

Исследование полусферической метаматериальной линзы из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров

Ю.Г. Пастернак^{1, 2, 3}, В.А. Пендюрин⁴, Р.Е. Rogozin¹, С.М. Федоров¹

¹ Воронежский государственный технический университет
394006, Россия, г. Воронеж,
ул. 20-летия Октября, 84

² ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
394064, Россия, г. Воронеж,
ул. Старых Большевиков, 54а

³ АО «ИРКОС»
129085, Россия, г. Москва,
Звездный бульвар, 21

⁴ АО НПП «Автоматизированные системы связи»
394062, Россия, г. Воронеж,
ул. Пеше-Стрелецкая, 108

Аннотация – Антенные системы на основе полусферических линз позволяют осуществлять полноазимутальное сканирование или секторное сканирование с электронным управлением луча. В статье проведено численное моделирование широкополосной многолучевой антенной системы на основе полусферической метаматериальной линзы из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров. Исследованы эффективные параметры метаматериала на основе печатных иерусалимских крестов с впаянными поперечными металлическими штырями. Подобранные геометрические размеры метаматериала позволили уменьшить влияние анизотропии. Рассмотрены диаграммы направленности при возбуждении линзы системой широкополосных вибраторов с двумя ортогональными поляризациями. Для каждой поляризации сделаны выводы о рабочем диапазоне и о величине потерь. Полученные в работе результаты планируется использовать в дальнейшем при проектировке широкополосных линзовых антенн из параллельных печатных плат.

Ключевые слова – многолучевые антенны, полусферическая линза, метаматериалы, эффективные параметры.

Введение

Прогресс в радиотехнологиях неразрывно связан с развитием антенных систем, в том числе и с созданием новых конструкций многолучевых антенных систем (МЛА). Такие антенны позволяют формировать большое число сканирующих лучей. Благодаря прогрессу в науке и технике разработаны разнообразные конструкции МЛА, обзор которых приведен в [1].

В настоящее время существует потребность в создании сверхширокополосных МЛА с широким сектором обзора, в частности с возможностью полноазимутального сканирования. Это вызвано: растущими требованиями к массе и габаритам антенных систем, необходимости освоения новых частотных диапазонов, возможности приема-передачи сверхширокополосных сигналов в различных условиях, возможности формирования большого числа сканирующих лучей в широком секторе углов. Весьма распространены шнурковые линзы (линза Ротмана и ее модификации), позволяющие формировать большое число диа-

грамм направленности (ДН) в широком секторе углов [1–4]. Использование данных линз позволяет создавать широкополосные и простые в изготовление антенные системы. Обзор различных типов шнурковых линз приведен в [3]. Использование цилиндрических линз различных конструкций (из однородных диэлектриков [5] на основе линз Люнеберга [6; 7]) позволяет создавать сверхширокополосные МЛА с большим числом сканирующих лучей в секторе $\pm 45^\circ$. Однако для осуществления полноазимутального сканирования указанными выше МЛА необходимо использовать четыре линзы.

Полусферические линзы (из однородных диэлектриков [5], на основе полусферических линз Люнеберга [8]) наиболее подходят для создания сверхширокополосных полноазимутальных МЛА с двумя ортогональными поляризациями. Однако такие линзы могут быть дорогостоящими и сложными в производстве, обладать большой массой.

Цель данной статьи – исследование полноазимутальной МЛА с двумя ортогональными поляризациями на основе полусферической линзы из

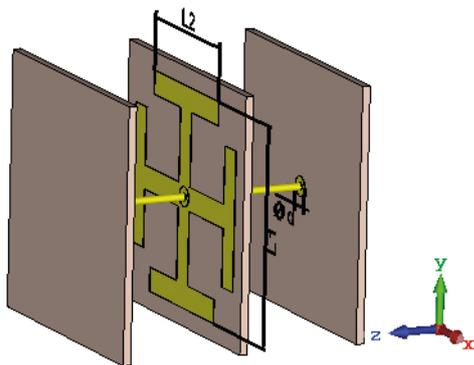


Рис. 1. Внешний вид периодической структуры метаматериала
 Fig. 1. Appearance of the periodic structure of the metamaterial

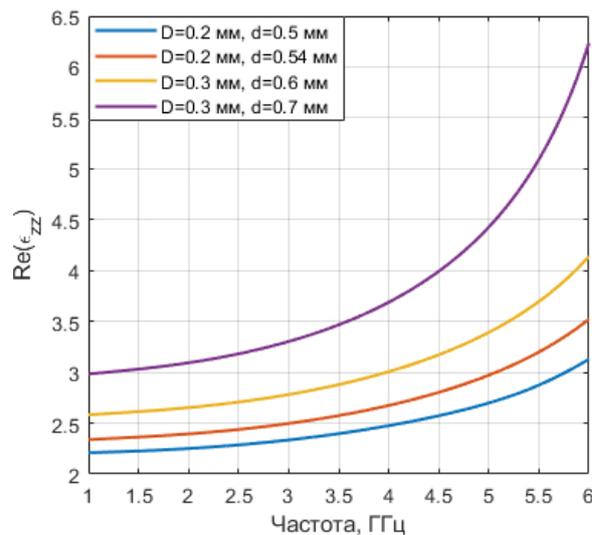
параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров.

1. Исследование метаматериала для создания линзы

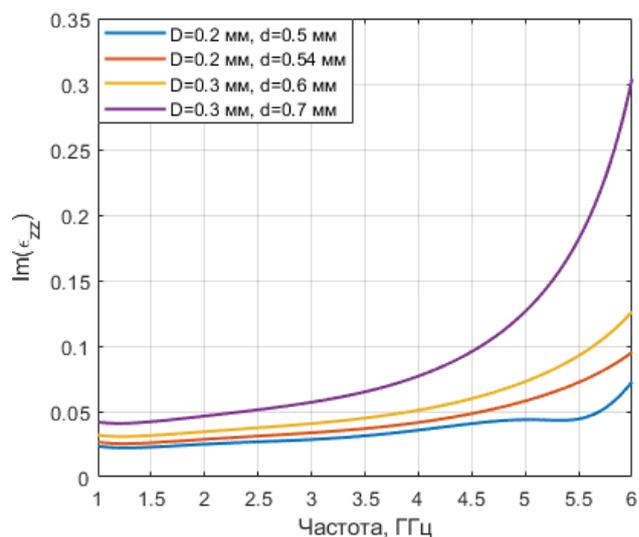
Ячейка периодической структуры метаматериала представляет собой вытравленные на печатных платах из стеклотекстолита (FR-4) толщиной 0,2 мм иерусалимские кресты с отверстиями в центре крестов. В эти отверстия впаяны поперечные металлические стержни, припаянные к металлическим площадкам на соседних платах, т. е. соседние платы необходимы для придания механической жесткости конструкции. На рис. 1 показан внешний вид метаматериала.

Металлические штырьки, впаянные в центр крестов, предназначены для минимизации анизотропии. Если их убрать, то у тензора эффективной диэлектрической проницаемости ϵ -компоненты будут ϵ_{xx} и ϵ_{yy} одинаковые (из-за симметрии крестов), однако отличающиеся от ϵ_{zz} . Наличие штырьков позволит уменьшить анизотропию, что является необходимым условием для создания цилиндрической линзы, работающей на двух ортогональных поляризациях.

Геометрические параметры исследуемой структуры: период следования печатных плат вдоль оси oz – 3,1 мм; размер одной ячейки метаматериала – 6,4 мм; толщина металлизации – 0,018 мм. Длина крестов $L1$, длина наконечников крестов $L2$, диаметр штырька D , диаметр металлических площадок d – переменные величины, позволяющие управлять эффективными параметрами метаматериала. Стоит отметить, что радиус металлических площадок должен быть всегда больше радиуса штырька минимум на 0,15 мм. Это обусловлено технологической погрешностью позиционирования при сборке линзы. Расчет эффек-



а



б

Рис. 2. Зависимость $Re(\epsilon_{zz})$ и $Im(\epsilon_{zz})$ от частоты при разных D и d
 Fig. 2. Frequency dependence of $Re(\epsilon_{zz})$ and $Im(\epsilon_{zz})$ at different D and d

тивных параметров метаматериала производится через расчет S -параметров метаматериала [9; 10]. На рис. 2 приведены зависимости действительной и мнимой части ϵ_{zz} ($Re(\epsilon_{zz})$ и $Im(\epsilon_{zz})$) от частоты при разных D и d . Влияние длин $L1$ и $L2$ пренебрежимо мало на z -компоненты эффективных параметров.

На рис. 3 приведены зависимости действительной и мнимой части компоненты μ_{zz} ($Re(\mu_{zz})$ и $Im(\mu_{zz})$) тензора эффективной магнитной проницаемости μ при разных D и d .

Анализ полученных зависимостей показывает, что используемый материал обладает дисперсией и с увеличением D или d :

- возрастает $Re(\epsilon_{zz})$;
- уменьшается $Re(\mu_{zz})$;
- увеличивается дисперсия;
- возрастают потери.

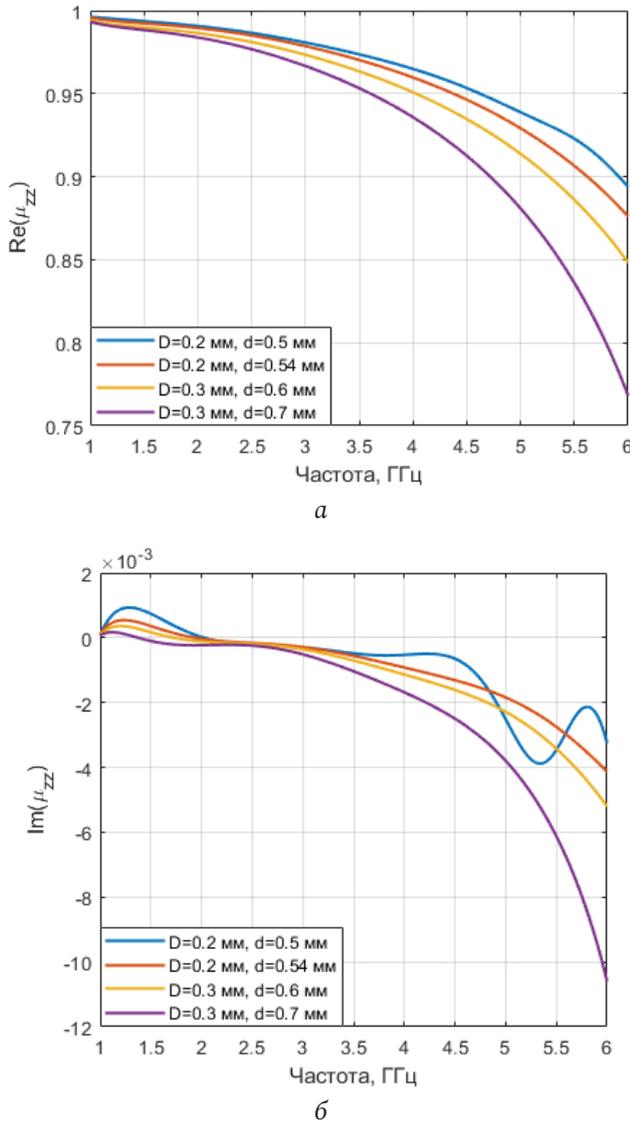


Рис. 3. Зависимость $\text{Re}(\mu_{zz})$ и $\text{Im}(\mu_{zz})$ от частоты при разных D и d
Fig. 3. Frequency dependence of $\text{Re}(\mu_{zz})$ and $\text{Im}(\mu_{zz})$ at different D and d

На рис. 4 приведены зависимости $\text{Re}(\epsilon_{xx})$ и $\text{Im}(\epsilon_{xx})$ от частоты при разных $L1$ и $L2$.

На рис. 5 отражены зависимости действительной и мнимой части μ_{xx} ($\text{Re}(\mu_{xx})$ и $\text{Im}(\mu_{xx})$) при разных $L1$ или $L2$.

При увеличении $L1$ или $L2$ изменение ϵ_{xx} и μ_{xx} аналогично изменению ϵ_{zz} и μ_{zz} при увеличении D или d .

На основе полученных результатов для создания линзы используются следующие геометрические параметры: $L1 = 5,5$ мм; $L2 = 3,5$ мм; $D = 0,2$ мм; $d = 0,5$ мм. На рис. 6 показаны соответствующие ϵ_{xx} и ϵ_{zz} .

На рис. 7 изображена исследуемая линза в среде CST STUDIO SUITE 2020.

Геометрические параметры исследуемой линзы: диаметр основания – 480 мм, высота линзы – 230 мм.

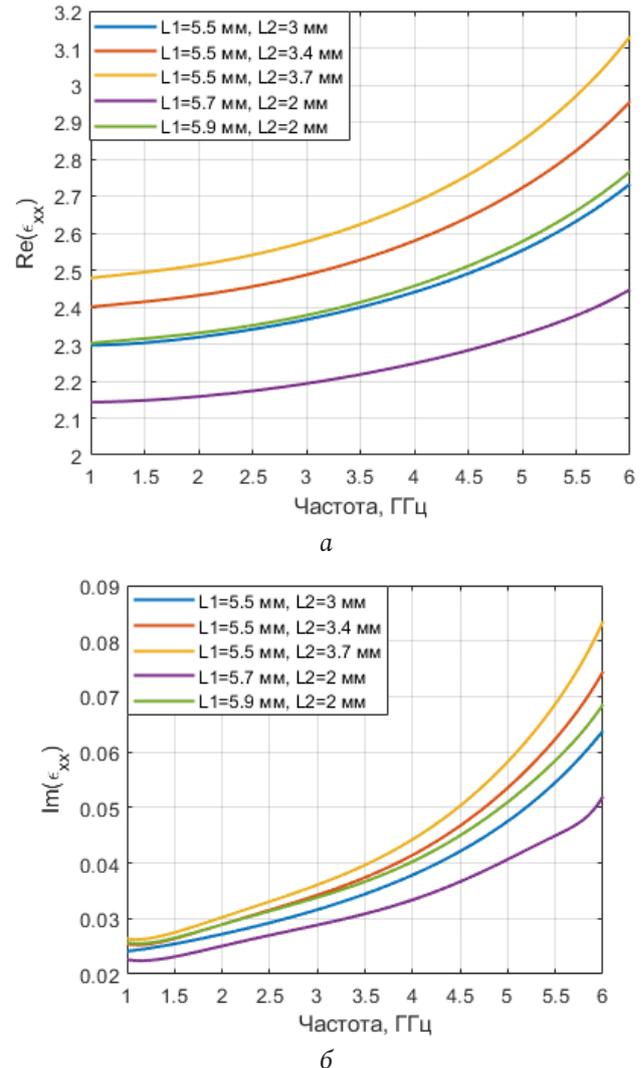


Рис. 4. Зависимость $\text{Re}(\epsilon_{xx})$ и $\text{Im}(\epsilon_{xx})$ от частоты при разных $L1$ и $L2$

Fig. 4. Frequency dependence of $\text{Re}(\epsilon_{xx})$ and $\text{Im}(\epsilon_{xx})$ at different $L1$ and $L2$

2. Результаты моделирования многолучевой антенной системы

Для возбуждения линзы используется система сверхширокополосных вибраторов с двумя ортогональными поляризациями, подобная системе из [8]. Под вертикальной поляризацией подразумевается поляризация, вектор напряженности электрического поля которой параллелен металлическим штырькам. При горизонтальной – вектор напряженности электрического поля параллелен печатным платам. На рис. 8 показаны ДН в азимутальной плоскости при вертикальной поляризации.

При вертикальной поляризации коэффициент направленного действия (КНД) увеличивается от 12,3 дБи до 18,8 дБи в диапазоне 1–5 ГГц, имея максимальное значение на 5 ГГц. На частотах выше 5 ГГц КНД снижается. Уровень боковых ле-

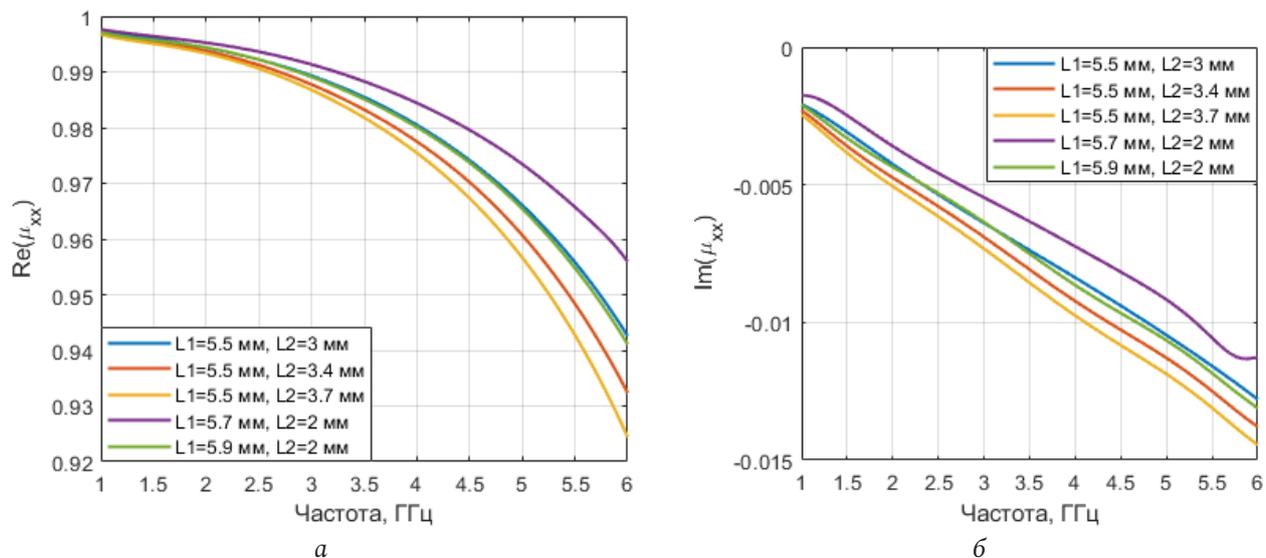


Рис. 5. Зависимость $\text{Re}(\mu_{xx})$ и $\text{Im}(\mu_{xx})$ от частоты при разных $L1$ и $L2$
 Fig. 5. Frequency dependence of $\text{Re}(\mu_{xx})$ and $\text{Im}(\mu_{xx})$ at different $L1$ and $L2$

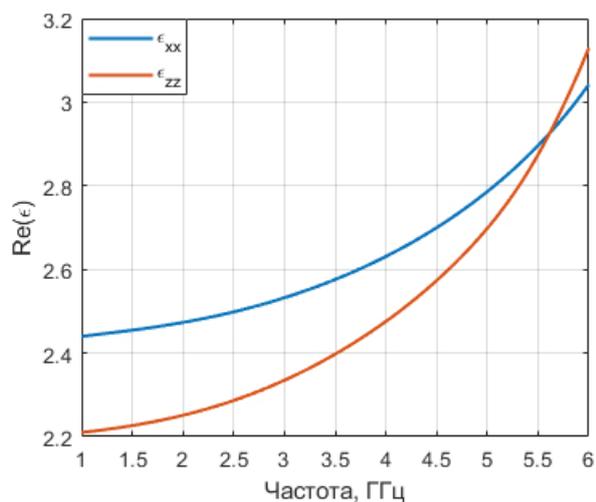


Рис. 6. Зависимость от частоты $\text{Re}(\epsilon_{xx})$ и $\text{Re}(\epsilon_{zz})$
 Fig. 6. Frequency dependence of $\text{Re}(\epsilon_{xx})$ and $\text{Re}(\epsilon_{zz})$



Рис. 7. Внешний вид исследуемой линзы
 Fig. 7. Appearance of the periodic structure of the metamaterial

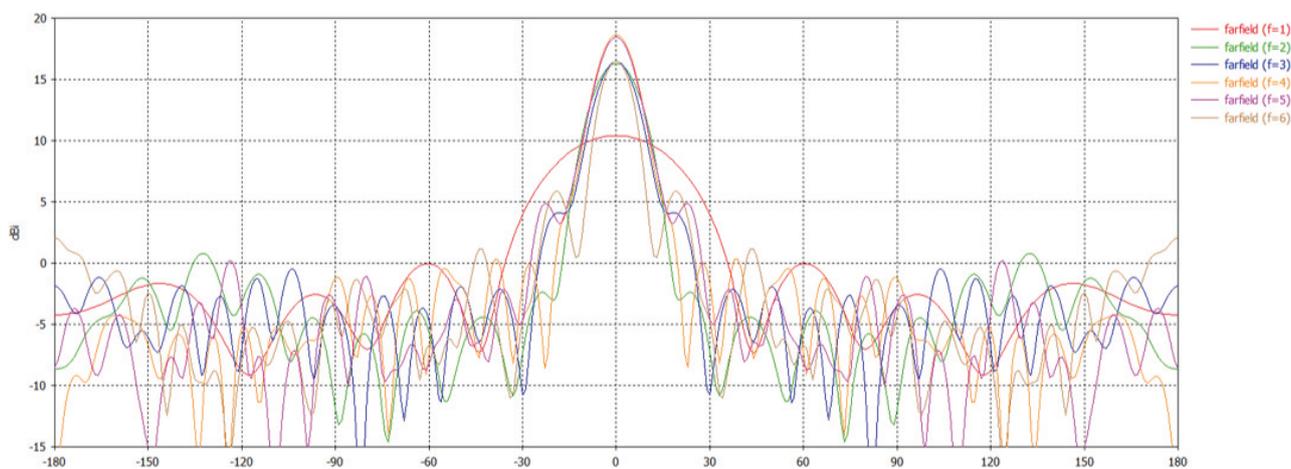


Рис. 8. ДН в азимутальной плоскости при вертикальной поляризации
 Fig. 8. The radiation pattern in the azimuthal plane with vertical polarization

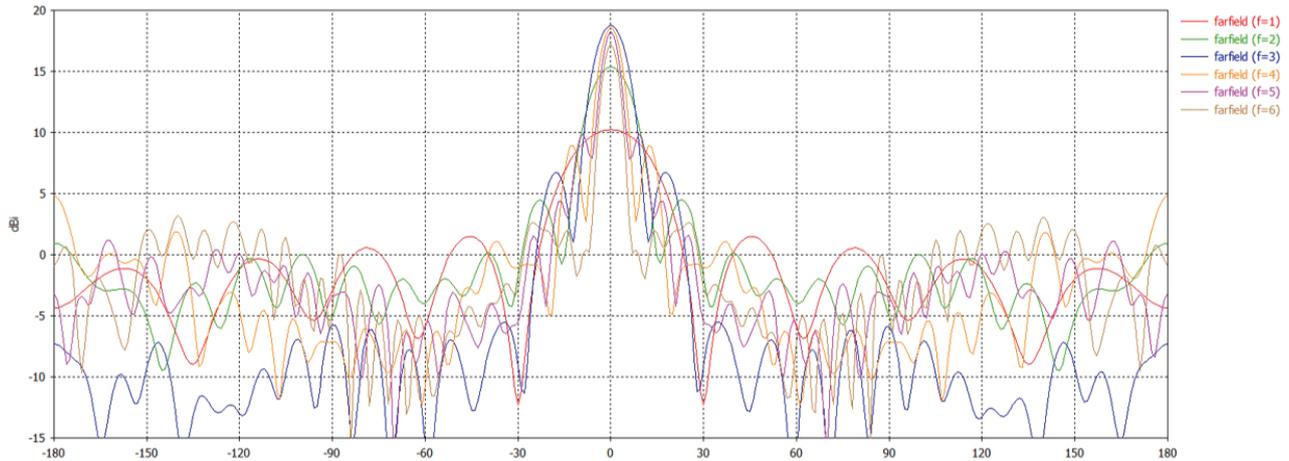


Рис. 9. ДН в азимутальной плоскости при горизонтальной поляризации
Fig. 9. The radiation pattern in the azimuthal plane with horizontal polarization

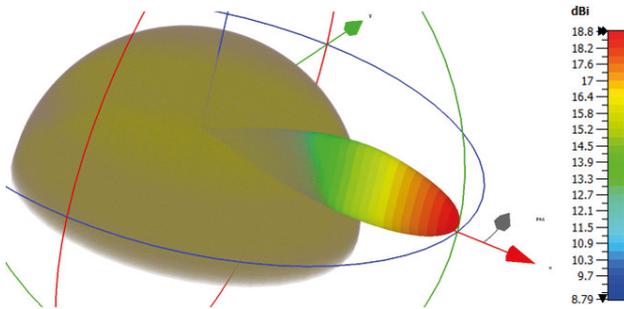


Рис. 10. ДН на частоте 4 ГГц
Fig. 10. The radiation pattern at 4 GHz

пестков в диапазоне 1–6 ГГц остается ниже –10 дБ. На рис. 9 показаны ДН в азимутальной плоскости при горизонтальной поляризации.

При горизонтальной поляризации КНД увеличивается от 11,3 дБи до 21,1 дБи в диапазоне 1–4,7 ГГц, имея максимальное значение на 4,7 ГГц. На частотах выше 4,7 ГГц КНД снижается. Уровень боковых лепестков (УБЛ) в диапазоне 1–4,7 ГГц остается ниже –10 дБ. На частотах выше 4,7 ГГц УБЛ превышает –10 дБ.

На рис. 10 показана ДН исследуемой линзы на частоте 4 ГГц

Поскольку в используемом метаматериале присутствуют увеличивающиеся с ростом частоты потери (рис. 2, б и рис. 4, б), то необходимо оценить потери в исследуемой МЛА. На рис. 11 приведены графики коэффициента полезного действия (КПД) антенны, а также КПД с учетом согласования (полный КПД) для двух поляризации.

КПД антенны уменьшается с ростом частоты. При вертикальной поляризации КПД выше, чем при горизонтальной. Однако отличие незначительно (в пределах 0,5 дБ). На частотах выше 3 ГГц потери становятся значительными (КПД в обоих случаях не превосходит –3 дБ). Полный КПД, учи-

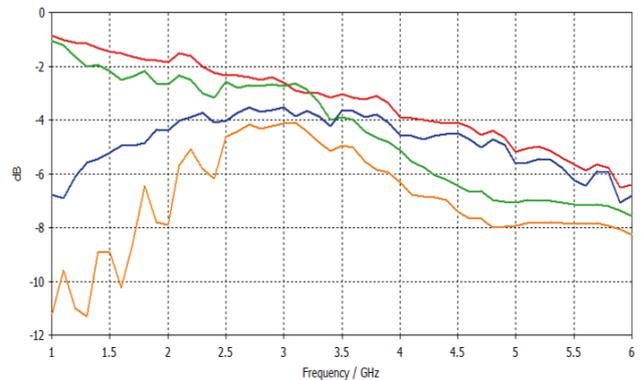


Рис. 11. КПД антенны: красная линия – КПД при вертикальной поляризации; зеленая линия – КПД при горизонтальной поляризации; синяя линия – полный КПД при вертикальной поляризации; желтая линия – полный КПД при горизонтальной поляризации

тывающий рассогласование, меньше –3 дБ в обоих случаях.

Выводы

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Используемая структура метаматериала обладает дисперсией и потерями, которые увеличиваются с ростом частоты.
2. Подбор геометрических параметров метаматериала позволяет уменьшить анизотропию
3. Рабочая полоса исследуемой МЛА 1–4,7 ГГц.
4. При вертикальной поляризации шире рабочая полоса, однако ниже КНД.
5. На частотах выше 3 ГГц увеличиваются потери.
6. Низкие значения КПД с учетом согласования свидетельствуют о необходимости разработки возбуждающей системы с хорошим согласованием.

Заключение

В статье исследована полусферическая метаматериальная линза из параллельных печатных плат с металлическими рассеивателями малых электрических размеров. Показано, что на ее основе возможно создание сверхширокополосной полноазимутальной МЛА. К направлению дальнейших

исследований следует отнести: разработку метаматериалов с малыми потерями и минимальной анизотропией; создание сверхширокополосной запитывающей системы для линзы.

Финансирование

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-57.2020.9.

Список литературы

1. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи / А.В. Шишлов [и др.] // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 1–30. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/6/text.pdf>
2. Rotman W., Turner R.F. Wide angle microwave lens for line source applications // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1963. Vol. 11, no. 6. P. 623–632. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.1963.1138114>
3. Vashist S., Soni M.K., Singhal P.K. A Review on the development of Rotman lens antenna // *Chinese Journal of Engineering*. 2014. Vol. 2014. P. 385385. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/385385>
4. Rappaport C.M., Zaghlu A.I. Multifocal bootlace lens design concepts: A review // *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. 2005. Vol. 2B. P. 39–42 DOI: <https://doi.org/10.1109/APS.2005.1551929>
5. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. М.: Советское радио, 1974. 280 с.
6. Foam based Luneburg lens antenna at 60 GHz / J. Bor [et al.] // *Progress in Electromagnetics Research Letters*. 2014. Vol. 44. P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIERL13092405>
7. Peeler G., Archer D. A two-dimensional microwave Luneberg lens // *Transactions of the IRE Professional Group on Antennas and Propagation*. 1953. Vol. 1, no. 1. P. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.1109/T-AP.1953.27321>
8. Моделирование многолучевой антенной решетки на основе полусферической диэлектрической многослойной линзы / Д.С. Алиев [и др.] // *Воздушно-космические силы. Теория и практика*. 2019. № 9. С. 107–114. URL: http://академия-ввс.рф/images/docs/vks/9-2019/vks_9.pdf
9. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials / D.R. Smith [et al.] // *Physical Review E*. 2005. Vol. 71, no. 3. P. 036617. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.036617>
10. A review of the scattering parameter extraction method with clarification of ambiguity issues in relation to metamaterial homogenization / S. Arslanagic [et al.] // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2013. Vol. 55, no. 2. P. 91–106. DOI: <https://doi.org/10.1109/MAP.2013.6529320>

References

1. Shishlov A.V. et al. Multibeam antennas for radar and communication systems. *Zhurnal radioelektroniki*, 2018, no. 7, pp. 1–30. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jul18/6/text.pdf> (In Russ.)
2. Rotman W., Turner R.F. Wide angle microwave lens for line source applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1963, vol. 11, no. 6, pp. 623–632. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.1963.1138114>
3. Vashist S., Soni M.K., Singhal P.K. A Review on the development of Rotman lens antenna. *Chinese Journal of Engineering*, 2014, vol. 2014, p. 385385. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/385385>
4. Rappaport C.M., Zaghlu A.I. Multifocal bootlace lens design concepts: A review. *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2005, vol. 2B, pp. 39–42. DOI: <https://doi.org/10.1109/APS.2005.1551929>
5. Zelkin E.G., Petrova R.A. Lens Antennas. Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 280 p. (In Russ.)
6. Bor J. et al. Foam based Luneburg lens antenna at 60 GHz. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 2014, vol. 44, pp. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.2528/PIERL13092405>
7. Peeler G., Archer D. A two-dimensional microwave Luneberg lens. *Transactions of the IRE Professional Group on Antennas and Propagation*, 1953, vol. 1, no. 1, pp. 12–23. DOI: <https://doi.org/10.1109/T-AP.1953.27321>
8. Aliev D.S. et al. Modeling a multibeam antenna array based on a hemispherical dielectric multilayer lens. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika*, 2019, no. 9, pp. 107–114. URL: http://академия-ввс.рф/images/docs/vks/9-2019/vks_9.pdf (In Russ.)
9. Smith D.R. et al. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. *Physical Review E*, 2005, vol. 71, no. 3, pp. 036617. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.036617>
10. Arslanagic S. et al. A review of the scattering parameter extraction method with clarification of ambiguity issues in relation to metamaterial homogenization. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2013, vol. 55, no. 2, pp. 91–106. DOI: <https://doi.org/10.1109/MAP.2013.6529320>

Physics of Wave Processes and Radio Systems

2021, vol. 24, no. 1, pp. 32–38

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.1.32-38

Received 19 October 2020
Accepted 23 November 2020

Study of a hemispherical metamaterial lens made of parallel printed circuit boards with metal diffusers of small electrical dimensions

Yuri G. Pasternak^{1, 2, 3}, Vladimir A. Pendyurin⁴, Ruslan E. Rogozin¹, Sergei M. Fedorov¹¹ Voronezh State Technical University
84, 20-letiya Oktyabrya Street,
Voronezh, 394006, Russia² MERC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy»
54a, Staryh Bolshevikov Street,
Voronezh, 394064, Russia³ JSC «IRCOS»
21, Zvezdny Boulevard,
Moscow, 129085, Russia⁴ JSC NPP «Automated communication systems»
108, Peshe-Streletskaya Street,
Voronezh, 394062, Russia

Abstract – Antenna systems based on hemispherical lenses allow full azimuth scanning or electronically controlled sector scanning. The article presents a numerical simulation of a broadband multi-beam antenna system based on a hemispherical metamaterial lens made of parallel printed circuit boards with metal diffusers of small electrical dimensions. The effective parameters of a metamaterial based on printed Jerusalem crosses with welded-in transverse metal pins are investigated. The selected geometric dimensions of the metamaterial made it possible to reduce the effect of anisotropy. Directional patterns are considered when a lens is excited by a system of broadband vibrators with two orthogonal polarizations. For each polarization, conclusions are drawn about the operating range and the magnitude of the losses. The results obtained in this work are planned to be used in the future in the design of wideband lens antennas from parallel printed circuit boards.

Keywords – multibeam antennas, hemispherical lens, metamaterials, effective parameters.

Информация об авторах

Пастернак Юрий Геннадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета; старший научный сотрудник ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия; ведущий инженер АО «ИРКОС», г. Москва, Россия.

Область научных интересов: антенны, электродинамика, распространение радиоволн.

E-mail: pasternakyg@mail.ru

Пендюрин Владимир Андреевич, генеральный директор АО НПП «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: антенны, электродинамика, распространение радиоволн.

E-mail: pva77777@yandex.ru

Рогозин Руслан Евгеньевич, соискатель кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: антенны, электродинамика, распространение радиоволн.

E-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru

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

Область научных интересов: антенны, электродинамика, распространение радиоволн.

E-mail: fedorov_sm@mail.ru

Information about the Authors

Yuri G. Pasternak, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University; senior researcher, MERC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia; lead engineer JSC «IRCOS», Moscow, Russia.

Research interests: antennas, electrostatics, radio wave propagation.

E-mail: pasternakyg@mail.ru

Vladimir A. Pendyurin, general manager JSC NPP «Automated communication systems», Voronezh, Russia.

Research interests: antennas, electrostatics, radio wave propagation.

E-mail: pva77777@yandex.ru

Ruslan E. Rogozin, applicant of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Research interests: antennas, electrostatics, radio wave propagation.

E-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru

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

Research interests: antennas, electrostatics, radio wave propagation.

E-mail: fedorov_sm@mail.ru