

Раздел III. Моделирование процессов и систем

УДК 621.396

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-141-150

Д.Е. Губарев, Ю.В. Юханов

РАЗРАБОТКА ЧЕТЫРЕХСТУПЕНЧАТОЙ ЛИНЗЫ ЛЮНЕБЕРГА ДЛЯ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК РАДИОПЕЛЕНГАТОРОВ

В рамках НИР «Линза» проводимой на предприятии АО «ТНИИС» разработана конструкция четырехступенчатой линзы Люнеберга на основе однородного ступенчатого диэлектрика, изготовлен макет с внешним диаметром 210 мм (материал диэлектрика полистирол ПТ-3 $\epsilon=2,6$), удовлетворяющий симфазности и равномерному амплитудному распределению лучей на выходе апертуры линзы. Ширина ДН составила от 10 -14 град. Уровень боковых лепестков на частотах f_w, f_{cp}, f_n не превышает -13 дБ по уровню, масса 0.3 кг. По этим параметрам на заданных частотах линза отличается от разработанных ранее аналогов. Цель работы разработать конструкцию и изготовить макет четырехступенчатой линзы Люнеберга на основе однородного ступенчатого диэлектрика, который будет по своим характеристикам не уступать зарубежным аналогам, что позволит обеспечить возможность импортозамещения. А также одной из целей работы — это упростить согласование такой линзы с фидерным трактом и приемопередающей аппаратурой, производство которой было бы экономически целесообразной по сравнению с аналогами. Также необходимо провести экспериментальное исследование диаграммообразующего устройства на основе данной линзы с целью получения диаграмм направленности центрального луча и в всех 7-ми выходных лучей линзы Люнеберга на заданных трех частотах.

Диаграмма направленности; линза Люнеберга (ЛЛ); диаграммообразующие устройства (ДГУ); антенная решетка; динамический диапазон.

D.E. Gubarev, Yu.V. Yukhanov

DEVELOPMENT OF A FOUR-STAGE LUNEBERG LENS FOR ANTENNA ARRAYS OF RADIO DIRECTORS

As part of the research and development work "Lens" carried out at the enterprise JSC "TNIIS", a design of a four-stage Luneberg lens was developed on the basis of a homogeneous stepped dielectric, a model with an external diameter of 210 mm was made (dielectric material PT-3 distribution of rays at the exit of the lens aperture. The width of the BP ranged from 10 -14 degrees. The level of side lobes at frequencies f_w, f_{av}, f_n does not exceed -13 dB in level, weight 0.3 kg. According to these parameters at the given frequencies, the lens differs from previously developed analogs. The purpose of the work is to develop a design and manufacture a model of a four-stage Luneberg lens based on a homogeneous stepped dielectric, which will not be inferior in its characteristics to foreign counterparts, which will provide the possibility of import substitution. And also one of the goals of the work is to simplify the coordination of such a lens with a feeder path and transceiver equipment, the production of which would be economically feasible in comparison with analogs. It is also necessary to conduct an experimental study of the beamforming device based on this lens in order to obtain the directional patterns of the central beam and in all 7 output beams of the Luneberg lens at the given three frequencies.

Directional diagram; Luneberg lens (LL); diagram-forming devices (DFD); antenna array; dynamic range.

Введение. Для осуществления приема-передачи электромагнитных волн одновременно в нескольких направлениях могут применяться устройства для фокусировки, такие как линза Люнеберга, представляющие собой сферическую, либо цилиндрическую линзы из диэлектрика, в которых диэлектрическая проницаемость является переменной и изменяется по следующему закону (1) [1].

$$\varepsilon(r) = 2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2, \quad (1)$$

где r – расстояние от центра линзы; R – радиус сферы.

В [4–6] изложены принципы работы апертурных антенн с равномерным и косинусоидальным распределением амплитуды поля по апертуре. В статьях [1–7] показано как именно осуществляется возможность коррекции неравномерного фазового распределения по апертуре при помощи диэлектрической линзы.

В статье [8] авторов: А.М. Бобрешов, Г.К. Усков, П.А. Кретов, Н.А. Лысенко, Н.С. Сбитнев был предложен подход реализации сканирования луча и управление параметрами диаграммы направленности с помощью одной антенны. Описанный способ управления лучом, является более простым по исполнению с способами, предложенными в [4–6]. Он заключается в модификации ТЕМ-рупора таким образом, чтобы возникала возможность изменять направление главного лепестка его диаграммы направленности путем переключения нескольких входов антенны, каждый из которых соответствует конкретному направлению излучения. Основным недостатком является проблема фокусировки луча в двух плоскостях. Поэтому одной из задач статьи это исследовать способ, которым можно упростить согласование такой линзы с фидерным трактом и приемопередающей аппаратурой, при этом производство которого было бы экономически целесообразным.

В статьях [7–11] представлены результаты разработки и экспериментального исследования цилиндрической линзы Люнеберга сантиметрового и миллиметрового диапазона, выполненной средствами 3D печати, на основе однородного ступенчатого и перфорированного диэлектрика. Авторы статьи [9]: А.А. Кузиков, Р.С. Орехов, Ю.П. Саломатов, М.И. Сугак описывают способ изготовления линзы Люнеберга с помощью 3D-печати, что обеспечивает относительную дешевизну производства, а возможность регулировать процент заполнения слоя хорошо согласуется с требуемым характером структуры. Это является новым подходом в разработке линзовых структур. Однако в статьях [7–11] описаны линзы Люнеберга у которых уровень боковых лепестков выше по сравнению с четырех ступенчатой линзой на частотах f_v, f_{cp}, f_n описанной в данной работе. А также в статьях [7-10] нету описания расчета геометрии линзы и как именно осуществляется симфазность и равномерное амплитудное распределению лучей на выходе апертуры линзы.

На основании полученных данных из статей можно сделать вывод [1–13], что решением основных недостатков описанных линзовых структур является разработка новой упрощенной конструкции четырехступенчатой линзы Люнеберга на основе однородного ступенчатого диэлектрика для заданных частот f_v, f_{cp}, f_n , которая позволит обеспечить фокусировку луча в двух плоскостях, упростит согласование такой линзы с фидерным трактом и приемопередающей аппаратурой и производство которой было бы экономически целесообразной по сравнению с аналогами описанными в [1–13].

Расчет основных параметров линзы Люнеберга. У диэлектрической ЛЛ показатель преломления не является постоянным, а изменяется по некоторому закону в зависимости от расстояния от центра в сферических или от оси в цилиндрических линзах [1].

Коэффициент преломления сферической неоднородной линзы Люнеберга должен меняться по закону (2) [1]:

$$n = n_R \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} = n_0 \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R}\right)^2}, \quad (2)$$

где n_R, n_0 – коэффициенты преломления соответственно при $r=R$ и при $r=0$, соответственно.

Чтобы минимизировать отражения и преломление на выходе линзы, коэффициент преломления выбирается [6] $n_R=1$. Для того, чтобы понимать, как именно должен изменяться закон преломления (2) наглядно показан ход лучей в линзе Люнеберга на рис. 1.

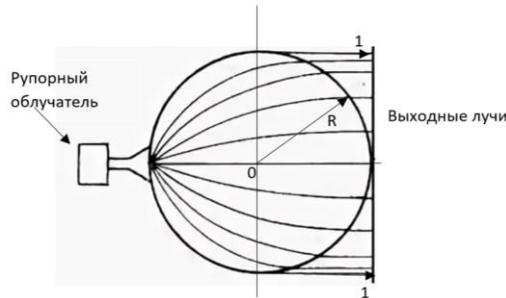


Рис. 1. Траектория лучей в линзе Люнеберга

Как видно, на выходе линзы получается параллельный пучок лучей. Данная линза позволяет изменять положение луча в пределах 360° без искажений диаграммы направленности при перемещении облучателя по поверхности сферы.

За основу разработки в данной работе бралась традиционная технология изготовления таких линз, связанных с разработкой набора сфер с n слоями, изменяющимся по закону (2), при изготовлении «дырчатых» (искусственных) диэлектриков [10].

Кроме того, при построении цилиндрических линз и формировании диаграмм направленности на горизонтальной и вертикальной или круговой поляризациях зависимость коэффициента преломления связана с длиной волны (λ). Закон изменения коэффициента преломления можно рассчитать по формуле (2) [9–12].

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} - \left(\frac{\lambda}{2B_R}\right)^2}, \quad (2)$$

где v – расстояние между металлическими плоскостями (см. рис. 2);

ε – диэлектрическая проницаемость среды;

ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума.

Были проведены исследования линзы Люнеберга, изготовленной по «дырчатой» технологии для частот $f_n=0.76*f_0$ ГГц, $f_{cp}=0.92*f_0$ ГГц, $f_v=1.38*f_0$ ГГц., где f_0 -центральная частота сантиметрового диапазона волн в котором проводился эксперимент. Проводилось это исследование при возбуждении наклонным (45°) открытым концом волновода [14, 15]. Данные исследования занесены в табл. 1.

Таблица 1

Основные параметры линзы

f частота	Ширина ДН в град.	Уровень бок. лепестков в дБ	Коэффициент эллиптичности
f в	10	-3	0.5
f ср	10	-13	0.5
f н	14	-13	0.16

Как видно из табл. 1, в коротковолновом диапазоне резко возрастает уровень боковых лепестков, причем в большей степени для горизонтальной поляризации, а в длинноволновом краю ухудшается соотношение поляризаций из-за различных фазовых скоростей в линзе для Н и Е волн. Диапазонность такой линзы составляет примерно 40%, при приемлемых параметрах. В литературе [9–11] описана линза Люнеберга, в которой фазовая скорость V_{ϕ} от радиуса линзы r изменяется с изменением расстояния (δ) между металлическими обкладками (рис. 2), однако как было обнаружено [6] диапазонные свойства такой линзы, будут такими же, как и для «дырочного» диэлектрика.

При исследовании линзы Люнеберга для Е волны мы получили метод расчета изменения коэффициента преломления за счет разной толщины диэлектрика $t(r)$, расположенного между двумя металлическими пластинами (рис. 2).

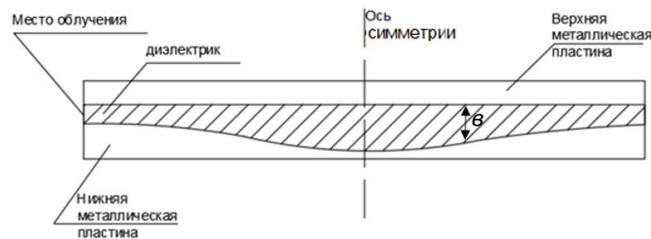


Рис. 2. Продольное сечение цилиндрической линзы Люнеберга

Рассматривая данную систему как конденсатор с двойным диэлектриком, можно определить эффективное значение диэлектрической проницаемости $\varepsilon_{\text{эф}}$ [9, 10].

$$C_{\text{эф}} = \frac{C_1 * C_2}{C_1 + C_2}, \quad (3)$$

где

$$C_1 = \frac{\varepsilon_1 * S}{4\pi t_1} \quad \text{и} \quad C_2 = \frac{\varepsilon_2 * S}{4\pi t_2},$$

где t_1 – толщина линзы;

t_2 – расстояние в центре зазора между диэлектриком и металлической поверхностью (см. рис. 3).

После подстановки получим [9]:

$$\varepsilon_{\text{эф}} = t * \left[\frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{t_1(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) + \varepsilon_1 t_1} \right]. \quad (4)$$

С другой стороны, $\varepsilon_{\text{эф}}$ для линзы Люнеберга равно (5) [10]:

$$n = \sqrt{\varepsilon_{\text{эф}}} = \sqrt{2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2} \quad (5)$$

при $n_R=1$

Приравнявая уравнения (4) и (5), обозначив $\left[2 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] = a$ и приняв $\varepsilon_2=1$, получим толщину диэлектрика t_1 (см.рис. 3), равную:

$$t_1 = \frac{a-1}{\varepsilon-1} * \frac{\varepsilon_1}{a} * t. \quad (6)$$

Формула (6) получена впервые. В соответствии с уравнением (6) была изготовлена линза. В качестве диэлектрика был использован полистирол ПТ- 3 ($\varepsilon_1=2,6$) [16]. Из уравнения (6) видно, что параметры линзы не зависят от частоты [17, 18].

Основываясь на формулах (4–6), показано, что в разработанной линзе закон изменения коэффициента преломления выполнялся за счет разной толщины диэлектрика в зависимости от радиуса r , диэлектрик был выполнен дискретно 4-мя ступенями, показанный на рис. 3, при расстоянии между обкладками 13 мм. Расстояние в центре зазора между диэлектриком и металлической поверхностью составил 6 мм.

Данное конструкторское решение позволило получить максимум диэлектрической проницаемости в центре линзы и минимум на ее краях. Это так же позволило получить симфазность лучей на выходе апертуры линзы и равномерное амплитудное распределение.

Внешний диаметр составил 210 мм, зная диаметр линзы минимальный разнос излучателей между друг другом составил 15° , а максимальное количество облучателей 7. Возбуждалась линза 7 открытыми концами волновода 23×10 мм (рис. 3).

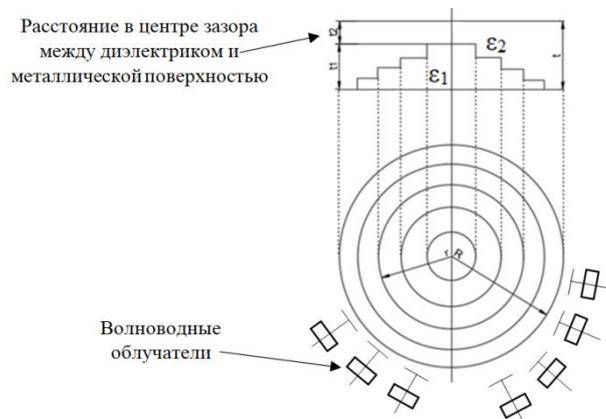


Рис. 3. Ступенчатая линза Люнеберга

Эксперимент. Эксперимент проводился на установке, структурная схема которой приведена на рисунке 4. Для настройки антенны использовался генератор аналоговых сигналов E8257D-540, кронштейн для закрепления антенны, антенна измерительная типа П6-128 [19]. Расстояние между антеннами составляет 10 м. Платформа вращалась в пределах $\pm 80^\circ$. Точность установки платформы $\pm 1^\circ$. Угловая скорость вращения платформы может устанавливаться в пределах от 0,6 до 12 град/сек.

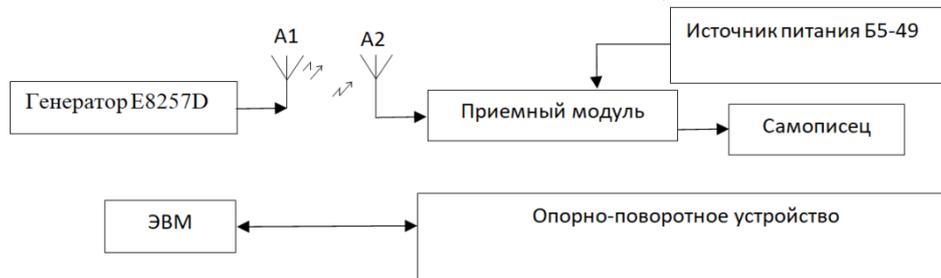


Рис. 4. Структурная схема экспериментальной установки

На этом рисунке обозначено:

A1-измерительная излучающая антенна типа П6-128 [19];

A2-Измеряемая многолучевая антенна.

В качестве приемника использован приемник прямого усиления М42135 6Ш2.030.273ТУ.

На рис. 5 представлена диаграмма направленности центрального луча в горизонтальной плоскости на f_v -верхней частоте, на рис. 6–9 ДН в горизонтальной плоскости для 7-ми входов линзы и Д.Н. в вертикальной плоскости для f_n , f_{cp} , f_v , где на оси Оу отложен уровень ДН в dB [12, 14, 15].

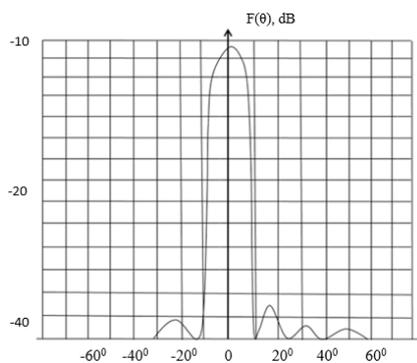


Рис. 5. ДН в горизонтальной плоскости на f_v для центрального луча

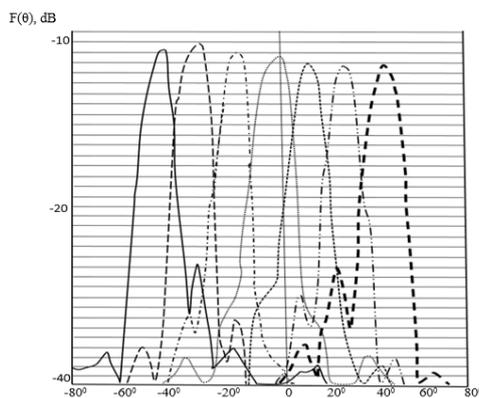


Рис. 6. ДН в горизонтальной плоскости для 7-ми входов линзы Люнеберга на f_n

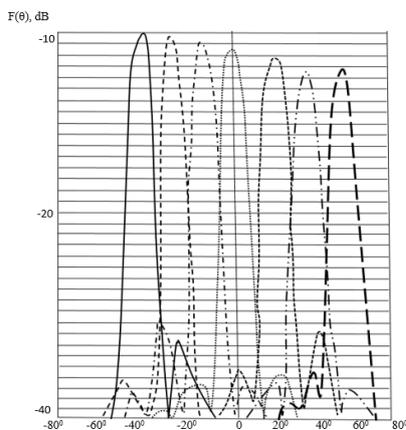


Рис. 7. Д.Н. в горизонтальной плоскости для 7-ми входов линзы Люнеберга на f_{cp}

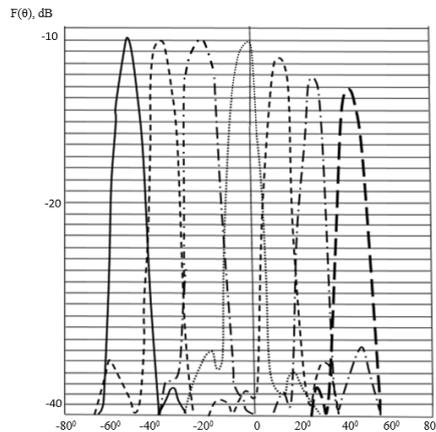


Рис. 8. Д.Н. в горизонтальной плоскости для 7-ми входов линзы Лунеберга на f_v

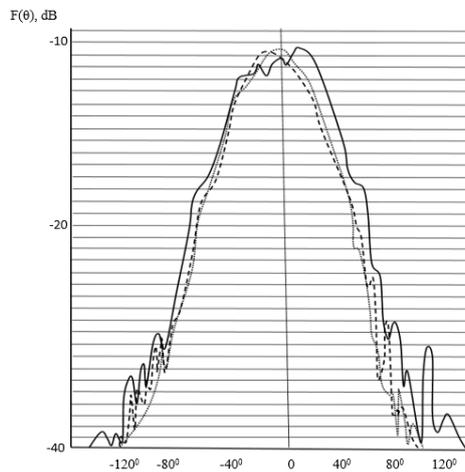


Рис. 9. Д.Н. в вертикальной плоскости $-f_n$, f_{cp} , $--f_v$. (см. табл. 1)

Как видно из диаграмм направленности при сканировании уровень пересечения соседних лучей изменяется от 0,1 до 0,4, что связано с большими размерами возбуждающих волноводов. Для обеспечения требуемого пересечения скажем не хуже 3дБ необходимо использовать по две таких линзы, расположенных друг над другом или рядом с разворотом осей диаграмм направленности друг относительно друга.

Основные отличия такой линзы от аналогов [1-13] состоит в следующем:

1. Уровень боковых лепестков на частотах f_v, f_{cp}, f_n не превышает -13 дБ по уровню.
2. Позволяет обеспечить фокусировку луча в двух плоскостях.
3. Ширина ДН составила от 10 -14 град.
4. Масса конструкции 0.3 кг.

Заключение. Как видно из рис. 5–9 симфазность лучей на выходе апертуры линзы и равномерное амплитудное распределение сохраняется. При разработке радиооптической ЛЛ были рассчитаны основные параметры и предложена конструкция четырехступенчатой линзы «Е» и «Н» поляризации со ступенчатым ди-

электриком для использования в радиопеленгаторах. Были получены характеристики, позволяющие использовать такую линзу для построения многолучевых антенных решеток.

Разработана конструкция четырехступенчатой линзы Лüneберга на основе однородного ступенчатого диэлектрика, изготовлен макет с внешним диаметром 210 мм (материал диэлектрика полистирол ПТ-3 $\epsilon=2,6$), удовлетворяющий симфазности и равномерному амплитудному распределению лучей на выходе апертуры линзы. Ширина ДН составила от 10 -14 град. Уровень боковых лепестков на частотах f_v, f_{cp}, f_n не превышает -13 дБ по уровню, масса 0.3 кг.

При необходимости сканирования 360° может быть использована схема с двумя линзами, включенными совместно через направленные ответвители с коэффициентом ответвления мощности 0,5 Вт. Конструктивно направленные ответвители выполняются в виде двух связанных линий передачи [20, 21].

В процессе дальнейших работ необходимо провести исследование с помощью возбудителя с малыми размерами: вибратор, волновод, заполненный диэлектриком, и т.д. А также изучить влияние взаимных связей таких возбудителей на параметры линзы Лüneберга.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wu X., Laurin J.-J. Fan-Beam Millimeter-Wave Antenna Design Based on the Cylindrical Luneberg Lens // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – September 2007. – Vol. 55 (8). – P. 2147-2156.
2. Park Y. and Wiesbeck W. Angular Independency of a Parallel-Plate Luneburg Lens with Hexagonal Lattice and Circular Metal Posts // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – February 2002. – No. 1 (1). – P. 128-130.
3. Fuchs B., Le Coq L., Lafond O. Design Optimization of Multishell Luneburg Lenses // IEEE Transactions on antennas and propagation. – 2014. – Vol. 55, No. 2.
4. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. – М.: Советское радио, 1974. – 280 с.
5. Гладышев В.О., Терешин А.А. Линза Лüneберга В подвижной системе координат. – 2016.
6. By Ollie Holt. Technology Survey a Sampling of RWRs and ESM Systems // The Journal Electronic Defense, Yune 2015. – P. 39-46.
7. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
8. Бобришов А.М., Усков Г.К., Кретов П.А., Лысенко Н.А., Сбитнев Н.С. Многолучевая ТЕМ-рупорная антенна с формированием направления линзой Лüneберга.. – Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГУ», 2018.
9. Кузиков А.А., Орехов Р.С., Саломатов Ю.П., Сугак М.И. Исследование печатной цилиндрической линзы Лüneберга // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018.
10. Конструкции антенн на основе линзы Лüneбурга. – 2018. – URL: <http://farragsat.meximas.com/homearab.html>.
11. Ахияров В.В., Калошин В.А., Никитин Е.А. Исследование широкополосных планарных линз Лüneбурга // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – № 1.
12. Ашихмин А.В., Негрбов В.В., Пастернак Ю.Г., Федоров С.М. Исследование конструкций сверхширокополосных излучающих структур на основе плоской линзы Лüneберга // Радиотехника. – 2012. – № 5. – С. 14-17.
13. Дьяченко П.Н. Градиентная фотонно-квасикристаллическая линза Лüneберга // Сб. докладов Молодежной научной школы по нанофотонике (30 июня 2012 г.) 20-го международного конгресса Nanostructures: Physics and Technology.
14. Фельд Я.Н., Бененсон Л.С. Антенно-фидерные устройства. Ч. 2. – М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1959.
15. Фрадин А.З. Антенны СВЧ. – М.: Сов.радио, 1957.
16. Бахарев С.И., Вольман В.И., Либ Ю.Н и др. Справочник по расчету и конструированию СВЧ полосковых устройств / под ред. В.И. Вольмана. – М.: Радио и связь, 1982. – 328 с.

17. *Morgan S.P.* General Solution of the Luneberg Lens Problem // *J. Appl. Phys.* – 1958. – Vol. 29, No. 9. – P. 1358.
18. *Панченко Б.А., Денисов Д.В., Мусин А.М., Скумошенко И.О.* Тензорные функции Грина для расчета электромагнитных полей от слоистых сферических структур // *Вестник СибГУТИ.* – 2016. – № 2. – С. 18-24.
19. *Асламбеков В.В., Горин А.М., Гринько Е.А.* Многолучевая линзовая антенна с плоской защитной диафрагмой // *Вопросы специальной радиоэлектроники. Серия ОВР.* – 2015. – Вып. № 1. – С. 64-69.
20. *Ахияров В.В., Калошин В.А., Никитин Е.А.* Исследование широкополосных планарных линз Лüneбурга // *Журнал радиоэлектроники.* – 2014. – № 1.
21. *Garcia-Ortiz C.E., Cortes R., Gómez-Correa J.E., Pisano E., Fiutowski J., Garcia-Ortiz D.A., Ruiz-Cortes V., Rubahn H.-G., and Coello V.* Plasmonic metasurface Luneburg lens // *Photonics Research.* – October 2019. – No. 7 (10).

REFERENCES

1. *Wu X., Laurin J.-J.* Fan-Beam Millimeter-Wave Antenna Design Based on the Cylindrical Luneberg Lens, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, September 2007, Vol. 55 (8), pp. 2147-2156.
2. *Park Y. and Wiesbeck W.* Angular Independency of a Parallel-Plate Luneburg Lens with Hexagonal Lattice and Circular Metal Posts, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, February 2002, No. 1 (1), pp. 128-130.
3. *Fuchs B., Le Coq L., Lafond O.* Design Optimization of Multishell Luneburg Lenses, *IEEE Transactions on antennas and propagation*, 2014, Vol. 55, No. 2.
4. *Zelkin E.G., Petrova R.A.* Linzovye anteny [Lens antennas]. Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 280 p.
5. *Gladyshev V.O., Tereshin A.A.* Linza Lyuneberga V podvizhnoy sisteme koordinat [The Luneberg lens in a movable coordinate system], 2016.
6. *By Ollie Holt.* Technology Survey a Sampling of RWRs and ESM Systems, *The Journal Electronic Defense*, Yune 2015, pp. 39-46.
7. *Zhuk M.S., Molochkov Yu.B.* Proektirovaniye linzovykh, skaniruyushchikh, shirokodiapazonnykh antenn i fidernykh ustroystv [Design of lens, scanning, wide-band antennas and feeder devices]. Moscow: Energiya, 1973, 440 p.
8. *Bobreshov A.M., Uskov G.K., Kretov P.A., Lysenko N.A., Sbitnev N.S.* Mnogoluchevaya TEM-rupornaya antenna s formirovaniem napravleniya linzoy Lyuneberga [Multipath TEM-horn antenna with direction shaping by a Luneberg lens]. Voronezh: FGBOU VO «VGU», 2018.
9. *Kuzikov A.A., Orekhov R.S., Salomatov Yu.P., Sugak M.I.* Issledovaniye pechatnoy tsilindricheskoy linzy Lyuneberga [Investigation of the printed cylindrical lens of Luneberg], *Elektronika i mikroelektronika SVCh* [Electronics and microelectronics of microwave], 2018.
10. *Konstruktsii antenn na osnove linzy Lyuneberga* [Antenna designs based on the Luneberg lens], 2018. Available at: <http://farragsat.meximas.com/homearab.html>.
11. *Akhiyarov V.V., Kaloshin V.A., Nikitin E.A.* Issledovaniye shirokopolosnykh planarnykh linz Lyuneberga [Investigation of broadband planar lenses of Luneberg], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radioelectronics], 2014, No. 1.
12. *Ashikhmin A.V., Negrobov V.V., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M.* Issledovaniye konstruktsiy sverkhshirokopolosnykh izluchayushchikh struktur na osnove ploskoy linzy Lyuneberga [Investigation of designs of ultra-wideband radiating structures based on a flat Luneberg lens], *Radiotekhnika* [Radio Engineering], 2012, No. 5, pp. 14-17.
13. *D'yachenko P.N.* Gradientnaya fotonno-kvazikristallicheskaya linza Lyuneberga [Gradient photonic-quasi-crystalline lens of Luneberg], *Sb. dokladov Molodezhnoy nauchnoy shkoly po nanofotonike (30 iyunya 2012 g.) 20-go mezhdunarodnogo kongressa Nanostructures: Physics and Technology* [Collection of reports of the Youth Scientific School on Nanophotonics (June 30, 2012) of the 20th International Congress of Nanostructures: Physics and Technology].
14. *Fel'd Ya.N., Benenson L.S.* Antenno-fidernyye ustroystva [Antenna-feeder devices]. Part 2. Moscow: VVIA im. N.E. Zhukovskogo, 1959.
15. *Fradin A.Z.* Antenny SVCh [Microwave antennas]. Moscow: Sov.radio, 1957.
16. *Bakharev S.I., Vol'man V.I., Lib Yu.N i dr.* Spravochnik po raschetu i konstruirovaniyu SVCh poloskovykh ustroystv [Handbook on the calculation and design of microwave strip devices], ed. by V.I. Vol'mana. Moscow: Radio i svyaz', 1982, 328 p.

17. *Morgan S.P.* General Solution of the Luneberg Lens Problem, *J. Appl. Phys.*, 1958, Vol. 29, No. 9, pp. 1358.
18. *Panchenko B.A., Denisov D.V., Mucin A.M., Skumotenko I.O.* Tenzornye funktsii Grina dlya rascheta elektromagnitnykh poley ot sloistykh sfericheskikh struktur [Green tensor functions for calculating electromagnetic fields from layered spherical structures], *Vestnik SibGUTI* [Bulletin of SibGUTI], 2016, No. 2, pp. 18-24.
19. *Aslambekov V.V., Gorin A.M., Grin'ko E.A.* Mnogoluchevaya linzovaya antenna s ploskoy zashchitnoy diafragmoy [Multipath lens antenna with a flat protective diaphragm], *Voprosy spetsial'noy radioelektroniki. Seriya OVR* [Questions of special radio electronics. OVR Series], 2015, Issue No. 1, pp. 64-69.
20. *Akhiyarov V.V., Kaloshin V.A., Nikitin E.A.* Issledovanie shirokopolosnykh planarnykh linz Lyuneburga [Investigation of broadband planar lenses of Luneburg], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2014, No. 1.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. М.И. Дулин.

Губарев Дмитрий Егорович – Южный федеральный университет; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; кафедра АиРПУ; аспирант.

Юханов Юрий Владимирович – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru; кафедра АиРПУ; зав. кафедрой; д.т.н.; профессор.

Gubarev Dmitriy Egorovich – Southern Federal University; e-mail: dgubarev@sfedu.ru; the department of A&RPU; Taganrog, Russia; post-graduate student.

Yukhanov Yuriy Vladimirovich – e-mail: yvyuhanov@sfedu.ru; the department of A&RPU; head of department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 617.7; 535.34; 539.211

DOI 10.18522/2311-3103-2021-6-150-159

З.А. Коков, О.А. Молоканов, Л.О. Карданова, М.Р. Кушхов

ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПРОПУСКАНИЯ И ПАРАМЕТРОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ИНТРАОКУЛЯРНЫХ ЛИНЗ

Производители интраокулярных линз постоянно совершенствуют параметры искусственных хрусталиков, функционально приближая их к природному аналогу. В работе проведено экспериментальное исследование ряда важных физико-технических параметров интраокулярных линз ведущих мировых производителей, влияющих на качество зрения оперированных пациентов. Были исследованы спектры пропускания оптического излучения интраокулярных линз в диапазоне 200–800 нм. В коротковолновой части результаты измерений показали высокую эффективность защитных свойств интраокулярных линз от ультрафиолетового излучения. Показано, что излучение с длиной волны до 350 нм полностью поглощается материалом линзы, а пропускание волн с длиной 400 нм составляет 20 %. Далее до длины волны 550 нм наблюдается рост коэффициента пропускания исследуемой интраокулярной линзы до 100 %, после чего плавно снижается к концу видимого диапазона до 85 %. В работе также исследовано влияние качества обработки поверхности интраокулярных линз на вероятность развития вторичной катаракты в отдаленном периоде. Согласно послеоперационной статистике, вероятность возникновения вторичной катаракты достигает 20–35 %. Появление областей оптической непрозрачности обусловлено различными факторами, одним из которых – качество обработки поверхности интраокулярных линз. Гладкость поверхностного профиля линзы зависит от модели, технологии изготовления и материала искусственного хрусталика. Исследование качества обработки поверхности мягких и жестких интраокулярных линз было проведено методом оптико-силовой микроскопии. Анализ результатов сканирования поверхности интраокулярных линз и проведенный статистический анализ 630 клинических случаев возникновения вторичной катаракты в отдаленном послеоперационном периоде (6 месяцев и