

## СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ОДНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ, ПОСТРОЕННОЙ НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫМИ РАССЕЙВАТЕЛЯМИ

Ю.Г. Пастернак<sup>1,2,3</sup>, Е.А. Рогозин<sup>2</sup>, Р.Е. Рогозин<sup>1</sup>, С.М. Фёдоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

<sup>2</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

<sup>3</sup>АО «ИРКОС», г. Москва, Россия

**Аннотация:** исследована возможность создания однородной цилиндрической линзы на основе последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала. В качестве ячейки периодической структуры метаматериала используется Н-образная структура, расположенная на диэлектрической подложке. На основе проведенного анализа открытых литературных и научно-технических источников рассмотрено влияние размера металлических проводников Н-образной структуры на значения действительной части эффективной диэлектрической проницаемости метаматериала. Показано распределение поля в азимутальной плоскости при нормальном падении линейно-поляризованной плоской волны на поверхность линзы из однородного диэлектрика и метаматериала. Для уточнения величины фокусного расстояния рассмотрены направленные характеристики линзы облучателя с линзой из однородного диэлектрика и метаматериала. Сделаны выводы о величине фокусного расстояния. Исследованы направленные и частотные характеристики линзы из метаматериала при разном повороте облучателя относительно центра линзы, линзы из однородного диэлектрика, а также о схожести и различии направленных и частотных характеристик двух линз, о влиянии поворота облучателя относительно центра линзы на характеристики линзы из метаматериала. Полученные результаты будут полезны при проектировке линзовых антенн на основе последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала

**Ключевые слова:** однородная цилиндрическая линза, метаматериал, направленные и частотные характеристики

### Введение

Многолучевые антенные системы (МЛС) позволяют формировать многолепестковую диаграмму направленности (ДН) и широко используются в радионавигации, радиолокации, радиоастрономии, в системах мобильной связи и в других радиосистемах различного назначения.

В настоящее время разработаны различные конструкции МЛС с использованием зеркальных или линзовых антенн, антенных решеток (АР), а также активных фазированных антенных решеток (АФАР) и гибридных зеркальных антенн (ГЗА) [1].

Линзовые антенны позволяют создавать осесимметричные антенные системы без затенения [1]. В настоящее время существуют различные конструкции линзовых антенн: замедляющие или ускоряющие бифокальные линзы [2]; сферические или цилиндрические линзы Люнеберга [3,4]; линзы Ротмана и схожие конструкции [5,6]; линзы Макграфа на основе печатных плат [7,8] и др.

Один из известных способов реализации линзовых антенн – реализация линз из однородного диэлектрика, имеющего форму шара или цилиндра. Использование однородных диэлектриков для изготовления линз приводит к увеличению массы и потерям [9]. Поэтому в диапазоне сантиметровых или миллиметровых волн широко применяют искусственные диэлектрики и метаматериалы, позволяющие изготавливать линзы различных конструкций с меньшей массой и потерями [9].

Метаматериалы широко используются при создании линзовых антенн, поскольку позволяют создавать среды с большим показателем преломления (который трудно получить при использовании однородных материалов) или среды с градиентно изменяющимся показателем преломления.

Недостатки при использовании метаматериалов: дисперсия; анизотропия; ограниченный частотный диапазон.

Таким образом, цель работы – исследование возможности изготовления однородной цилиндрической линзы, работающей на частотах выше 10 ГГц, из последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала.

### Моделирование периодической структуры метаматериала

В качестве ячейки периодической структуры метаматериала используется Н-образная структура, расположенная на диэлектрической подложке, длины вертикальных и горизонтальных проводников которой имеют одинаковую длину  $w$  (рис. 1).

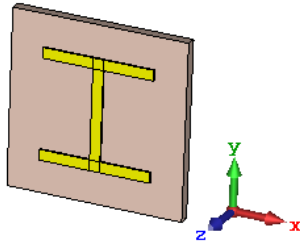


Рис. 1. Внешний вид Н-образной структуры метаматериала

Данная структура используется в работе, поскольку обладает дисперсией, анизотропией, значениями действительной части эффективной магнитной проницаемости  $Re(\mu_{eff})$ , близкими к единице [10], а действительная часть диэлектрической проницаемости  $Re(\epsilon_y)$  зависит от  $w$ . В работе [10] проведены исследования эффективных параметров Н-образной структуры, в ходе которых установлено, что в зависимости от соотношения  $w/a$  ( $a$  – размер ячейки метаматериала по оси  $ox$  и  $oy$ ) возможно несколько случаев.

При  $w/a \rightarrow 1$  – сильно связный [10]. Этот случай характерен тем, что между двумя горизонтальными проводниками соседних ячеек сосредоточена большая величина поверхностного заряда [10]. Накопленный поверхностный заряд способствует увеличению дипольного момента. Это приводит к большим резонансным значениям  $Re(\epsilon_y)$  [10].

При  $w/a < 1$  не наблюдается большой величины поверхностного заряда [10]. Уменьшение соотношения  $w/a$  приводит к уменьшению  $Re(\epsilon_y)$  дисперсии [10].

Поскольку исследуемая линза должна работать на частотах выше 10 ГГц, в работе используются геометрические размеры метаматериала, как и в [11]. Моделирование метаматериала (далее и линзы) осуществляется в среде моделирования трехмерных электромагнитных структур CST STUDIO SUITE 2020.

Расчет  $Re(\epsilon_y)$  метаматериала осуществляется с использованием метода, основанного на измерении  $S$ -параметров, пересчитанных к границам метаматериала [12,13].

На рис. 2(а) показана зависимость  $Re(\epsilon_y)$  от частоты  $f$  в случае  $w/a \rightarrow 1$  при разных  $w$ , а на рис. 2(б) – зависимость  $Re(\epsilon_y)$  от частоты  $f$  в случае  $w/a < 1$  при разных  $w$ .

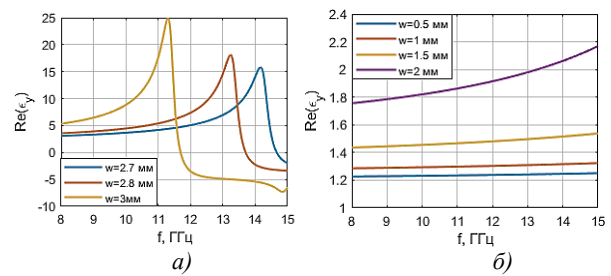


Рис. 2. Графики зависимости  $Re(\epsilon_y)$  от частоты  $f$  при  $w/a \rightarrow 1$  (а) и  $w/a < 1$  (б)

Анализ полученных результатов показывает, что для проектировки однородной цилиндрической линзы целесообразно  $w/a < 1$  – в этом случае нет резонансных значений у  $Re(\epsilon_y)$ .

Геометрические параметры линзы:

- высота – 33,3 мм;
- диаметр кратен трем длинам волны на частоте 10 ГГц – 100 мм.

Диэлектрическая проницаемость однородной линзы равна двум. Длина проводников метаматериала  $w = 2$  мм, т.е.  $Re(\epsilon_y) = 1,82$  на частоте 10 ГГц. Данное значение  $w$  используется в работе, поскольку:

- методика расчета [12,13] не учитывает влияние соседних ячеек периодической структуры, а также параметры окружающей среды или влияние расположенных рядом предметов (например, антенн или усилителей) [14];
- $Re(\epsilon_y)$  увеличивается с ростом частоты из-за наличия дисперсии (см. рис. 2(б)).

На рис. 3 показан внешний вид исследуемых линз. В качестве облучателя используются два вертикально расположенных друг под другом полуволновых вибратора с рефлектором и директором.

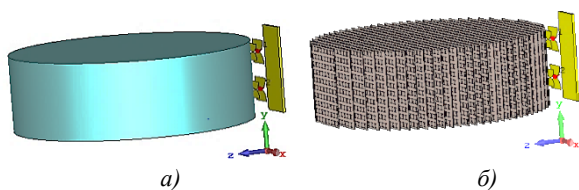


Рис. 3. Внешний вид линз: *a* – из однородного диэлектрика; *б* – из метаматериала

### Результаты моделирования фокусного расстояния

На рис. 4 приведено распределение поля в азимутальной (Н-плоскости) для линзы из однородного диэлектрика на частоте 10 ГГц и 15 ГГц.

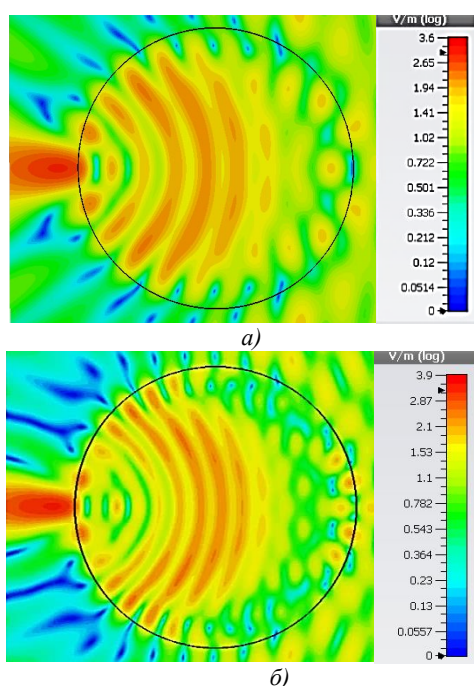


Рис. 4. Распределение поля в Н-плоскости линзы из однородного диэлектрика на частоте 10 ГГц (*a*) и 15 ГГц (*б*)

Анализ распределения поля показывает, что фокусное расстояние не перемещается с ростом частоты и находится в пределах 61-66 мм. Для уточнения величины фокусного расстояния рассматриваются направленные характеристики облучателя с линзой (см. рис. 3(*a*)) при разном фокусном расстоянии. На рис. 5-6 приведены зависимости коэффициента направленного действия (КНД), коэффициента использования поверхности (КИП), ширины ДН по уровню  $-3$  дБ, уровня боковых лепестков (УБЛ) от частоты  $f$ . А также на рис. 5-6 приведены зависимости КНД и ширины ДН для синфазного равноамплитудного раскрыва, вычисленные согласно [6], от частоты  $f$ .

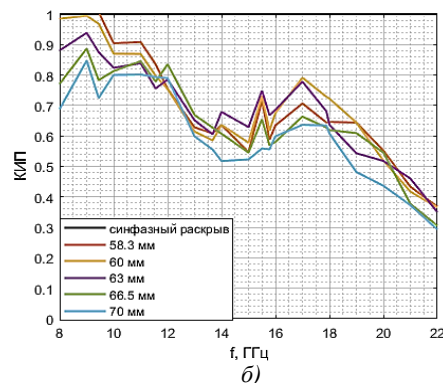
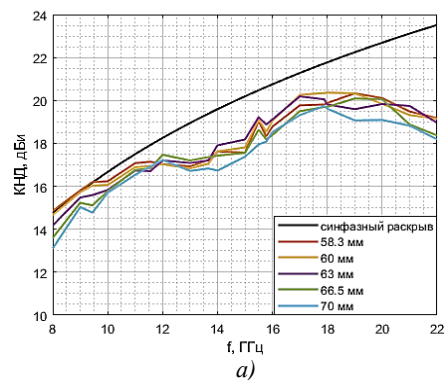


Рис. 5. Графики зависимости КНД (*a*) и коэффициента использования поверхности (*б*) от частоты  $f$  при разном фокусном расстоянии

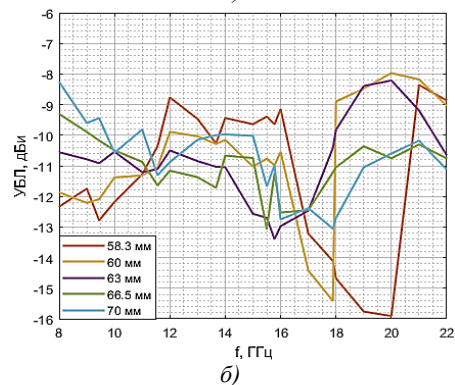
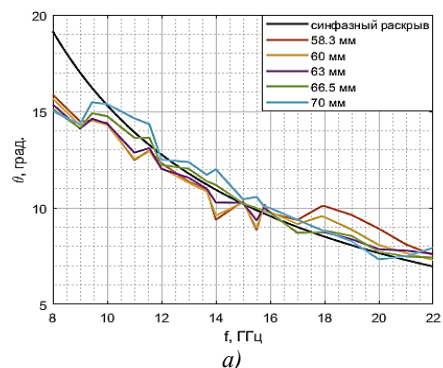


Рис. 6. Графики зависимости ширины ДН (*a*) и УБЛ (*б*) от частоты  $f$  при разном фокусном расстоянии

Анализ полученных результатов показывает, что при фокусном расстоянии равном 61.3 мм рабочая полоса облучателя с линзой 10-17 ГГц, т.е. шире, чем при других фокусных расстояниях.

Дальнейшее моделирование линзы из однородного диэлектрика проводится с использованием фокусного расстояния 66.3 мм, поскольку рабочая полоса у облучателя с линзой 9-24 ГГц, т.е. шире, чем при других фокусных расстояниях (рис. 5 и 6).

На рис. 7 приведено распределение поля в азимутальной (Н-плоскости) для линзы из параллельных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала на частоте 10 ГГц и 15 ГГц.

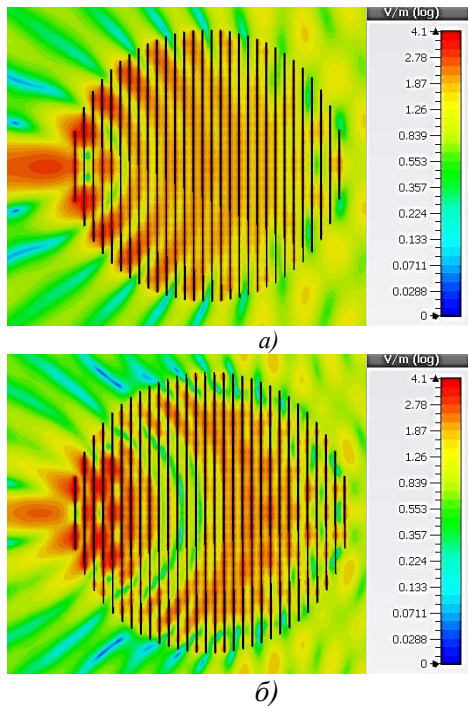


Рис. 7. Распределение поля в Н-плоскости линзы из метаматериала на частоте 10 ГГц (а) и 15 ГГц (б)

Анализ распределения поля показывает, что, несмотря на наличие дисперсии у  $\text{Re}(\epsilon_y)$ , фокусное расстояние не перемещается с ростом частоты и находится в пределах 61-67 мм.

Для уточнения величины фокусного расстояния рассматриваются направленные характеристики облучателя с линзой (см. рис. 3(б)) при разном фокусном расстоянии. На рис. 8-9 приведены зависимости КНД, КИП, ширины ДН по уровню  $-3$  дБ, УБЛ от частоты  $f$ . Там же приведены зависимости КНД и ширины ДН для синфазного равно-амплитудного раскрыва, вычисленные согласно [6], от частоты  $f$ .

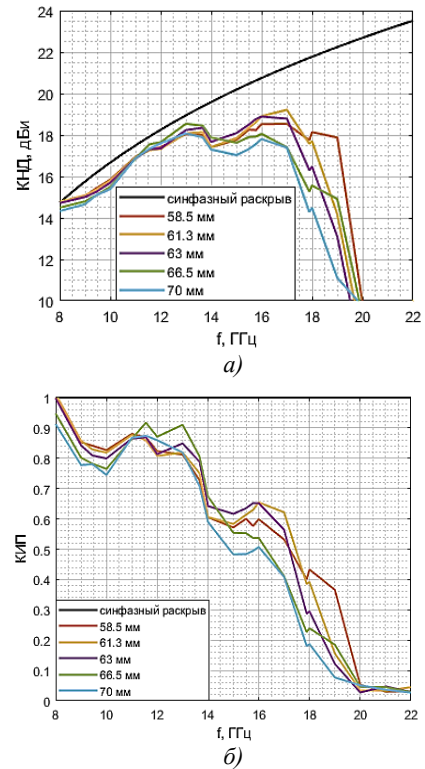


Рис. 8. Графики зависимости КНД (а) и коэффициента использования поверхности (б) от частоты  $f$  при разном фокусном расстоянии

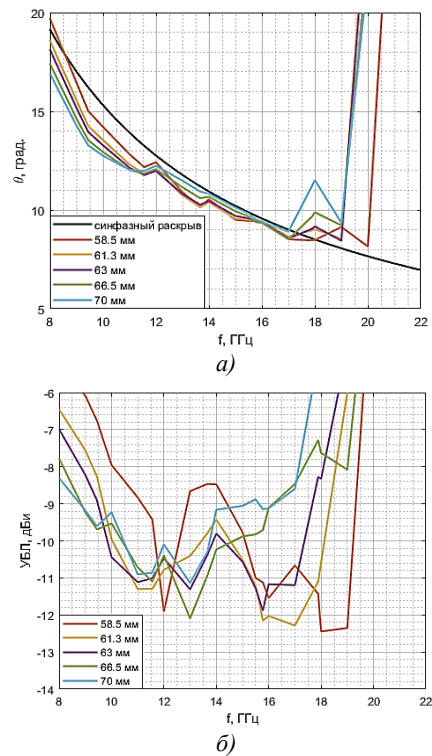


Рис. 9. Графики зависимости ширины ДН (а) и УБЛ (б) от частоты  $f$  при разном фокусном расстоянии

Анализ полученных результатов показывает, что при фокусном расстоянии равном 61.3 мм рабочая полоса облучателя с линзой 10-17 ГГц, т.е. шире, чем при других фокусных расстояниях (см. рис. 8 и 9). Дальнейшее моделирование линзы из метаматериала осуществляется с фокусным расстоянием равным 61.3 мм.

Таким образом, у линзы из однородного диэлектрика и линзы из последовательно расположенных параллельных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала фокусные расстояния отличаются на 5 мм.

### Результаты моделирования направленных и частотных характеристик

Поскольку целью работы является исследование возможности изготовления однородной цилиндрической из последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала, необходимо оценить направленные и частотные характеристики облучателя с линзой при разном повороте облучателя относительно центра линзы (далее поворот облучателя).

На рис. 10-12 приведены зависимости КНД, КИП, ширины ДН по уровню  $-3$  дБ, УБЛ, коэффициента отражения по входу от частоты  $f$  при разном повороте облучателя для линзы из метаматериала, а также для линзы из однородного диэлектрика, и приведены зависимости КНД и ширины ДН для синфазного равноамплитудного раскрыва, вычисленные согласно [6], от частоты  $f$ .

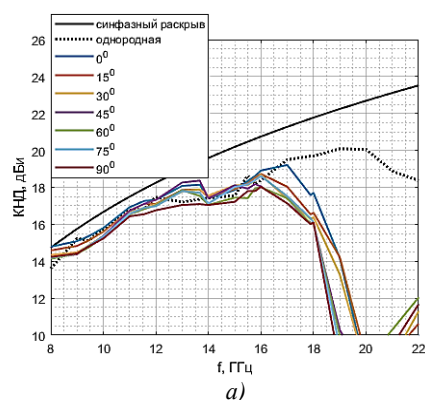


Рис. 10. Графики зависимости КНД (а) и коэффициента использования поверхности (б) от частоты  $f$  при разном фокусном расстоянии

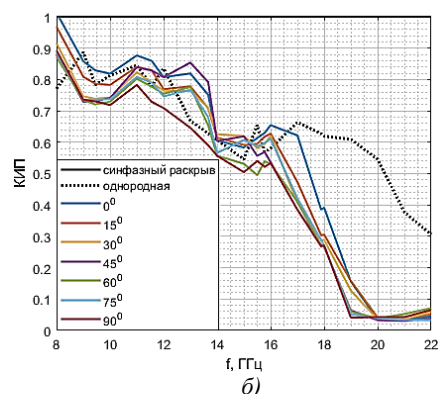


Рис. 10. Графики зависимости КНД (а) и коэффициента использования поверхности (б) от частоты  $f$  при разном фокусном расстоянии (продолжение)

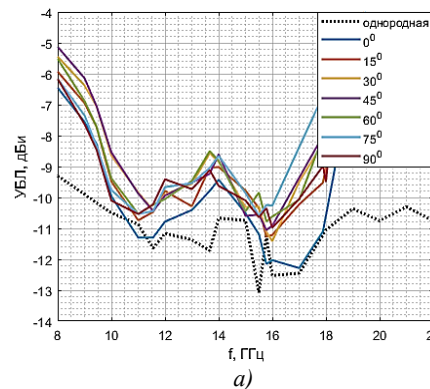
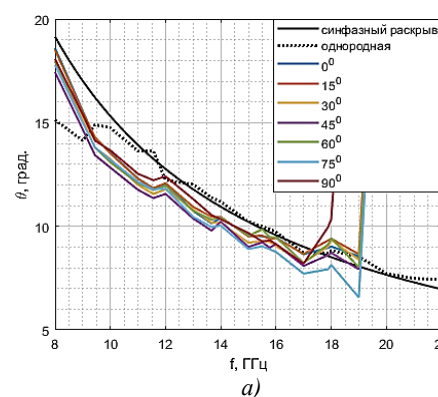


Рис. 11. Графики зависимости ширины ДН (а) и УБЛ (б) от частоты  $f$  при разном фокусном расстоянии

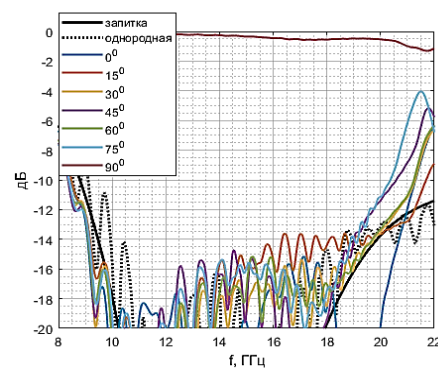


Рис. 12. Зависимость коэффициента отражения по входу от частоты  $f$

На рис. 13 приведены ДН в Н-плоскости на частоте 10 ГГц для линзы из метаматериала при разном повороте облучателя, а также для линзы из однородного диэлектрика. На рис. 14 показаны объемные ДН рассматриваемых линз.

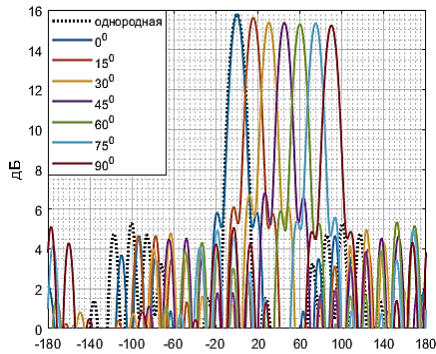


Рис. 13. Диаграмма направленности в Н-плоскости на частоте 10 ГГц при разном повороте облучателя

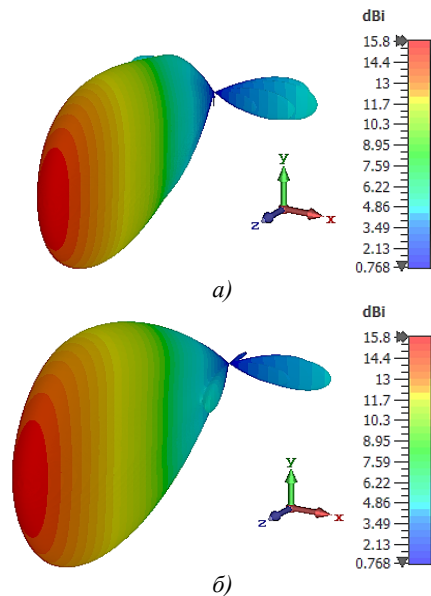


Рис. 14. Объемные ДН линзы из однородного диэлектрика (а) и метаматериала (б) на частоте 10 ГГц

Анализ полученных результатов показывает, что на частотах выше 18 ГГц у линзы из метаматериала разваливается ДН, т.е. снижается КНД до 10 дБи и КИП до 0.1 (см. рис. 10(а)), а ширина ДН становится в 3-4 раза больше ширины ДН синфазного равно-амплитудного раскрыва (см. рис. 11(а)), УБЛ возрастает до -4 дБи (см. рис. 11(б)). У линзы из однородного диэлектрика рабочая полоса составляет 8-24 ГГц. В диапазоне частот 10-16 ГГц:

- линзы из однородного диэлектрика и метаматериала имеют схожие КНД и КИП значения, т.е. КНД меньше на 1.5-2 дБи КНД синфазного равноамплитудного раскрыва, КИП в

обоих случаях убывает с ростом частоты (см. рис. 10);

- ширина ДН у линзы из однородного диэлектрика близка к ширине ДН синфазного равноамплитудного раскрыва – отличается в пределах  $1^0$  (см. рис. 11(а));

- ширина ДН у линзы из метаматериала на  $1^0-3^0$  уже ширины ДН синфазного равноамплитудного раскрыва (см. рис. 11(а));

- у линзы из однородного диэлектрика УБЛ на 1-2 дБи ниже, чем у линзы из метаматериала (см. рис. 11(б));

- линзы из однородного диэлектрика и метаматериала имеет схожий коэффициент отражения по входу ниже -15 дБ (см. рис. 12);

- исследуемые линзы имеют схожие ДН (см. рис. 13 и 14)

У линзы из метаматериала при повороте облучателя:

- снижаются КНД и КИП (см. рис. 10);

- ширина ДН остается примерно одинаковой (см. рис. 11(а));

- возрастает УБЛ и становится выше -10 дБи (см. рис. 11(б)) из-за наличия анизотропии у метаматериала;

- при повороте облучателя на  $90^0$  величина коэффициента отражения по входу близка к 1 (см. рис. 12).

### Заключение

Изготовление однородной цилиндрической линзы возможно из последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала. При этом у линзы из однородного диэлектрика и метаматериала схожие направленные и частотные характеристики, но у линзы из метаматериала выше УБЛ и уже рабочая полоса. Фокусные расстояния исследуемых линз отличаются на 5 мм друг от друга.

Направлением дальнейших исследований является создание линз из неоднородного диэлектрика на основе последовательно расположенных печатных плат с нанесенной периодической структурой метаматериала.

### Литература

1. Многолучевые антенны для систем радиолокации и связи / А.В. Шишлов, Б.А. Левитан, С.А. Топчиев, В.Р. Анпилогов, В.В. Денисенко// Журнал радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 1-30.
2. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. М.: Советское радио, 1974. 280 с.

3. Xin H., Liang M. 3D printed microwave and THz devices using polymer jetting techniques // *Proceedings of the IEEE*. 2017. № 4(105). Pp. 737-755.
4. Planar Luneburg Lens Based on the High Impedance Surface for Effective Ku-Band Wave Focusing / G. Cheng, Y. Wu, J.X. Yin, N. Zhao, T. Qiang, X. Lv // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. Pp. 16942-16947.
5. W. Rotman, R. Turner Wide-angle microwave lens for line source applications // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1963. № 6(11). Pp. 623-632
6. Rappaport C.M., Zaghoul A.I. Multifocal Bootlace Lens Design Concepts: a Review // 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 2005.
7. McGrath D. Planar three-dimensional constrained lenses // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1986. № 1(34). Pp. 46-50.
8. Kaouach H., Dussopt L., Sauleau R. Modeling, Design and Demonstration for Discrete Lens Antenna with Circular –Polarization in the 60-GHz Band // *Int. J. of Res. in Wireless Syst.* 2012. № 1(1).
9. Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г. Антенно-фидерные устройства. М.: Советское радио, 1974. 536 с.
10. A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index / M. Choi, S.H. Lee, Y. Kim, B.S. Kang, J. Shin, M.H. Kwak, K.Y. Kang, Y.H. Lee, N. Park, B. Min // *Nature*. 2011. Vol.470. № 7334. Pp. 369-373.
11. Modified Luneburg Lens Based on Metamaterials / H. Chen, Q. Cheng, A. Huang, J. Dai, H. Lu // *International Journal of Antennas and Propagation*. 2015. Vol. 2015. 6 p.
12. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous Metamaterials / D.R. Smith, D.C. Vier, T. Koschny, C.M. Soukoulis // *Physical Review. E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*. 2005. Vol.71. №3.
13. A review of the scattering parameter extraction method with clarification of ambiguity issues in relation to metamaterial homogenization / S. Arslanagić, T.V. Hansen, N.A. Mortensen, A.H. Gregersen, O. Sigmund, R.W. Ziolkowski, O. Breinbjerg // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2013. Vol.55. №2. P. 91-106.
14. Szabó Z. Closed Form Kramers–Kronig Relations to Extract the Refractive Index of Metamaterials // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017. № 4(2017). Pp. 1150-1159.

Поступила 18.06.2020; принята к публикации 20.08.2020

#### Информация об авторах

**Пастернак Юрий Геннадьевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14); Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а); АО «Иркос» (129626, Россия, г. Москва, а/я 30), e-mail: pasternakyg@mail.ru

**Рогозин Евгений Александрович** – д-р техн. наук, профессор, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (398600, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54а), e-mail: evgenirogozin@yandex.ru

**Рогозин Руслан Евгеньевич** – соискатель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru

**Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: fedorov\_sm@mail.ru

### SYNTHESIS AND ANALYSIS OF ONE CYLINDRICAL LENS BASED ON PARALLEL PRINTED CIRCUIT BOARDS WITH ELECTRICALLY SMALL DIFFUSERS

Yu.G. Pasternak<sup>1,2,3</sup>, E.A. Rogozin<sup>2</sup>, R.E. Rogozin<sup>1</sup>, S.M. Fedorov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia

<sup>3</sup>JSC «IRCOS», Moscow, Russia

**Abstract:** the possibility of creating a uniform cylindrical lens based on serially arranged printed circuit boards with applied periodic metamaterial structure was investigated. H-shaped structure located on dielectric substrate is used as cell of periodic structure of metamaterial. On the basis of the performed analysis of open literary and scientific-technical sources, the effect of the size of metal conductors of the H-shaped structure on the values of the actual part of the effective permittivity of the metamaterial is considered. Field distribution in azimuth plane is shown at normal fall of linearly polarized flat wave on lens surface from uniform dielectric and metamaterial. Directed characteristics of lens of irradiator with lens of uniform dielectric and metamaterial are considered for clarification of focal length. Conclusions are drawn on the value of focal distance. The directed and frequency characteristics of a lens from metamaterial at different turn of the irradiator concerning the center of a lens, a lens from uniform dielectric are investigated. Conclusions are drawn about similarity and difference of directional and frequency characteristics of two lenses, about influence of rotation of irradiator relative to lens center on characteristics of lens made of metamaterial. The results obtained in r-bot will be useful in designing lens antennas based on series-arranged printed circuit boards with applied periodic metamaterial structure

**Key words:** uniform cylindrical lens, metamaterial, directional and frequency characteristics

References

1. Shishlov A.V., Levitan B.A., Topchiev S.A., Anpilogov V.R., Denisenko V.V. "Multi-beam antennas for radar and communications systems", *Journal of Electronics (Zhurnal radioelektroniki)*, 2018, no. 7, pp. 1-30.
2. Zelkin E.G., Petrova R.A. "Lens antennas" ("Linzovye anteny"), Moscow, Sovetskoe radio, 1974, 280 p.
3. Xin H., Liang M. "3D printed microwave and THz devices using polymer jetting techniques", *Proceedings of the IEEE*, 2017, vol. 105, no. 4, pp. 737-755.
4. Cheng G., Wu Y., Yin J.X., Zhao N., Qiang T., Lv X. "planar Luneburg lens based on the high impedance surface for effective Ku-band wave focusing", *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 16942-16947.
5. Rotman W., Turner R. "Wide-angle microwave lens for line source applications", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1963, vol. 11, no. 6, pp. 623-632.
6. Rappaport C.M., Zaghoul A.I. "Multifocal bootlace lens design concepts: a review", *2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2005.
7. McGrath D. "Planar three-dimensional constrained lenses", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, vol. 34, no. 1, pp. 46-50.
8. Kaouach H., Dussopt L., Sauleau R. "Modeling, design and demonstration for discrete lens antenna with circular – polarization in the 60-GHz band", *Int. J. of Res. in Wireless Syst*, 2012, vol.1, no. 1.
9. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. "Antenna feeder devices" ("Antenno-fidernye ustroystva"), Moscow, Sovetskoe radio, 1974, 536 p
10. Choi M., Lee S.H., Kim Y., Kang B.S., Shin J., Kwak M.H., Kang K.Y., Lee Y.H., Park N., Min B. "A terahertz metamaterial with unnaturally high refractive index", *Nature*, 2011, vol. 470, no. 733, pp. 369-373.
11. Chen H., Cheng Q., Huang A., Dai J., Lu H. "Modified Luneburg lens based on metamaterials", *International Journal of Antennas and Propagation*, 2015, vol. 2015, 6 p.
12. Smith D.R., Vier D.C., Koschny T., Soukoulis C.M. "Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous Metamaterials", *Physical Review. E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2005, vol.71, no. 3.
13. Arslanagić S., Hansen T.V., Mortensen N.A., Gregersen A.H., Sigmund O., Ziolkowski R.W., Breinbjerg O. "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.
14. Szabó Z. "Closed form Kramers–Kronig relations to extract the refractive index of metamaterials", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, vol. 2017, no. 4, pp. 1150-1159.

Submitted 18.06.2020; revised 20.08.2020

Information about the authors

**Yuriy G. Pasternak**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), Leading Engineer of JSC "IRCOS" (21 Zvezdnyy blvd., Moscow 129626, Russia), Senior Researcher, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Starykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

**Evgeniy A. Rogozin**, Dr. Sc. (Technical), Professor, Military scientific educational center of Military-Air forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air academy" (54A Starykh Bol'shevikov st., Voronezh 394064, Russia), e-mail: evgeni-rogozin@yandex.ru

**Ruslan E. Rogozin**, Seeker, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru

**Sergey M. Fyedorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14, Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: fedorov\_sm@mail.ru