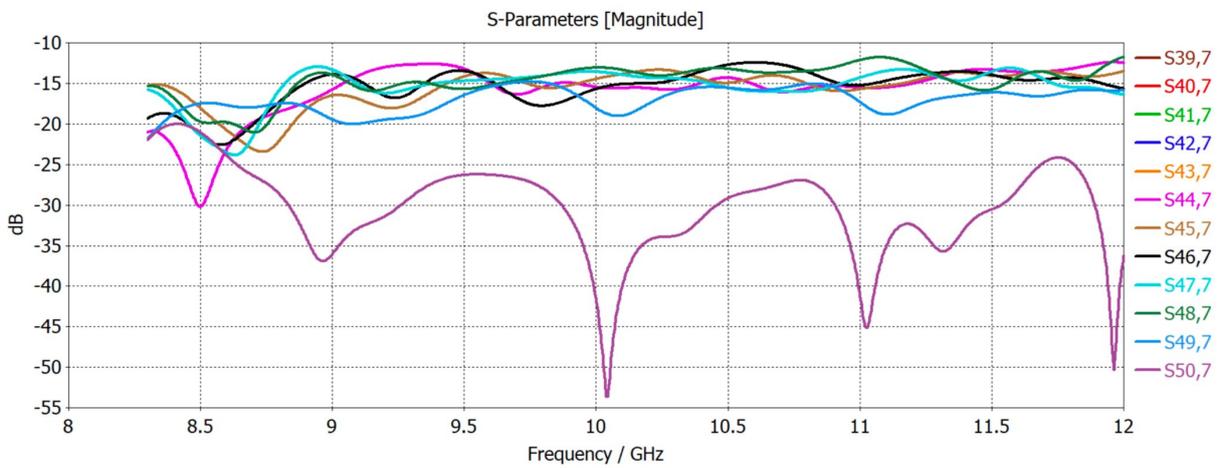
Полученные результаты показывают, что применение предлагаемой системы диаграммообразования позволяет сформировать ожидаемое распространение электромагнитных волн в теле линзы (рисунок 1в). Использование полученной конструкции позволяет обеспечить диаграммообразование для антенной системы, которая будет иметь до 13 портов. Помимо анализа характеристик сигналов рассмотрим характеристики матрицы рассеяния (рисунок 4), что позволит оценить фазы, а также коэффициенты передачи сигналов из одного порта в нагрузочные.

Полученные результаты показывают, что особенностью работы предлагаемой диаграммообразующей системы при использовании центрального порта является повторение характеристик относительно центральной оси симметрии. Характеристики диаграмм направленности для полученной линзы на частоте 10 ГГц приводится на рисунке 5.

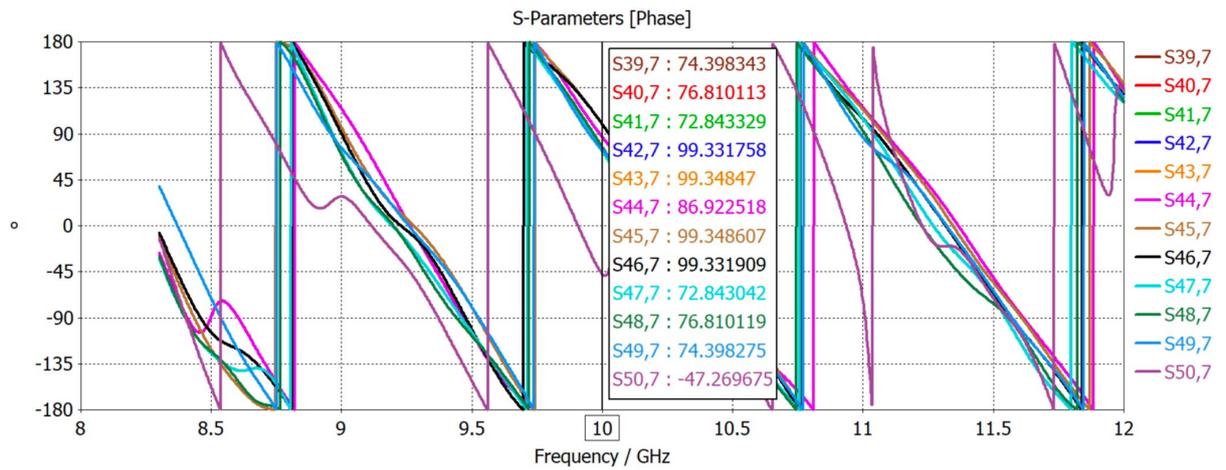
Полученные результаты показывают, что применение системы диаграммообразования позволяет обеспечить управление амплитудно-фазовым распределением, при этом в идеальном случае при запитывании седьмого порта отклонение от нулевого положения составляет 61 градус. Проведем проверку работы диаграммообразующего устройства при использовании с антенной системой радиолокатора, имеющей 10 входных портов.



a)



б)



в)

Рисунок 4. Характеристики матрицы рассеяния для разработанного диаграммообразующего устройства

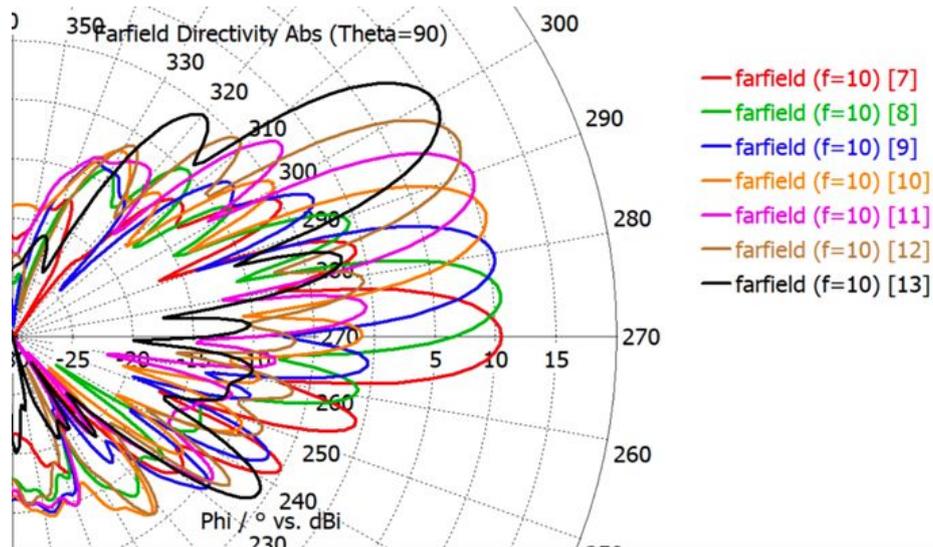


Рисунок 5. Характеристики диаграммообразования для разработанной системы на основе апланатической линзы

Исследование эффективности применения диаграммообразующего устройства для антенной системы радиолокатора

В процессе реализации системы диаграммообразования на основе апланатической линзы сигналы с нагрузки передаются в антенную систему на основе коаксиальных линий, однако важно отметить, что эти линии должны иметь одинаковую длину, чтобы не вызывать фазовых ошибок. На рисунке 6 приводится вид моделирования задачи, когда характеристики апланатической линзы передаются в антенну радиолокатора.

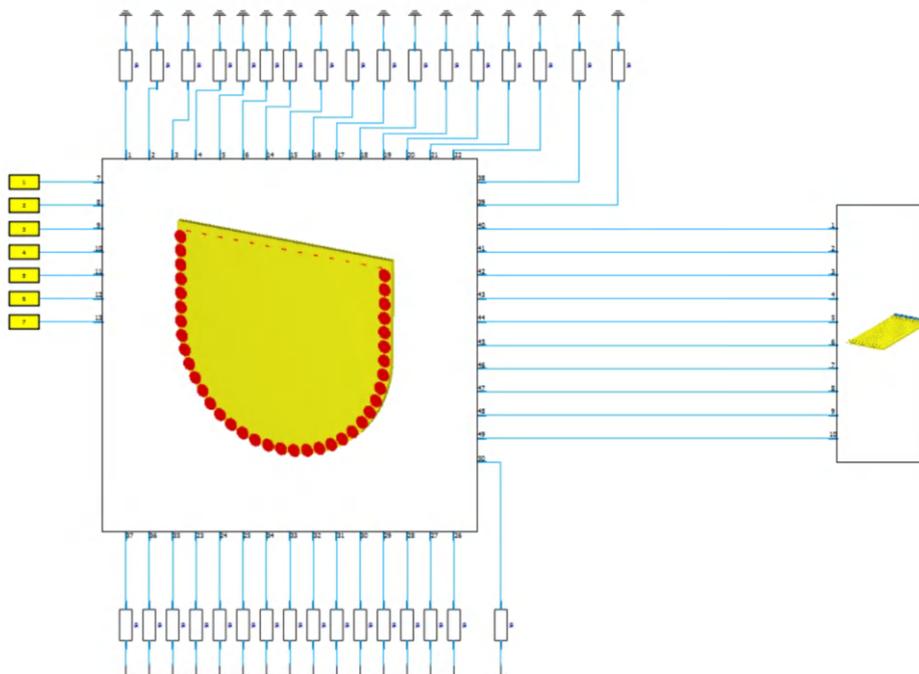


Рисунок 6. Процесс моделирования комплексной задачи ДОР -> антенна РЛС

Полученная задача описывается так, система диаграммообразования (ДОР) поочередно запитывает семь портов (7–13), после чего полученные значения амплитудно-фазового распределения передаются в антенную систему радиолокатора. Оставшиеся порты системы при этом нагружаются на 50 Ом, что позволяет снизить побочное излучение и распространение электромагнитных волн в системе. На рисунке 7 приводится вид диаграммы направленности антенной системы при запитывании с использованием системы диаграммообразования на основе апланатической линзы, при этом важно отметить, что особенностью конструкции антенны также является то, что она обладает частотным сканированием.

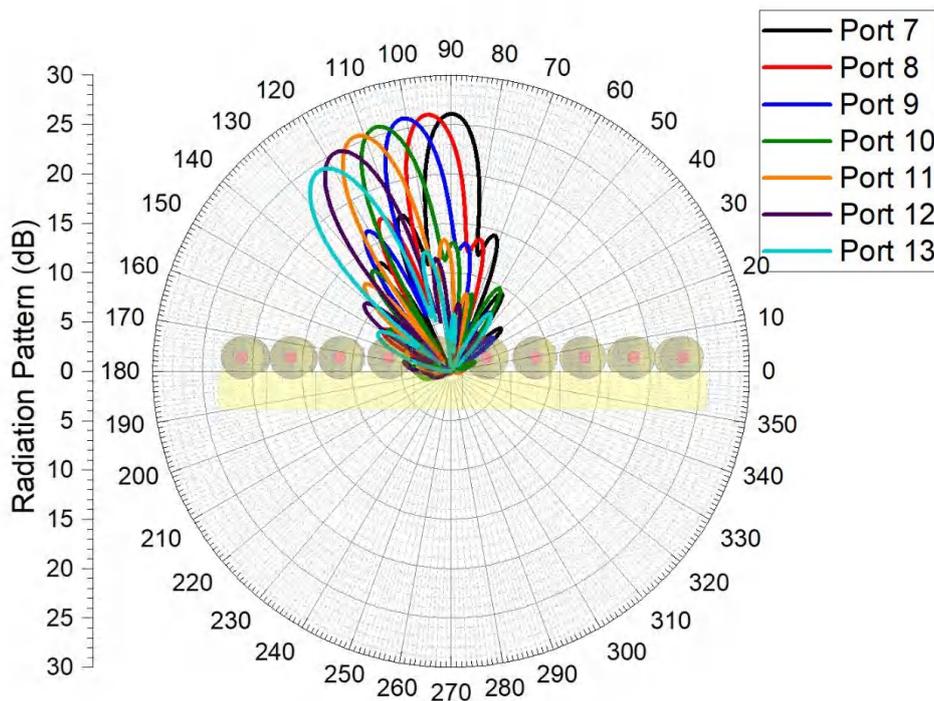


Рисунок 7. Реализация сканирования лучом антенны путем использования апланатической линзы

Полученные результаты показывают, что применение системы ДОР для антенной системы радиолокатора на основе апланатической линзы удалось достичь сканирования от 0 до 33 градусов путем запитывания антенны через апланатическую линзу при переключении входных потоков. При этом важно отметить, что апланатическая линза позволяет обеспечить диаграммообразование в диапазоне частот от 8,3 до 12 ГГц.

Заключение

Полученные результаты показывают, что применение апланатической линзы позволяет значительно упростить реализацию системы пространственного сканирования на основе управления амплитудно-фазовым распределением путем преломления электромагнитных волн. Предложенная конструкция апланатической линзы проста в реализации, имеет малые размеры, а также обеспечивает работу в широком диапазоне

частот. Полученная система диаграммообразования позволяет обеспечить высокую эффективность управления основным лучом антенны в широком диапазоне рабочих частот, что является ее основными преимуществами над существующими системами управления амплитудно-фазовым распределением в антенной системе.

Благодарности

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

Список литературы

1. Numan A. B., Frigon J.-F., Laurin J.-J. Printed W-band multibeam antenna with Luneburg lens-based beamforming network // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. 66 (10). 5614–5619. DOI: 10.1109/TAP.2018.2860119
2. Turalchuk P., Munina I., Shitvov A. Analog beamforming based on Fourier Rotman lens for multibeam applications // 48th European Microwave Conference (EuMC). Spain, Madrid, 2018. New York: IEEE, 2018. 1573–1576. DOI: 10.23919/EuMC.2018.8541739
3. Vo Dai T. K., Nguyen T., Kilic O. A compact microstrip Rotman lens design // 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). USA, Boulder, 2017. New York: IEEE, 2017. 1–2. DOI: 10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878311
4. Tudosie G., Vahldieck R. An LTCC-Based folded Rotman lens for phased array applications. 2006 Asia-Pacific Microwave Conference. Japan, Yokohama, 2006. Tokyo: IEEE, 2006. 2106–2109. DOI: 10.1109/APMC.2006.4429828
5. Крюков Д. Ю., Курьян Ю. С., Пастернак Ю. Г. Исследование диаграммообразующих устройств многолучевых антенных решёток на основе плоской линзы Ротмана // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. 10 (3–1). 63–65.
6. Tolin E., Vipiana F., Litschke O., Bruni S. phase shifters design for scan range extension of Rotman lens beamforming based antenna arrays // 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. USA, Boston, 2018. New York: IEEE, 2018. 2129–2130. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609130
7. Belostotsky A. L., Leonov A. S. Design of aplanatic waveguide Fresnel lenses and aberration-free planar optical systems // Journal of Lightwave Technology. 1993. 11 (8). 1314–1319. DOI: 10.1109/50.254089
8. Cloutier G., Bekefi G. Scanning characteristics of microwave aplanatic lenses // IRE Transactions on Antennas and Propagation. 1957. 5 (4). 391–396. DOI: 10.1109/TAP.1957.1144527
9. Зелкин Е. Г., Петрова Р. А. Линзовые антенны. Москва: Советское радио, 1974. 282 с.

References

1. Numan A. B., Frigon J.-F., Laurin J.-J. Printed W-band multibeam antenna with Luneburg lens-based beamforming network // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. 66 (10). 5614–5619. DOI: 10.1109/TAP.2018.2860119
2. Turalchuk P., Munina I., Shitvov A. Analog beamforming based on Fourier Rotman lens for multibeam applications // 48th European Microwave Conference (EuMC). Spain, Madrid, 2018. New York: IEEE, 2018. 1573–1576. DOI: 10.23919/EuMC.2018.8541739
3. Vo Dai T. K., Nguyen T., Kilic O. A compact microstrip Rotman lens design // 2017 United States National Committee of URSI National Radio Science Meeting (USNC-URSI NRSM). USA, Boulder, 2017. New York: IEEE, 2017. 1–2. DOI: 10.1109/USNC-URSI-NRSM.2017.7878311
4. Tudosie G., Vahldieck R. An LTCC-Based folded Rotman lens for phased array applications. 2006 Asia-Pacific Microwave Conference. Japan, Yokohama, 2006. Tokyo: IEEE, 2006. 2106–2109. DOI: 10.1109/APMC.2006.4429828
5. Kryukov D. Yu., Kurian Yu. S., Pasternak Yu. G. Study beamforming devices multipath antenna arrays based on plane rothman lens // Bulletin of Voronezh State Technical University. 2014. 10 (3–1). 63–65. (In Russian).
6. Tolin E., Vipiana F., Litschke O., Bruni S. Phase shifters design for scan range extension of Rotman lens beamforming based antenna arrays // 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. USA, Boston, 2018. New York: IEEE, 2018. 2129–2130. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8609130
7. Belostotsky A. L., Leonov A. S. Design of aplanatic waveguide Fresnel lenses and aberration-free planar optical systems // Journal of Lightwave Technology. 1993. 11 (8). 1314–1319. DOI: 10.1109/50.254089
8. Cloutier G., Bekefi G. Scanning characteristics of microwave aplanatic lenses // IRE Transactions on Antennas and Propagation. 1957. 5 (4). 391–396. DOI: 10.1109/TAP.1957.1144527
9. Zelkin E. G., Petrova R. A. Lens antennas. Moscow: Soviet Radio Publ., 1974. 282 p. (In Russian).

Информация об авторах

Проскурин Дмитрий Константинович – кандидат физико-математических наук, ректор, Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Россия), ORCID: 0009-0004-0569-6737, rector@cchgeu.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, Воронежский государственной технический университет (Воронеж, Россия), ORCID: 0000-0002-2031-5531, pasternakug@mail.ru

Фёдоров Сергей Михайлович – кандидат технических наук, доцент, Воронежский государственной технический университет (Воронеж, Россия), ORCID: 0000-0001-9027-6163, fedorov_sm@mail.ru

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, ассистент, Воронежский государственной технический университет (Воронеж, Россия), ORCID: 0000-0002-5270-0792, kursk1998@yandex.ru

Медведев Александр Евгеньевич – студент, Воронежский государственный технический университет (Воронеж, Россия), ORCID: 0009-0008-4358-935X, medvedev.vzломhik1999@mail.ru