

СВЕРХДИАПАЗОННАЯ ПОЛИКОНИЧЕСКАЯ АНТЕННА С ГРАДИЕНТНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛИНЗОЙ

© 2025 г. В. А. Калошин^{a, *}, Нгуен Тхе Тхань^b

^aИнститут радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125007 Российская Федерация

^bМосковский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет),
Институтский пер., 9, Долгопрудный, Московская обл., 141700 Российская Федерация

*E-mail: vak@cplire.ru

Поступила в редакцию 15.05.2024 г.

После доработки 15.05.2024 г.

Принята к публикации 10.06.2024 г.

Предложена и исследована с использованием численного моделирования всенаправленная в одной плоскости поликоническая антенна с торроидальной градиентной диэлектрической анизотропной линзой Микаэляна, которая выполнена в виде набора параллельных соосных дисков из полистирола различной толщины. В результате исследования и оптимизации параметров показано, что оптимизированная поликоническая антенна с линзой согласована и обеспечивает высокую эффективность в полосе частот 40:1. Результаты численного моделирования подтверждены результатами измерений изготовленного макета антенны.

Ключевые слова: сверхширокополосные антенны, сверхдиапазонные антенны, поликоническая антенна, градиентная анизотропная диэлектрическая линза

DOI: 10.31857/S0033849425010025, **EDN:** HJULRT

ВВЕДЕНИЕ

Биконические антенны широко применяются в системах связи и радиомониторинга в качестве сверхдиапазонных (с полосой более 10:1), всенаправленных в горизонтальной плоскости антенн. К числу недостатков биконической антенны относятся относительно большие габариты и наличие провалов коэффициента усиления (КУ) в рабочей полосе частот.

В работе [1] предложена и исследована поликоническая антенна, конструкция которой позволяет уменьшить габариты (при той же полосе рабочих частот) и обеспечить более стабильную величину КУ. При этом поликоническая антенна формирует почти всенаправленную диаграмму направленности (ДН) за исключением области вблизи ее оси. Однако в некоторых приложениях необходимо обеспечить высокую направленность антенны.

Чтобы обеспечить большую направленность и соответственно увеличить КУ в биконических антеннах используют различные типы торроидальных линз: градиентную диэлектрическую [2], металлическую [3] и однородную диэлектрическую [4, 5].

Цель данной работы – исследование поликонической антенны с торроидальной градиентной диэлектрической анизотропной линзой Микаэляна.

1. ПОЛИКОНИЧЕСКАЯ АНТЕННА С ГРАДИЕНТНОЙ ТОРРОИДАЛЬНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЛИНЗОЙ МИКАЭЛЯНА

Рассмотрим поликоническую антенну (рис. 1), которая состоит из двух соосных металлических поликонусов 1 и торроидальной градиентной диэлектрической линзы 2.

Образующая поликонуса имеет вид ломаной линии, линейные участки которой имеют длину l_1, l_2, l_3 и образуют с осью Oz углы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, соответственно. Градиентная диэлектрическая линза выполнена в виде набора параллельных соосных дисков диаметром D различной толщины из полистирола, а ее образующие определяются крайними лучами. Антенна расположена внутри корпуса из полистирола диаметром 101 мм и высотой H . Антенна возбуждается 50-омной коаксиальной линией 3 диаметром 1.4 мм, проходящей через отверстие в нижнем поликонусе, центральный проводник которой соединен с верхним поликонусом.

Решение задачи синтеза анизотропной линзы Микаэляна получено в работе [6] и имеет вид

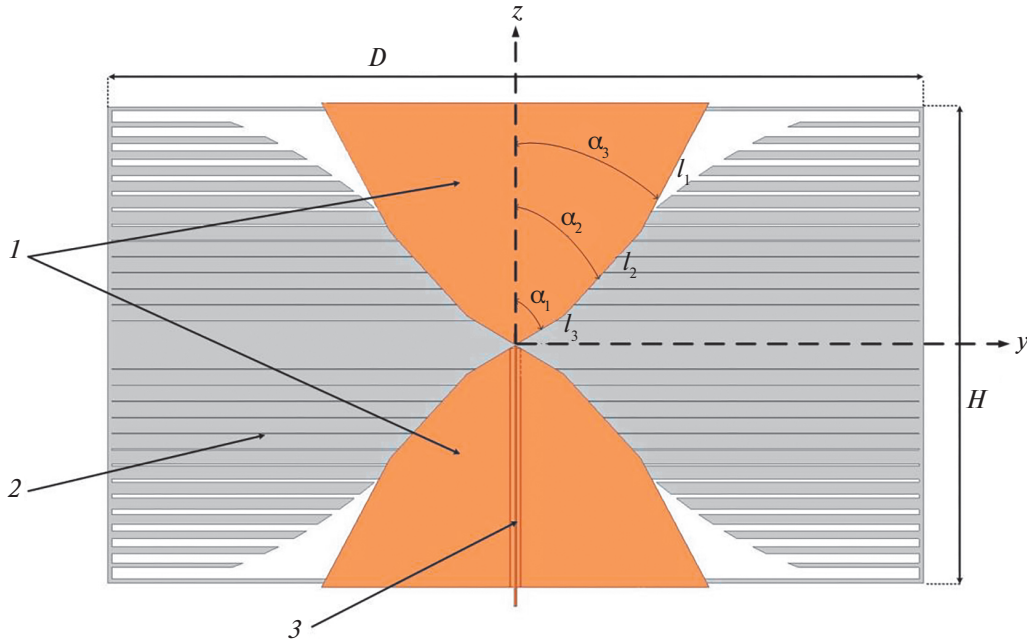


Рис. 1. Сечение поликонической антенны с анизотропной градиентной линзой.

$$n_z = n_0 / \operatorname{ch} \left(\frac{\pi \int_0^z m(t) dt}{2T} \right), \quad (1)$$

где $T = D/2$ – толщина линзы, $m(z) = n_y/n_z$, а n_z, n_y – компоненты тензора коэффициента преломления материала линзы.

Формулу (1) нельзя непосредственно использовать для расчетов компонентов тензора коэффициента преломления, поскольку в правую часть входит неизвестная функция $m(z)$. Преобразуем выражение (1) к виду [6]

$$z = \frac{2Tn_0}{\pi} \int_{n_z}^{n_0} \frac{dn}{n_y \sqrt{n_0^2 - n_z^2}}. \quad (2)$$

Подставляя в (2) компоненты тензора коэффициента преломления периодической слоистой среды в статическом приближении [7]

$$n_y = \sqrt{1 - c + c\epsilon}, \quad n_z = \sqrt{\epsilon / \sqrt{(1 - c)\epsilon + c}}, \quad (3)$$

где c – коэффициент заполнения воздушной среды диэлектриком, равный отношению толщины диэлектрического слоя к периоду, а ϵ – диэлектрическая проницаемость материала слоев, получаем

$$z = \frac{T}{\pi} \int_{n_z(c)}^{n_0} \frac{\sqrt{(\epsilon - 1)\epsilon}}{[(1 - t)\epsilon + t] \sqrt{[(1 - t)\epsilon + t](1 - t)}} dt. \quad (4)$$

Зависимости коэффициента заполнения $c(z)$ и компонентов тензора коэффициента преломления $n_z(z)$ и $n_y(z)$ для $T = 50$ мм и $\epsilon = 2.56$, рассчитанные по формулам (3), (4) для $z > 0$, приведены на рис. 2, 3 соответственно.

Уравнение «необыкновенного» луча в градиентной анизотропной одноосной среде имеет вид [6]

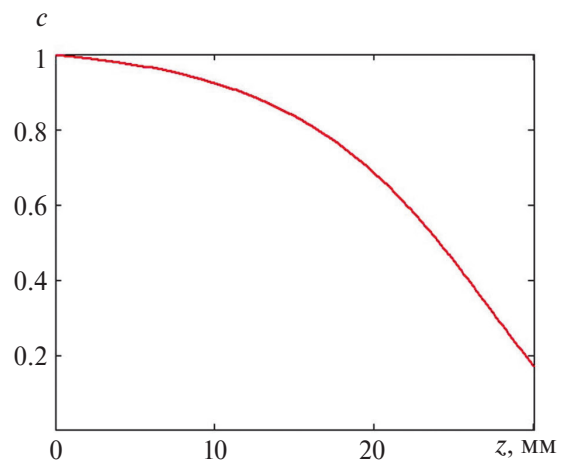


Рис. 2. Зависимость коэффициента заполнения от координаты.

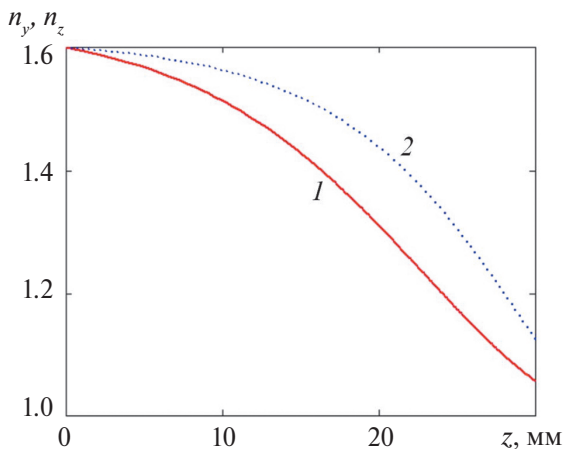


Рис. 3. Зависимости компонент тензора коэффициента преломления от координат: n_z (кривая 1), n_y (кривая 2).

$$y = \int_0^z \frac{Cm(t)}{\sqrt{n_z^2 - C^2}} dt, \quad (5)$$

где $0 \leq C \leq 1.13$ — лучевой параметр. Подставляя в (4) выражения для компонент тензора коэффициента преломления (3), получаем

$$y(c) = \frac{TC}{2\pi} \int_0^{z(c)} \frac{(\epsilon - 1)\sqrt{(\epsilon - 1)\epsilon}}{[(1 - t\epsilon) + t]\sqrt{\epsilon - C^2}[(1 - t)\epsilon + t](1 - t)} dt, \quad (6)$$

где функция $z(c)$ определена в (4). Траектории лучей в линзе, рассчитанные по формулам (4), (6) для $n_0 = 1.6$, $H = 60$ мм, $D = 100$ мм показаны на рис. 4.

Из рисунка видно, что все лучи, входящие в линзу, на выходе из линзы ($y = 50$ мм) оказываются параллельными оси Oy . Крайний луч (с параметром $C = 1.13$) определяет образующую линзы (см. рис. 1).

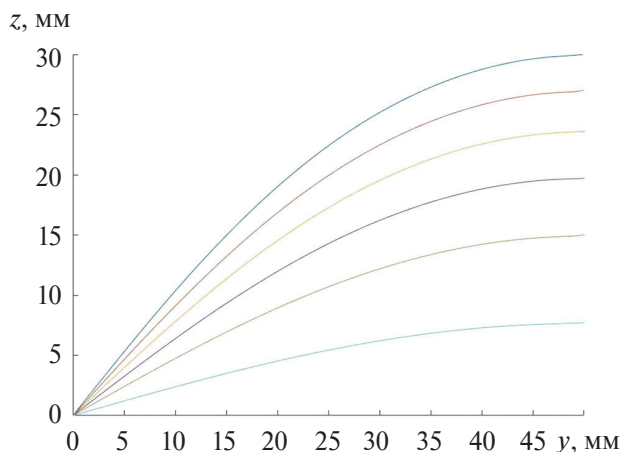


Рис. 4. Траектории лучей в линзе.

2. ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИКОНИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ С ГРАДИЕНТНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ЛИНЗОЙ МИКАЭЛЯНА

Поликоническая антенна с синтезированной градиентной анизотропной линзой Микаэляна в виде набора параллельных соосных дисков из полистирола исследована с использованием электродинамического моделирования методом конечных элементов (МКЭ) в программной среде ANSYS HFSS. В процессе моделирования проводилась оптимизация по параметрам для заданных величин $n_0 = 1.6$, $L = 60$ мм, $D = 100$ мм с целью минимизации нижней частоты полосы согласования антенны по уровню -10 дБ. В результате получены следующие оптимальные значения параметров: $l_1 = 6.77$ мм, $l_2 = 14.1$ мм, $l_3 = 18.1$ мм, $\alpha_1 = 59^\circ$, $\alpha_2 = 42.5^\circ$, $\alpha_3 = 38^\circ$.

Распределение напряженности электрического поля в вертикальном сечении оптимизированной поликонической антенны с линзой, рассчитанное с использованием МКЭ, показано на рис. 5.

Из рисунка видно, как на выходе из линзы формируется цилиндрическая волна.

На рис. 6 приведена фотография экспериментального образца поликонической антенны с оптимизированными параметрами и линзой из 30 параллельных соосных дисков из полистирола.

Толщина дисков приведена в табл. 1.

Частотная зависимость коэффициента отражения (КО) оптимизированной поликонической антенны с линзой, рассчитанная с использованием МКЭ и конечных разностей во временной области (МКРВО) приведена на рис. 7. На этом же рисунке приведены результаты измерений КО макета антенны.

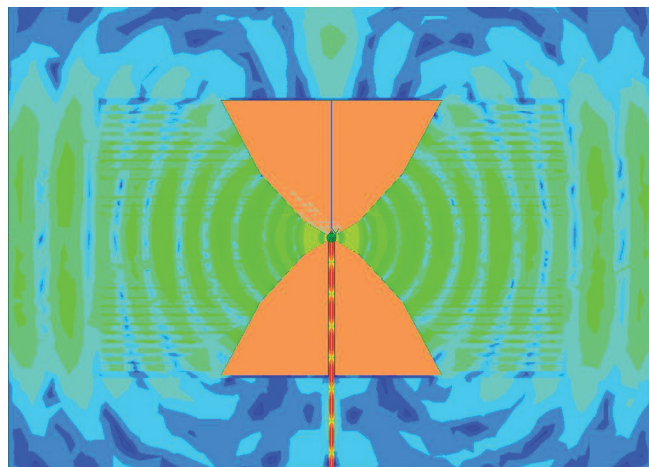


Рис. 5. Распределение поля в вертикальном сечении поликонической антенны с линзой.

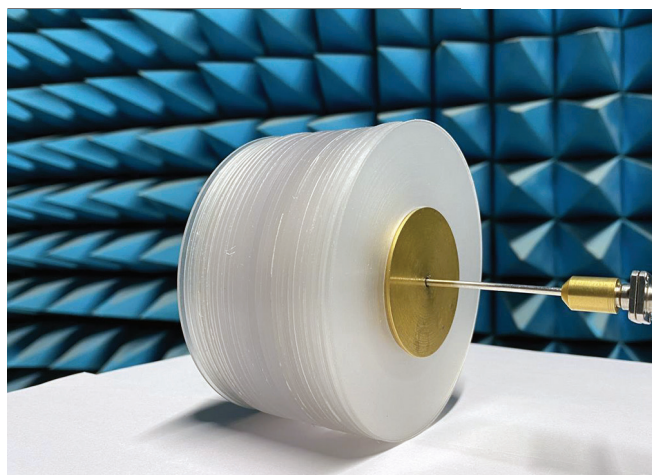


Рис. 6. Макет поликонической антенны с линзой.

Как видно из рисунка, КО антенны в полосе частот 1.5...60 ГГц не превышает уровень -10 дБ.

На рис. 8–10 приведены нормированные ДН в E -плоскости поликонической антенны с линзой, рассчитанные с использованием МКЭ на шести частотах и полученные в результате измерений макеты антенны, а соответствующие зависимости КУ и КИП от частоты показаны на рис. 11 и рис. 12 соответственно.

Величина КИП для всенаправленной в горизонтальной плоскости антенны определялась как отношение КУ антенны к КУ линейного синфазного источника той же высоты с равномерным распределением амплитуды.

В табл. 2 приведены параметры синтезированной и исследованной в данной работе поликонической антенны и биконических антенн с линзами, исследованных в известных работах.

Из табл. 2 видно, что исследованная поликоническая антенна обладает лучшими характеристиками по сравнению с известными биконическими антеннами с линзами.

Таблица 1. Толщина дисков диэлектрической линзы

Номер диска	Толщина, мм	Номер диска	Толщина, мм	Номер диска	Толщина, мм
1, 30	0.30	6, 25	1.33	11, 20	1.79
2, 29	0.54	7, 24	1.46	12, 19	1.83
3, 28	0.77	8, 23	1.57	13, 18	1.87
4, 27	0.97	9, 22	1.67	14, 17	1.90
5, 26	1.16	10, 21	1.73	15, 16	2.00

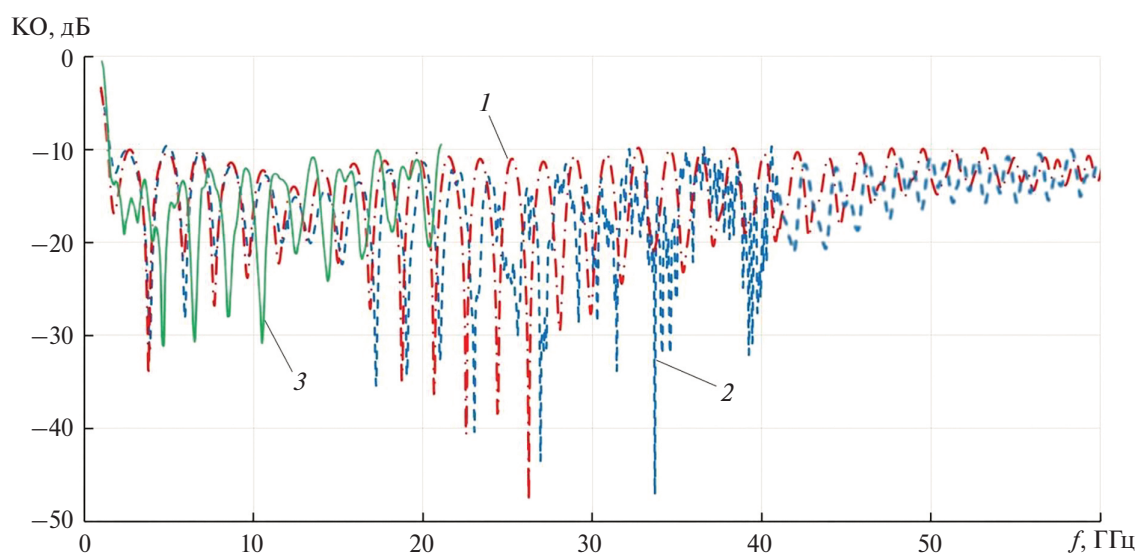


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения (КО) поликонической антенны с линзой от частоты: кривая 1 – расчет с использованием МКРВО, кривая 2 – расчет с использованием МКЭ, кривая 3 – экспериментальные данные.

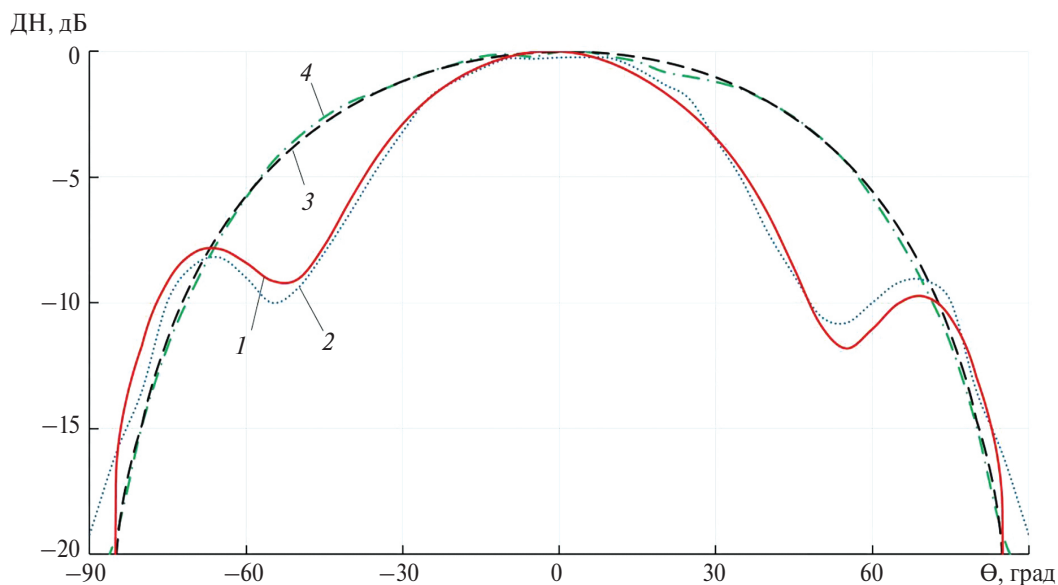


Рис. 8. Нормированные диаграммы направленности поликонической антенны на частотах 2 (кривые 1, 2) и 5 (кривые 3, 4) ГГц. Кривые 1 и 3 – численное моделирование, кривые 2 и 4 – экспериментальные данные.

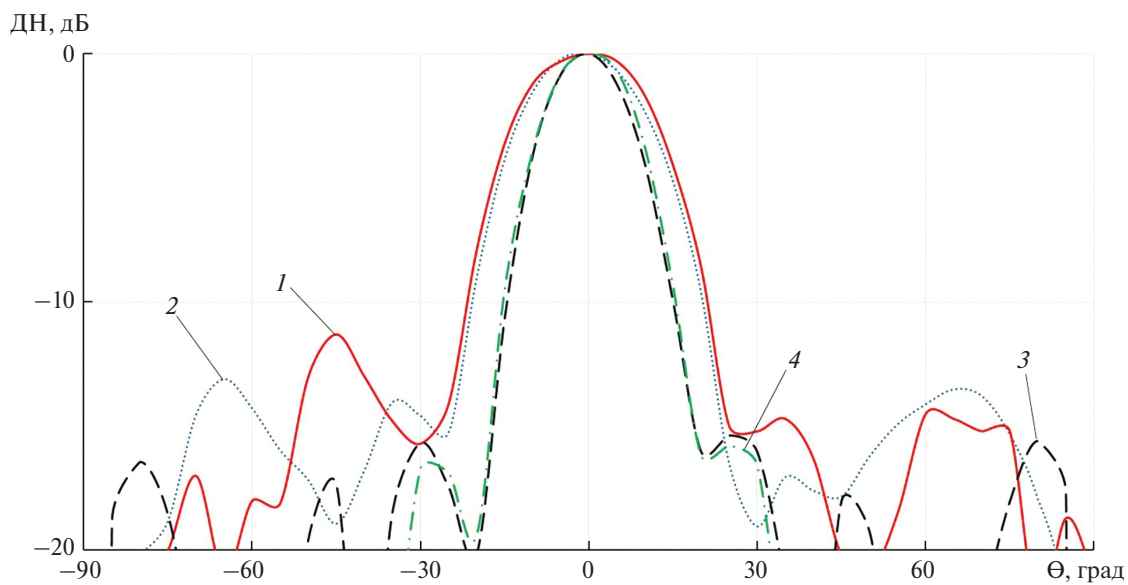


Рис. 9. Нормированные диаграммы направленности поликонической антенны на частотах 10 (кривые 1, 2) и 15 (кривые 3, 4) ГГц. Кривые 1 и 3 – численное моделирование, кривые 2 и 4 – экспериментальные данные.

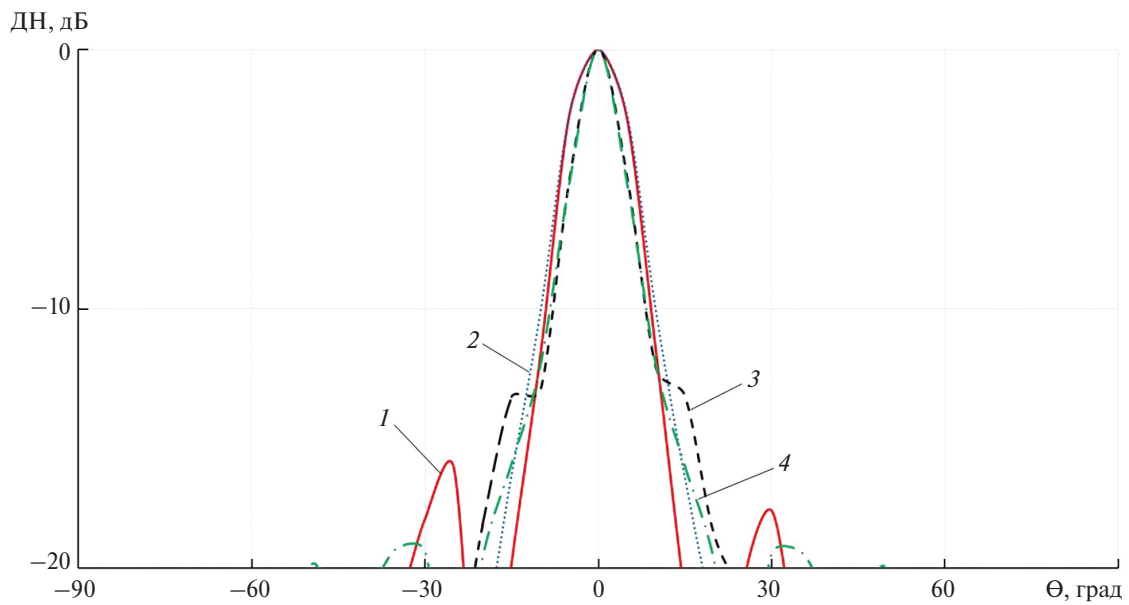


Рис. 10. Нормированные диаграммы направленности поликонической антенны на частотах 25 (кривые 1, 2) и 35 (кривые 3, 4) ГГц. Кривые 1 и 3 – численное моделирование, кривые 2 и 4 – экспериментальные данные.

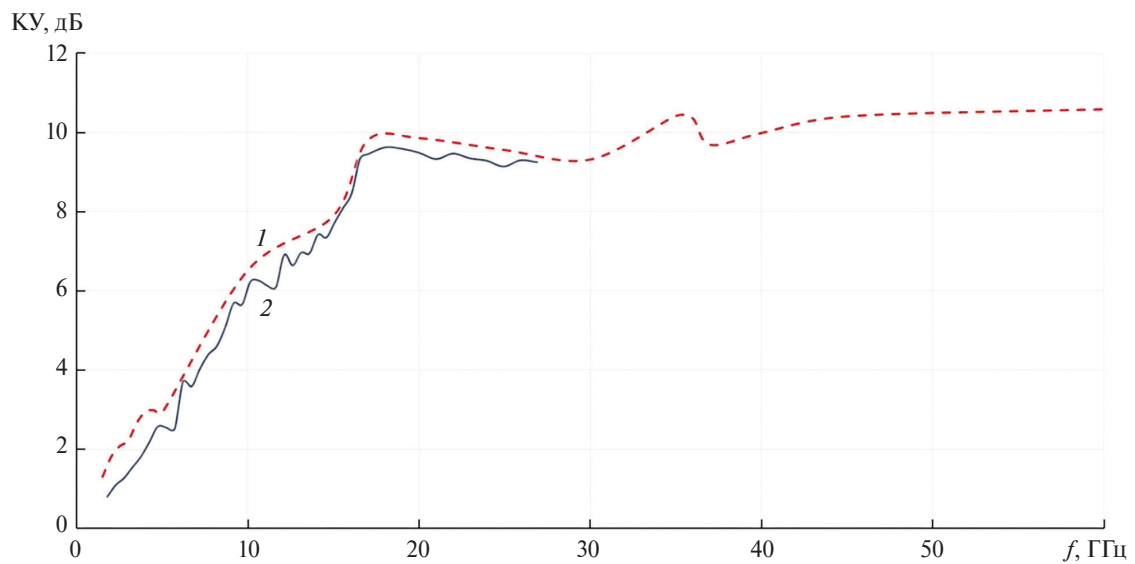


Рис. 11. Зависимость коэффициента усиления поликонической антенны от частоты: кривая 1 – численное моделирование, кривая 2 – экспериментальные данные.

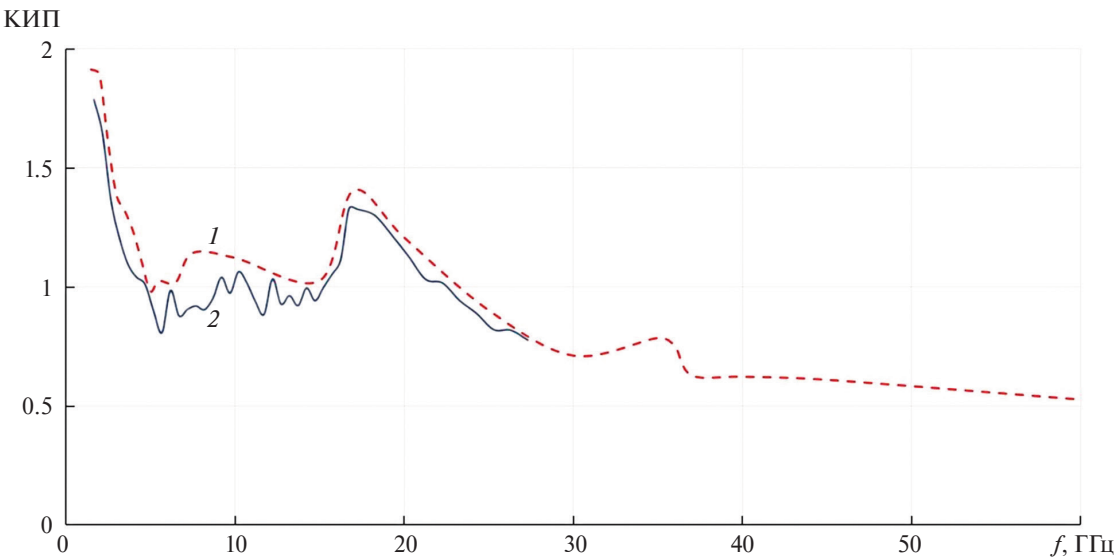


Рис. 12. Зависимость величины КИП поликонической антенны от частоты: кривая 1 – численное моделирование, кривая 2 – экспериментальные данные.

Таблица 2. Параметры поликонической антенны и биконических антенн с линзами

Источник	Полоса частот	Максимальное усиление	КИП
Данная работа	1.5...60 ГГц (190%)	10.6 дБ	0.5...1.85
[2]	0.7...12 ГГц (178%)	10.5 дБ	0.47...1.73
[3]	2...18 ГГц (160%)	7.5 дБ	0.28...1.46
[4]	4...20 ГГц (133%)	9 дБ	0.34...1.55
[5]	26...39 ГГц (40%)	10.4 дБ	0.3...1.49

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1. Разработанная и оптимизированная поликоническая антенна с градиентной диэлектрической анизотропной линзой Микаэляна согласована по уровню –10 дБ в полосе частот 40:1.
- 2. В полосе частот 40:1 поликоническая антенна с линзой обеспечивает величину КИП (всенаправленной в горизонтальной плоскости антенны) более 0.5.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калошин В.А., Мартынов Е.С., Скородумова Е.А. // РЭ. 2011. Т. 56. № 9. С. 1094.
2. Uskov G.K., Smuseva K.V., Seregina E.A., Bobreshov A.M. // 2022 IEEE8th All-Russian Microwave Conference (RMC). Moscow. 23–25 Nov. N.Y.: IEEE, 2022. P. 191.
3. Titan Z., Sievert B., Eube M. et al. // 2022 52th Europ. Microwave Conf. (EuMC). Milan. 27–29 Sept. N.Y.: IEEE, 2022. P. 612.
4. Zhang Z.-Y., Leung K.W., Lu K. // IEEE Trans. 2023. V. AP-71. № 1. P. 58.
5. Dubrovka F.F., Piltyay S., Movchan M., Zakharchuk I. // IEEE Trans. 2023. AP-71. № 4. P. 2922.
6. Калошин В.А. // ДАН. 2016. Т. 470. № 2. С. 253.
7. Рытов С.М. // ЖЭТФ. 1955. Т. 2. № 3. С. 605.

OVER-RANGE POLYCONICAL ANTENNA WITH GRADIENT DIELECTRIC LENS

© 2025 V. A. Kaloshin^{a, *}, Nguyen The Thanh^b

^a *Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS,
Mokhovaya St., 11, build. 7, Moscow, 125007 Russian Federation*

^b *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
Institutsky per. 9, Dolgoprudny, Moscow region, 141700 Russian Federation*

**E-mail: vak@cplire.ru*

Received May 15, 2024; revised May 15, 2024; accepted June 10, 2024

An omnidirectional in one plane polyconical antenna with a torroidal gradient dielectric anisotropic Mikaelian lens, which is made in the form of a set of parallel coaxial disks made of polystyrene of various thicknesses, is proposed and studied using numerical modeling. As a result of the study and optimization of parameters, it was shown that the optimized polyconical antenna with the lens is matched and provides high efficiency in the 40:1 frequency band. The results of numerical modeling are confirmed by the results of measurements of the manufactured antenna prototype.

Keywords: ultra-wideband antennas, over-band antennas, polyconical antenna, gradient anisotropic dielectric lens