



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.7>

УДК: 629.374

ПОЛИКОНИЧЕСКИЕ ЛИНЗОВЫЕ АНТЕННЫ С АНИЗОТРОПНЫМИ ЛИНЗАМИ

Буи Туан Кхан ², В.А. Калошин ¹, Фам Конг Уан ²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Москва, ул. Моховая, 11, стр. 7

² Московский физико-технический институт
(Национальный исследовательский университет),
141700, Долгопрудный, Институтский пер., 9

Статья поступила в редакцию 18 июня 2026 г.

Аннотация. Решены задачи синтеза однородных анизотропных линз с одной и двумя преломляющими поверхностями. С использованием численного моделирования проведены исследования характеристик согласования и излучения поликонических антенн с синтезированными линзами. Показана возможность сверхдиапазонного режима работы (с полосой рабочих частот более 10:1) при минимальных габаритах антенны.

Ключевые слова: поликоническая антенна, линзовая антенна, сверхдиапазонная антенна.

Финансирование: Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания.

Автор для переписки: Калошин Вадим Анатольевич, kaloshin.v@mail.ru

Введение

Всенаправленные в горизонтальной плоскости антенны получили широкое применение в системах связи, позиционирования и радиомониторинга. При их разработке остаются актуальными задачи расширения полосы рабочих частот и повышение коэффициента усиления. Самыми широкополосными в этом классе антенн являются биконические и поликонические антенны. Для повышения коэффициента усиления в этих антеннах используются линзы различного типа [1-7]. Наилучшие результаты, как по ширине рабочей полосы, так и по эффективности формирования диаграммы направленности, получены для поликонической антенны с однородной изотропной линзой с одной преломляющей поверхностью [6]. Недостатком полученного в этой работе решения являются большие габариты антенны. Кроме того, в полученном решении использована линза с относительно небольшой диэлектрической проницаемостью и при ее изготовлении возникает проблема реализации такого диэлектрика с высокой степенью однородности. Пеноматериалы высокую степень однородность не обеспечивают. Одним из наиболее простых способов обеспечить высокую степень однородности при небольшой диэлектрической проницаемости материала является использование искусственных диэлектриков на основе одномерно периодических диэлектрических структур. При этом следует учитывать, что такие структуры обладают анизотропией.

Целью данной работы является исследование возможности уменьшения габаритов поликонических линзовых антенн при заданной нижней границе рабочей полосы частот при использовании однородных анизотропных линз.

Степень уменьшения габаритов оценивается по критерию минимума коэффициента использования размера (КИР), равного отношению радиуса сферы Чу для полубесконечной полосы частот [8] к радиусу описанной вокруг антенны сферы.

1. Поликонические антенны с однородной одноповерхностной линзой

В первом варианте антенны в качестве фокусирующего элемента используется однородная анизотропной одноповерхностная линза торродальной формы из соосных диэлектрических дисков (Рис. 1). Радиус линзы обозначим T , высоту H . Антенна возбуждается 50-омной коаксиальной линией диаметром 1.34, проходящей через отверстие в нижнем поликонусе, центральный проводник которой соединен с верхним поликонусом. Здесь и далее все размеры в миллиметрах.

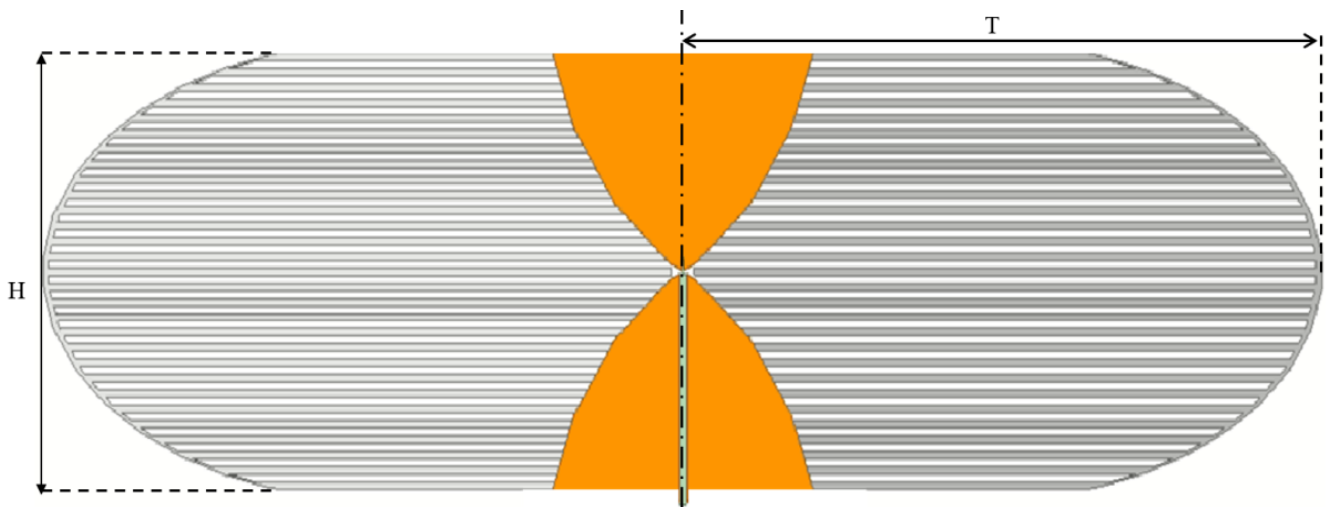


Рис. 1. Сечение поликонической антенны с однородной анизотропной одноповерхностной линзой формы из соосных диэлектрических дисков.

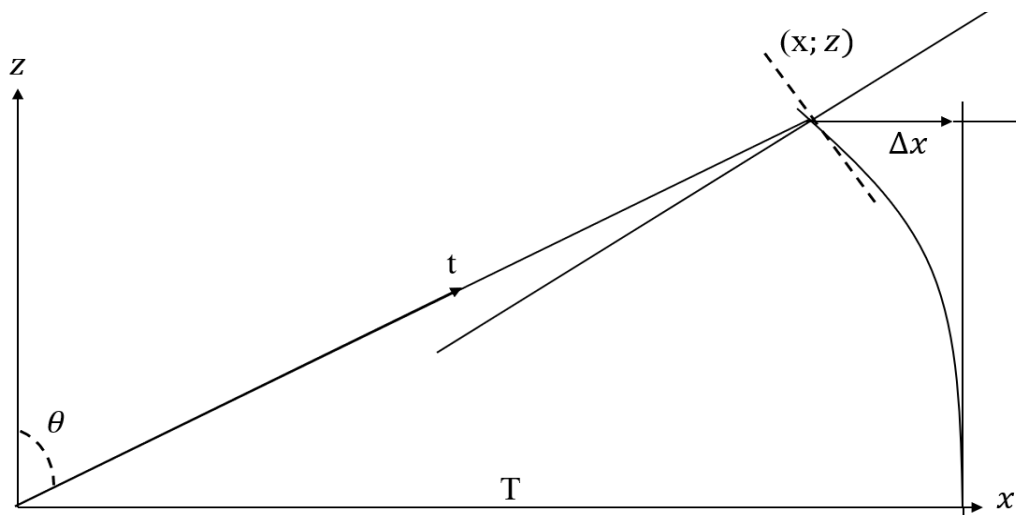


Рис.2. К синтезу образующей линзы.

Рассмотрим задачу синтеза образующей торроидальной линзы. Пусть на поверхность линзы падает луч, выходящий из фокуса в начале координат под

углом θ к оси Z (рис. 2). Для нахождения формы образующей линзы приравняем эйконал этого луча эйконалу центрального луча:

$$T\sqrt{\varepsilon_x} = tn(\theta) + \Delta x, \quad (1)$$

где t – длина луча внутри линзы, $\Delta x = T - t \sin \theta$ – расстояние от точки выхода луча из линзы до апертуры ($x = T$), а $n(\theta)$ – коэффициент преломления в одноосной анизотропной среде [9]

$$n(\theta) = \sqrt{\frac{\varepsilon_x \varepsilon_z}{\varepsilon_x (\cos \theta)^2 + \varepsilon_z (\sin \theta)^2}}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_z$ – компоненты тензора диэлектрической проницаемости, θ – угол между лучом и осью тензора Z .

Из уравнения (1) следует

$$t = \frac{T(\sqrt{\varepsilon_x} - 1)}{n(\theta) - \sin \theta}. \quad (3)$$

При заданной высоте линзы H можно определить минимальный угол θ_m , который соответствует минимальному радиусу линзы T_m . Этот угол находится из условия полного внутреннего преломления $n(\theta_m) \sin \theta_m = 1$. При этом минимальный радиус линзы

$$T_m = \frac{H}{2(\sqrt{\varepsilon_x} - 1)} \operatorname{ctg} \theta_m = \frac{H}{2(\sqrt{\varepsilon_x} - 1)} \sqrt{\frac{\varepsilon_z(\varepsilon_x - 1)}{\varepsilon_x}}. \quad (4)$$

Подставляя выражение для T_m в формулу (3), находим координаты образующей линзы в параметрической форме

$$\begin{aligned} x &= \frac{T_m(\sqrt{\varepsilon_x} - 1) \sin(\theta)}{n(\theta) - \sin(\theta)} \\ z = x \tan(\theta) &= \frac{T_m(\sqrt{\varepsilon_x} - 1) \cos(\theta)}{n(\theta) - \sin(\theta)}, \end{aligned} \quad (5)$$

где параметр θ меняется от 53.6° до $\pi/2$. Формулы для компонент тензора диэлектрической проницаемости периодической слоистой среды в статическом приближении имеют вид [10]

$$\varepsilon_x = \frac{\varepsilon_d}{(1-c)\varepsilon_d + c} \varepsilon_z = 1 - c + c\varepsilon_d, \quad (6)$$

где ε_d – диэлектрическая проницаемость материала слоев, $c = b/a$ – коэффициент заполнения, равный отношению толщины диэлектрического слоя b к периоду расположения дисков a . Подставляя в формулу (6) $\varepsilon_d = 2.56$, $a = 2$, $b = 1$, находим $\varepsilon_x = 1.44$ и $\varepsilon_z = 1.78$. Подставляя эти величины в формулу (2), находим зависимость $n(\theta)$. Подставляя эту зависимость в формулу (4), находим $T_m = 110$. Подставляя $n(\theta)$ и T_m в формулу (5), находим координаты точек образующей как функции параметра θ .

Далее с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и конечных разностей во временной области (МКРВО) был проведен анализ и оптимизация параметров поликонической антенны с синтезированной линзой с целью реализации минимального значения минимальной частоты согласования, соответствующей максимальному значению величины КИР. Сечение поликонической антенны с оптимизированными параметрами приведено на рис. 3. Высота линзы здесь и далее равна высоте поликонической антенны $H = 60$.

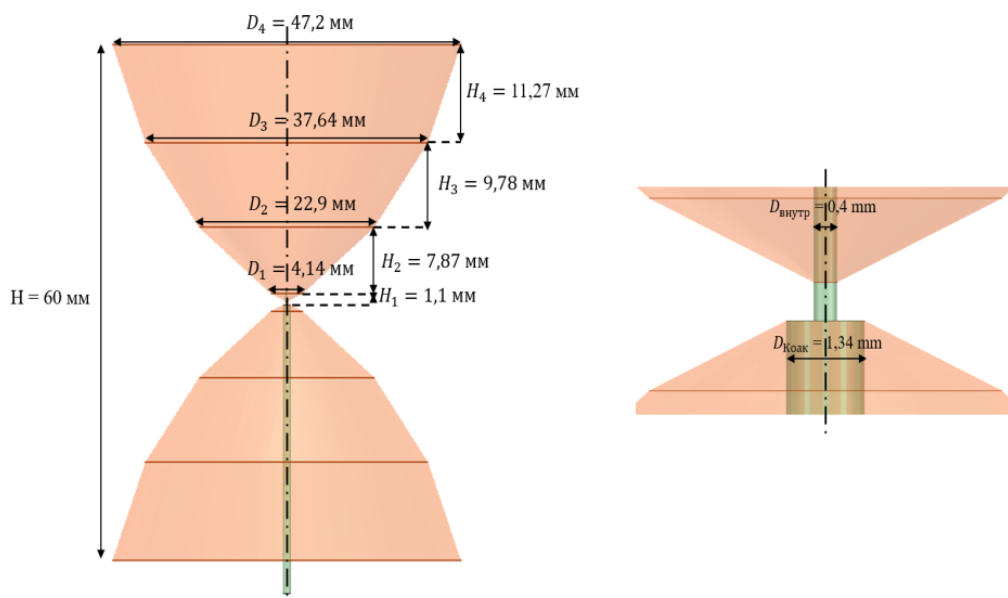


Рис. 3. Сечение оптимизированной поликонической антенны.

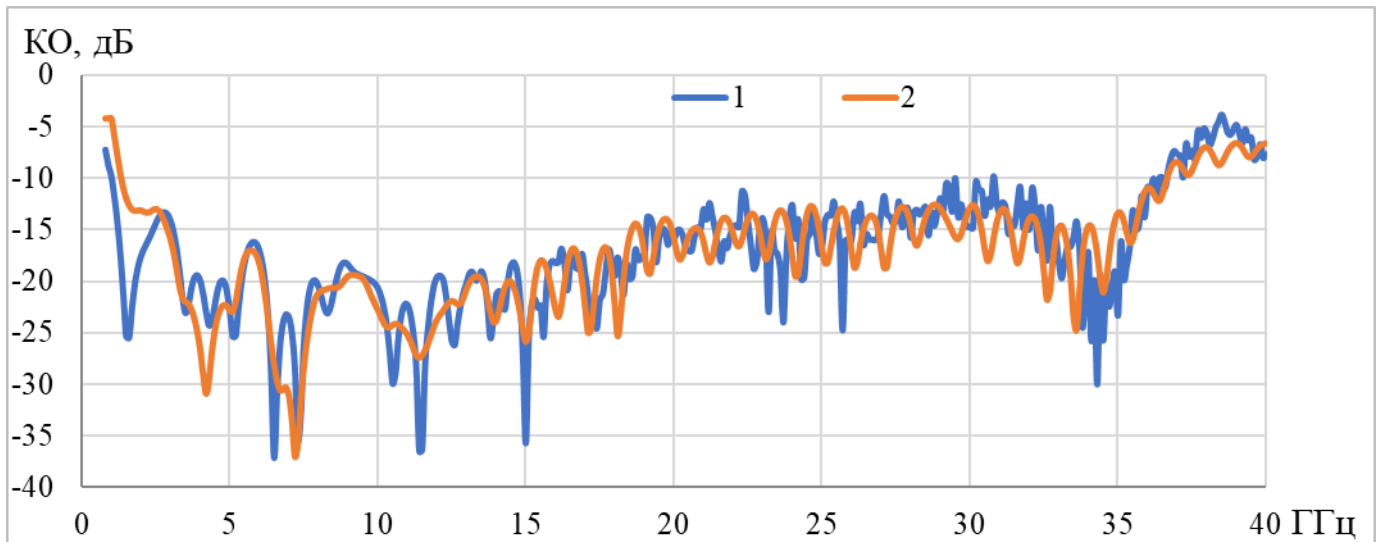


Рис. 4. Зависимость от частоты коэффициента отражения от входа антенны с однородной анизотропной одноповерхностной линзой из соосных диэлектрических дисков: МКЭ (1), МКРВО (2).

Результаты исследования коэффициента отражения (КО) от входа поликонической линзовой антенны в зависимости от частоты показаны на рис. 4. Как видно на рисунке, среднее значение КО антенны в полосе частот 1.14...37 ГГц не превышает уровень -10 дБ.

Рассчитанные с использованием МКЭ диаграммы направленности (ДН) в E -плоскости на 5 частотах, представлены на рис. 5, а частотные зависимости коэффициента усиления (КУ) и величины эффективности ($\mathcal{E}$), равной отношению КУ к КУ линейного источника высотой $H = 60$ с равномерным распределением амплитуды и фазы, рассчитанные с использованием МКРВО в полосе согласования антенны, приведены на рис. 6.

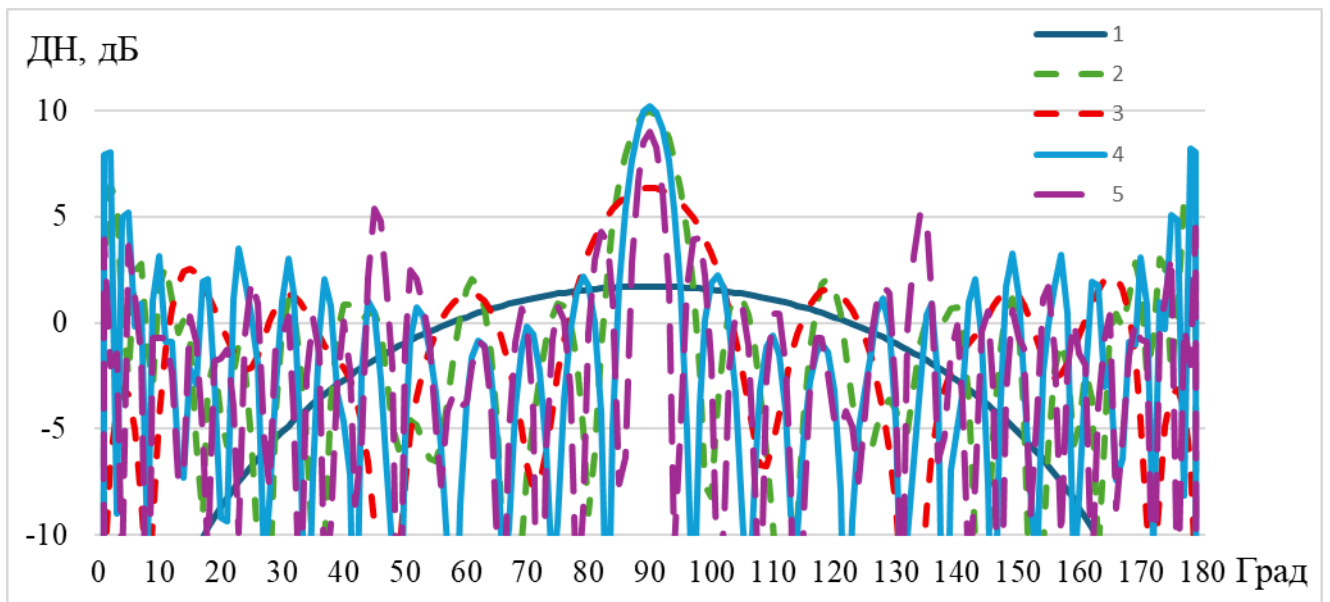


Рис. 5. Диаграммы направленности на частоте 1.5 (1), 10 (2), 20 (3), 30 (4) и 40 ГГц (5).

На рис. 6 видно, что поликоническая антенна с однородной анизотропной одноповерхностной линзой из соосных диэлектрических дисков обеспечивает наибольшую максимальную величину $KУ = 11,2$ дБ на частоте 32 ГГц и минимальное значение эффективности $\mathcal{E} = 0.62$ на частоте 37 ГГц.

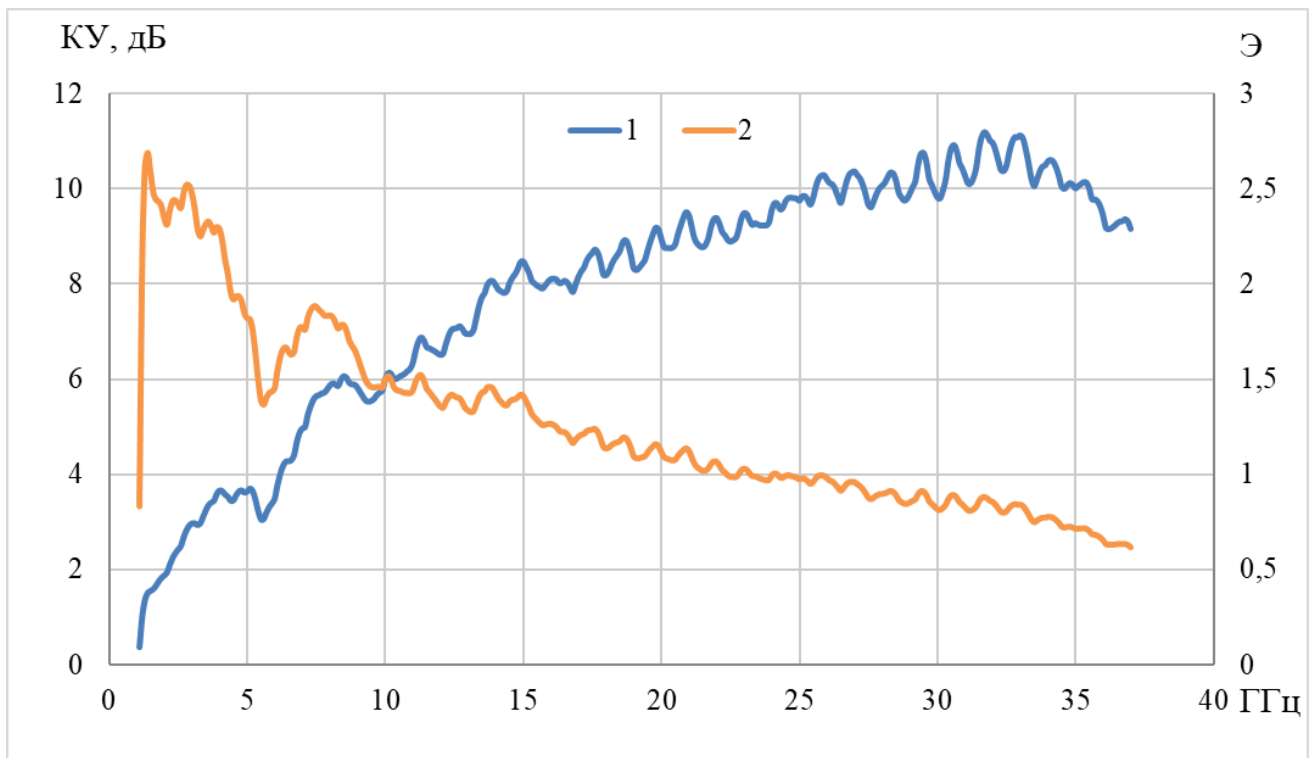


Рис. 6. Зависимость от частоты коэффициента усиления (1) и эффективности (2) антенны с однородной анизотропной одноповерхностной линзой из соосных диэлектрических дисков.

Далее был исследован вариант антенны с однородной анизотропной одноповерхностной торроидальной линзой из соосных диэлектрических цилиндров (рис. 7). Решение задачи синтеза для образующей этой линзы по-прежнему определяется формулой (5) при замене компонент тензора диэлектрической проницаемости ϵ_x на ϵ_z , и ϵ_z на ϵ_x . В отличие от первого варианта в этом случае величина $T_m = 70$.

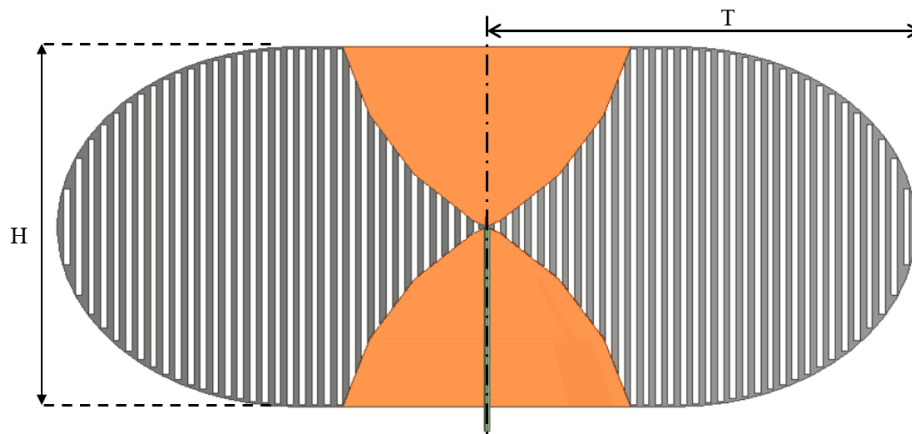


Рис. 7. Сечение поликонической антенны с однородной анизотропной одноповерхностной линзой из цилиндров.

Затем с использованием МКЭ и МКРВО был проведен анализ и оптимизация параметров антенны с синтезированной линзой с целью реализации максимального значения КИР. В результате были найдены значения параметров $H_1 = 0.98$, $H_2 = 7.77$, $H_3 = 9.89$, $H_4 = 11.36$, $D_1 = 4.2$, $D_2 = 22.7$, $D_3 = 36.58$, $D_4 = 44.84$.

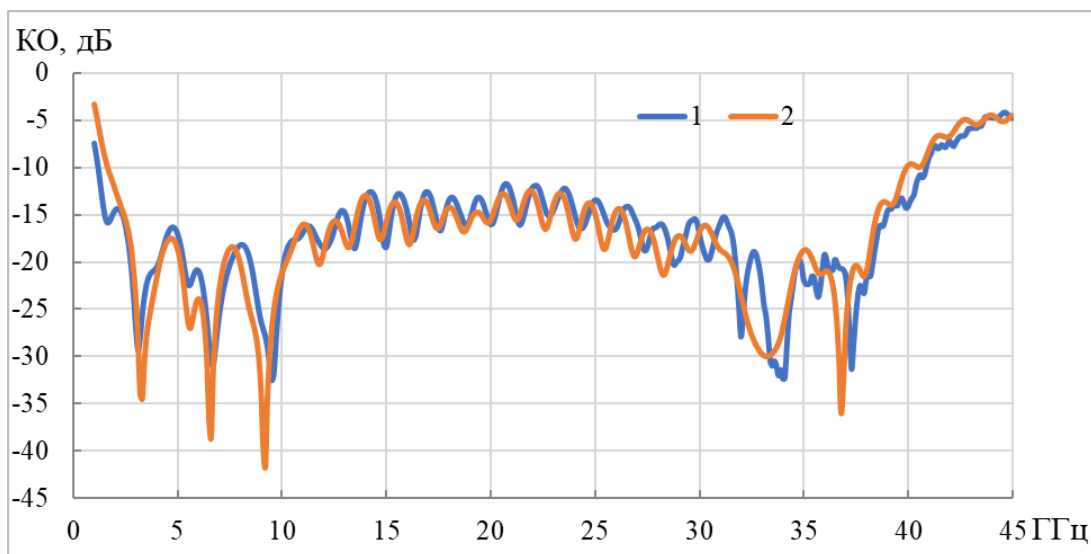


Рис. 8. Зависимость от частоты коэффициента отражения антенны с однородной анизотропной одноповерхностной линзой из цилиндров: МКЭ (1), МКРВО (2).

Результаты исследования КО от входа поликонической линзовой антенны в зависимости от частоты показаны на рис. 8. Как видно на рисунке, среднее значение КО антенны, вычисленное двумя методами в полосе частот 1.40...41 ГГц не превышает уровень -10 дБ.

Рассчитанные с использованием МКЭ ДН в Е-плоскости на 5 частотах представлены на рис. 9, а частотные зависимости, КУ и Э, рассчитанные с использованием МКРВО, показаны на рис. 10.

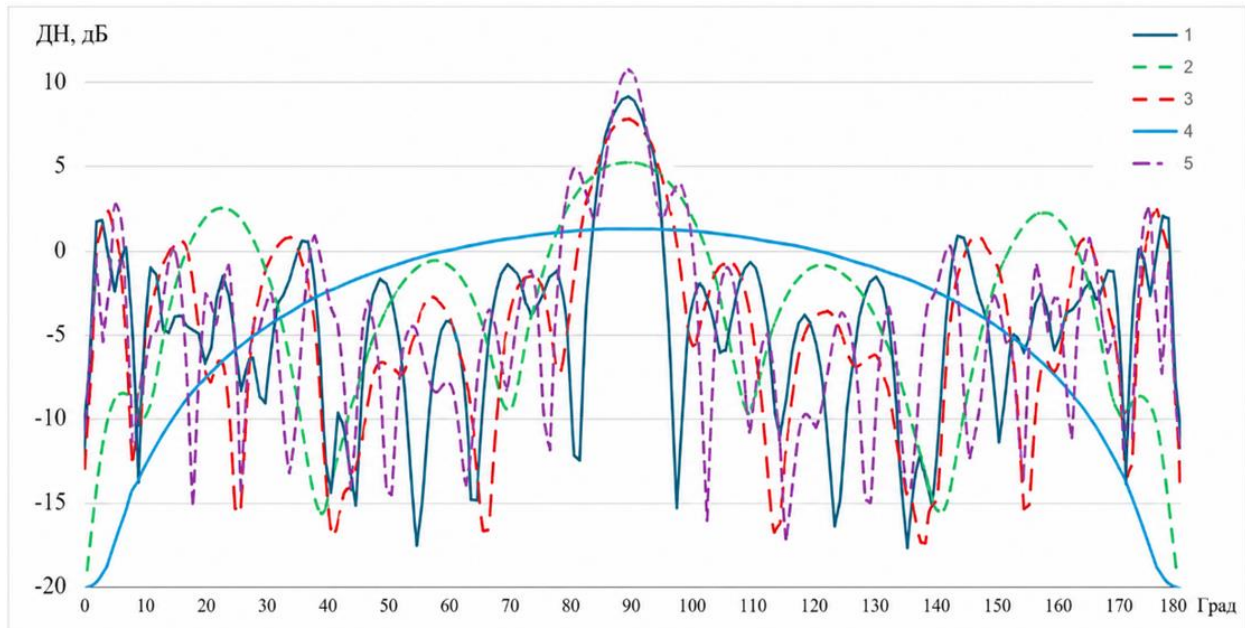


Рис. 9. Диаграммы направленности на частоте 1.5 (1), 10 (2), 20 (3) 30 (4), 40 ГГц (5).

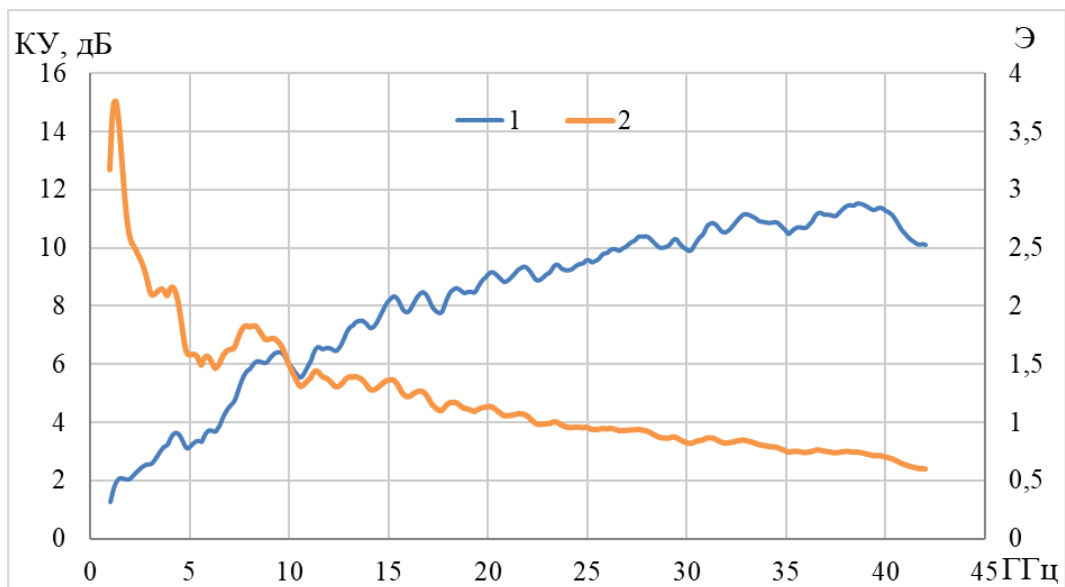


Рис. 10. Зависимости от частоты коэффициента усиления (1) и эффективности (2) антенны с однородной анизотропной одноповерхностной линзой из диэлектрических цилиндров

На рис. 10 видно, что поликоническая антенна с с однородной анизотропной одноповерхностной линзой из соосных диэлектрических цилиндров обеспечивает наибольшую максимальную величину $KY = 11.6$ дБ (на частоте 37 ГГц) и минимальный значение эффективности $\mathcal{E} = 0.64$ (на частоте 41 ГГц).

2. Поликонические антенны с однородной двухповерхностной линзой

В данном разделе синтезированы и исследованы поликонические антенны с однородными двухповерхностными линзами (рис. 11). В этом случае одна из образующих линзы может быть задана. Будем задавать образующую внешней поверхности линзы виде окружности с центром в начале координат.

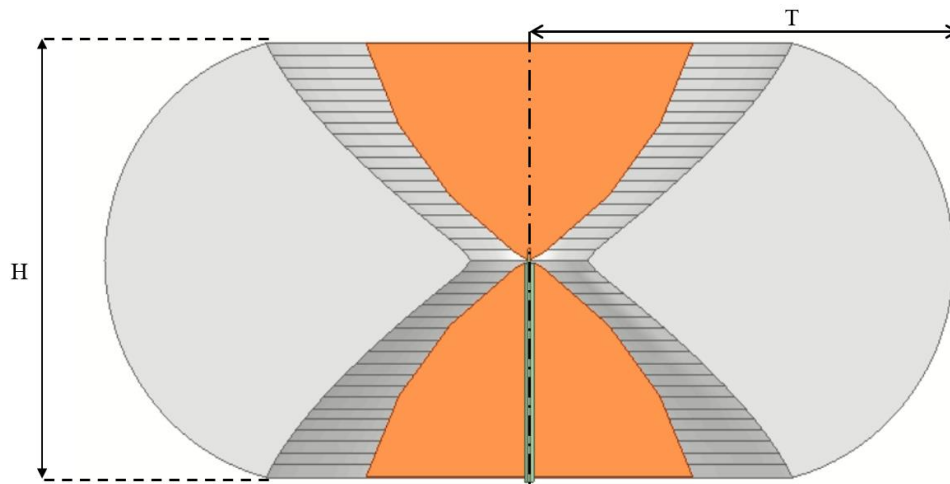


Рис. 11. Сечение поликонической антенны с однородной двухповерхностной линзой.

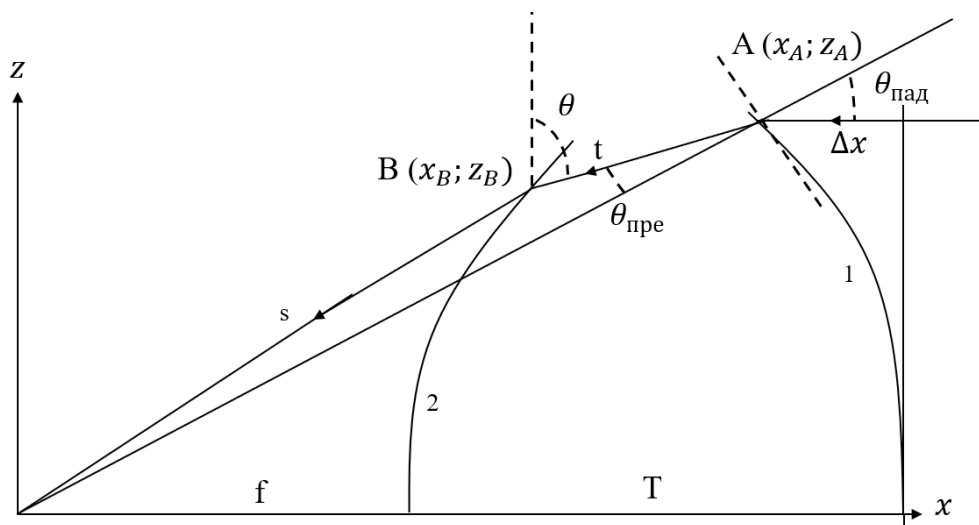


Рис. 12. К синтезу образующей двухповерхностной линзы.

Синтезируем образующую внутренней поверхности однородной изотропной двухповерхностной линзы со сферической внешней поверхностью. Пусть в точку A первой (внешней) образующей линзы падает луч, параллельный оси X под углом $\theta_{\text{пад}}$ к нормали (рис. 12). Падающий луч преломляется под углом $\theta_{\text{пре.}}$, проходит внутри линзы, преломляется в точке B второй (внутренней) образующей и проходит через фокус (начало координат). Для нахождения образующей второй поверхности линзы приравняем эйконал этого луча эйконалу центрального луча:

$$f + Tn = s + tn + \Delta x, \quad (7)$$

где n – коэффициент преломления в линзе, t – длина луча внутри линзы, s – длина луча от точки B до фокуса линзы, $\Delta x = f + T - x_A$ – расстояние от апертуры до первой поверхности линзы. С учетом соотношений $z_B = x_A - t \cos \theta$

и $x_B = x_A - t \sin \theta$, где $\theta = \frac{\pi}{2} - \theta_{\text{пад}} + \theta_{\text{пре.}}$ – угол между лучом внутри линзы и осью

Z и закона Снеллиуса $n \sin \theta_{\text{пре.}} = \sin \theta_{\text{пад}}$ из уравнения (7) нетрудно получить

$$t = \frac{n(Tn-1) + K \left[(n^2+1) \sin \theta - 2n \right] + \sqrt{\left[T(n-1) - K(n^2+1-2n \sin \theta) \right]^2 + K(f+T)^2 (\cos \theta)^2}}{n^2-1}. \quad (8)$$

При этом координаты второй образующей в параметрической форме имеют вид

$$\begin{aligned} x_B &= (f+T) / \sqrt{n^2 - 2n \sin \theta + 1} (n \sin \theta - 1) - t \sin \theta \\ z_B &= (f+T) / \sqrt{n^2 - 2n \sin \theta + 1} \cos \theta - t \cos \theta \end{aligned} \quad (9)$$

Далее с использованием МКЭ и МКРВО был проведен анализ и оптимизация параметров антенны с синтезированной линзой с целью реализации максимального значения КИР. В результате для диэлектрической проницаемости линзы $\varepsilon_d = 1.5$ были найдены значения параметров $H_1 = 0.98$, $H_2 = 7.77$, $H_3 = 9.55$, $H_4 = 11.34$, $D_1 = 4.2$, $D_2 = 22.72$, $D_3 = 36.6$, $D_4 = 44.86$, $T = 51$.

Результаты исследования КО от входа поликонической линзовой антенны в зависимости от частоты, рассчитанного с использованием МКЭ и МКРВО, показаны на рис. 13. Как видно на рисунке, среднее значение КО антенны,

вычисленное двумя методами, в полосе частот 1.40...70 ГГц не превышает уровень -10 дБ.

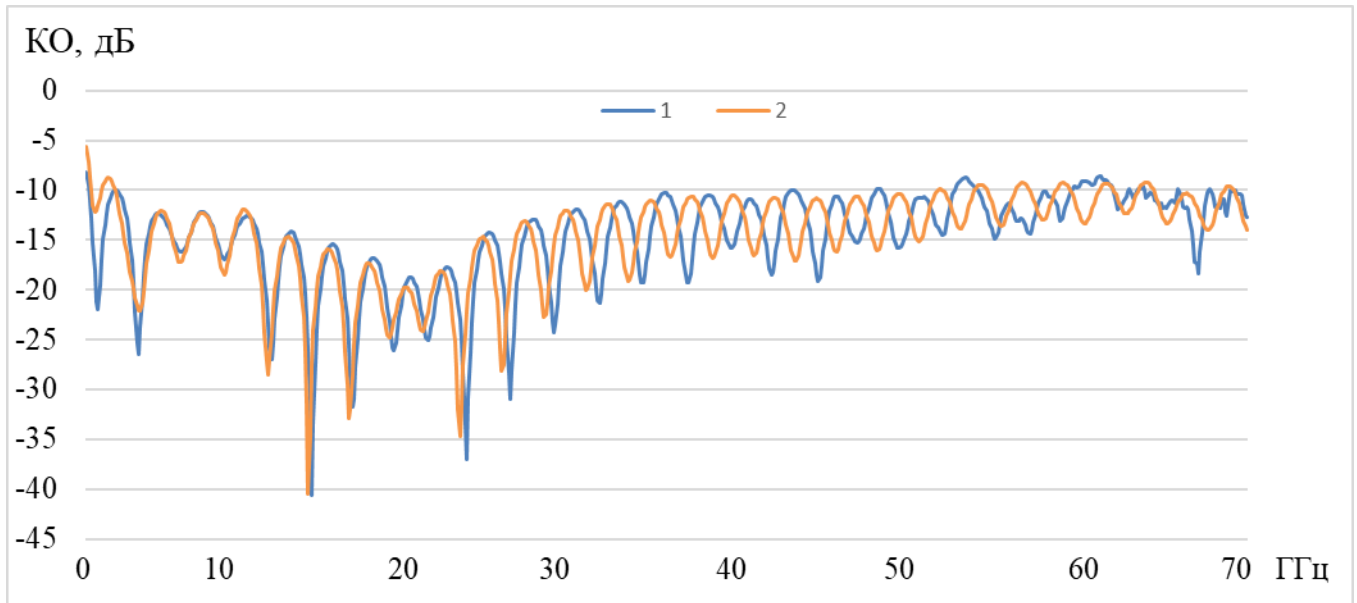


Рис. 13. Зависимость от частоты коэффициента отражения антенны с однородной двухповерхностной изотропной линзой: МКЭ (1), МКРВО (2).

ДН, рассчитанные с использованием МКЭ на 5 частотах, представлены на рис. 14, а частотные зависимости КУ и Э, рассчитанные с использованием МКРВО, показаны на рис. 15.

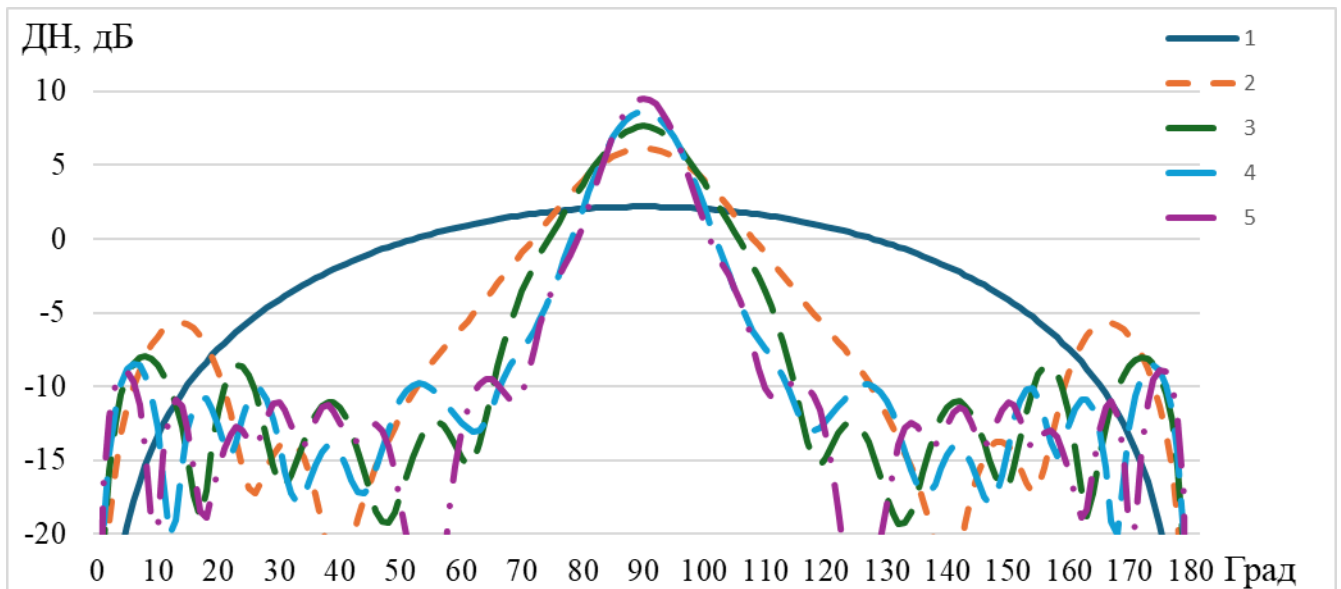


Рис. 14. Диаграммы направленности на частотах 1.5 (1), 15 (2), 25(3), 35(4), 45 ГГц (5).

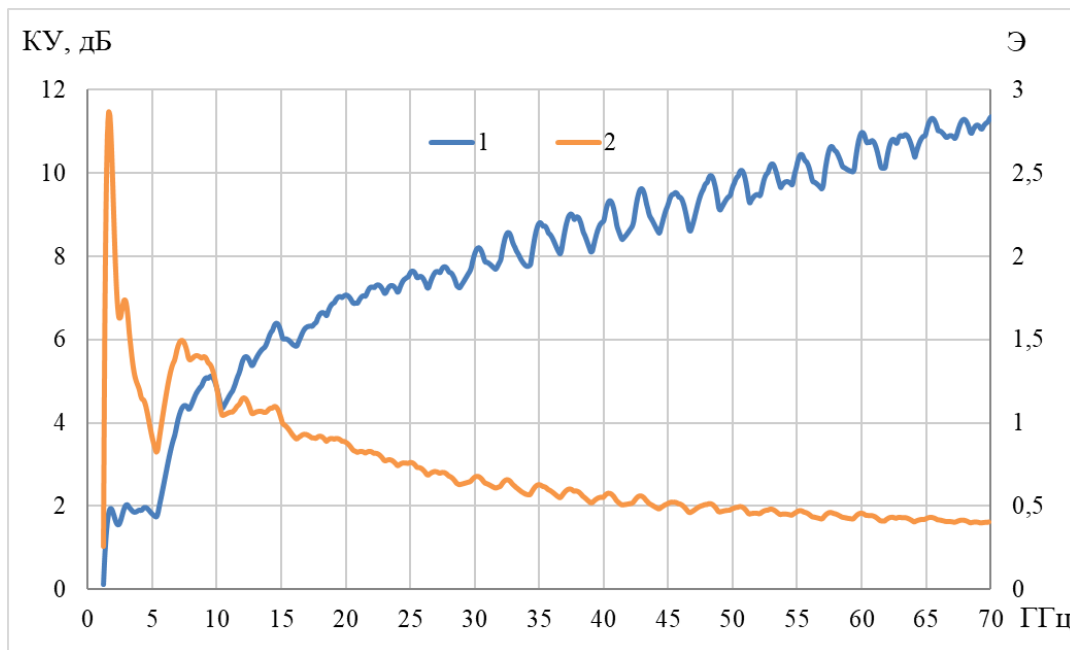


Рис. 15. Зависимость от частоты коэффициента усиления (1) и эффективности (2) антенны с однородной изотропной двухповерхностной линзой.

На рисунке 15 видно, что поликоническая антенна с однородной изотропной двухповерхностной линзой обеспечивает максимальную величину $KУ = 11.3$ дБ и минимальное значение эффективности 0.4.

Рассмотрим далее вариант поликонической линзовой антенны с двухповерхностной анизотропной линзой из диэлектрических дисков со сферической внешней поверхностью (рис 16).

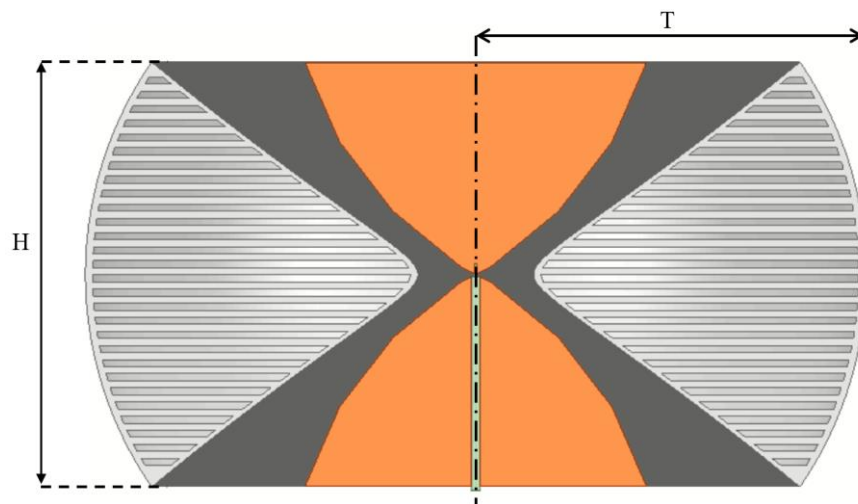


Рис. 16. Сечение антенны с однородной анизотропной двухповерхностной сферической линзой из соосных диэлектрических дисков.

Условие равенства эйконалов лучей в этом случае по-прежнему имеет вид (7).

Для определения зависимости коэффициента преломления от угла θ (2) используем формулы (6) для компонентов тензора диэлектрической проницаемости. Поставляя эту зависимость в закон Снеллиуса, получаем уравнение, из которого находим синус угла преломления

$$\sin \theta_{\text{пре}} = \frac{-C + \sqrt{C^2 - AB}}{\sqrt{A^2 + \left(-C + \sqrt{C^2 - AB}\right)^2}}, \quad (10)$$

где $A = \varepsilon_x \varepsilon_z - \varepsilon_z \sin^2 \theta_{\text{пад}} \cos^2 \theta_{\text{пад}} - \varepsilon_x \sin^4 \theta_{\text{пад}}$, $B = -\varepsilon_z \sin^4 \theta_{\text{пад}} - \varepsilon_x \sin^2 \theta_{\text{пад}} \cos^2 \theta_{\text{пад}}$,
 $C = (\varepsilon_z - \varepsilon_x) \sin^3 \theta_{\text{пад}} \cos \theta_{\text{пад}}$

Из геометрии на рис. 12 следует

$$\theta = \pi / 2 + \arcsin \frac{-C + \sqrt{C^2 - AB}}{\sqrt{A^2 + \left(-C + \sqrt{C^2 - AB}\right)^2}} - \theta_{\text{пад}}. \quad (11)$$

Поставляя формул (10), (11) в формулу (7), находим координаты образующей второй поверхности x_B и y_B ,

$$\begin{aligned} x_B &= K(n(\theta) \sin \theta - 1) - F \sin \theta \\ z_B &= K n(\theta) \cos \theta - F \cos \theta \end{aligned}, \quad (12)$$

где

$$F = \frac{n(\theta)(Tn(\theta) - 1) + K \left[(n(\theta)^2 + 1) \sin \theta - 2n(\theta) \right] + \sqrt{\left[T(n(\theta) - 1) - K(n(\theta)^2 + 1 - 2n(\theta) \sin \theta) \right]^2 + K(\cos \theta)^2}}{n(\theta)^2 - 1},$$

$$K = (f + T) / \sqrt{n(\theta)^2 - 2n(\theta) \sin \theta + 1}.$$

Далее были проведены анализ и оптимизация параметров антенны с синтезированной линзой с использованием МКЭ и МКРВО с целью максимизации величины КИР. В результате, для диэлектрической проницаемости линзы $\varepsilon_d = 1.5$ были найдены значения параметров $H_1 = 0.95$, $H_2 = 7.72$, $H_3 = 9.91$, $H_4 = 11.42$, $D_1 = 4.28$, $D_2 = 23.32$, $D_3 = 37.74$, $D_4 = 46.52$, $T = 56$.

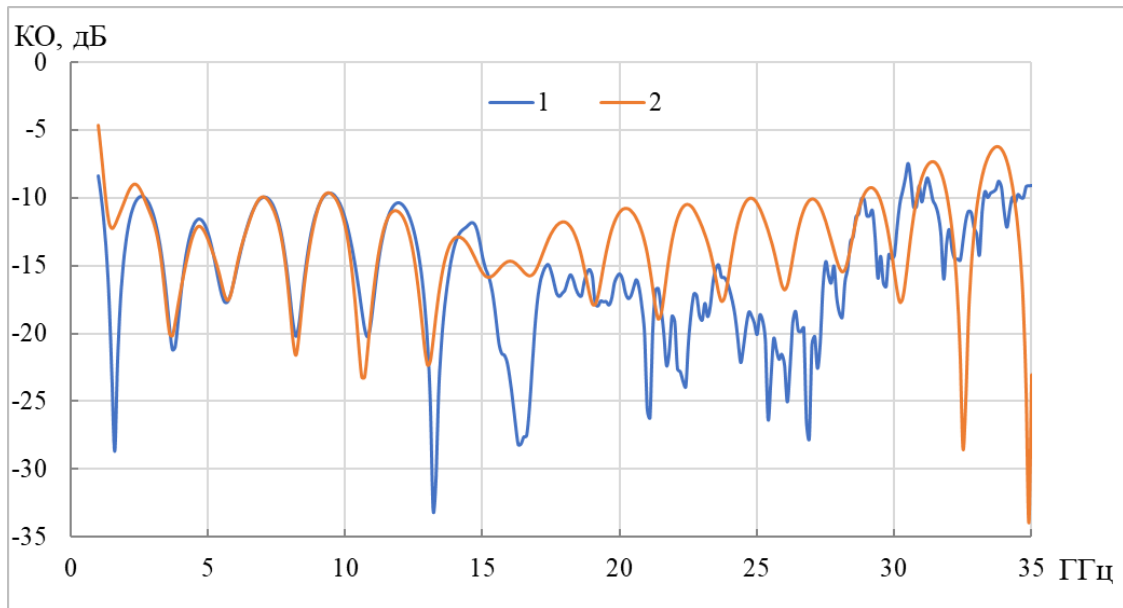


Рис. 18. Зависимость от частоты коэффициента отражения антенны с однородной анизотропной двухповерхностной линзой из соосных диэлектрических дисков МКЭ (1), МКРВО (2).

Результаты исследования КО от входа поликонической линзовой антенны в зависимости от частоты, рассчитанные двумя методами, показаны на рис. 18. Как видно на рисунке, среднее значение КО антенны, вычисленное двумя методами, в полосе частот 1.20...32 ГГц не превышает уровень -10 дБ.

ДН, рассчитанные с использованием МКЭ на 5 частотах, представлены на рис. 10, а частотные зависимости КУ и Э, рассчитанные с использованием МКРВО, показаны на рис. 20.

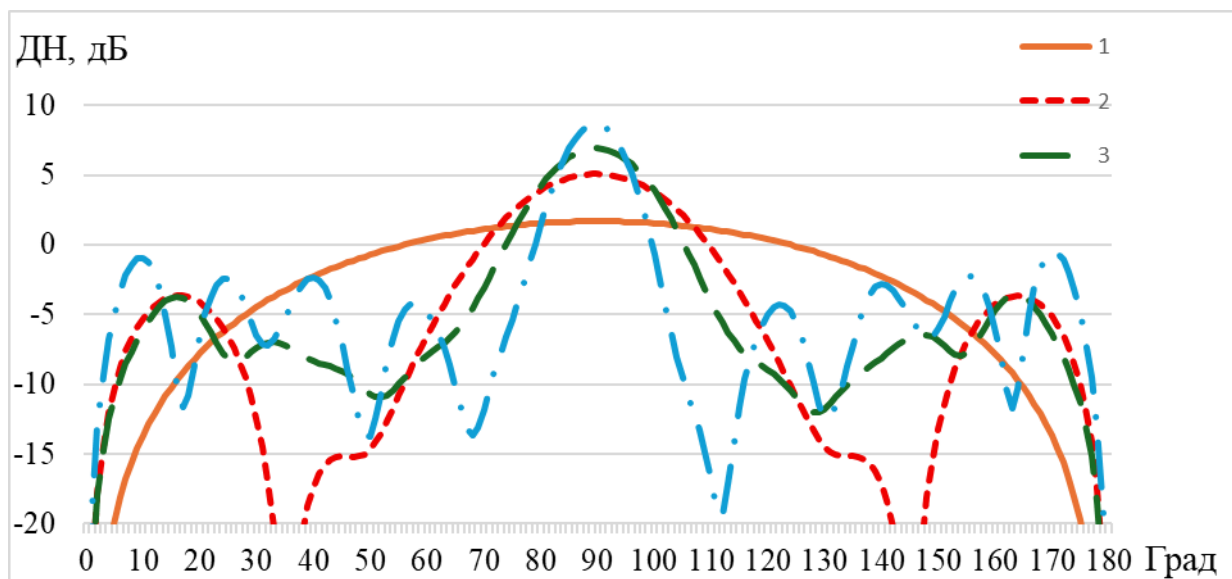


Рис. 19. Диаграммы направленности на частоте 1.3 (1), 15 (2), 25 (3), 35 (4) и 45 ГГц (5).

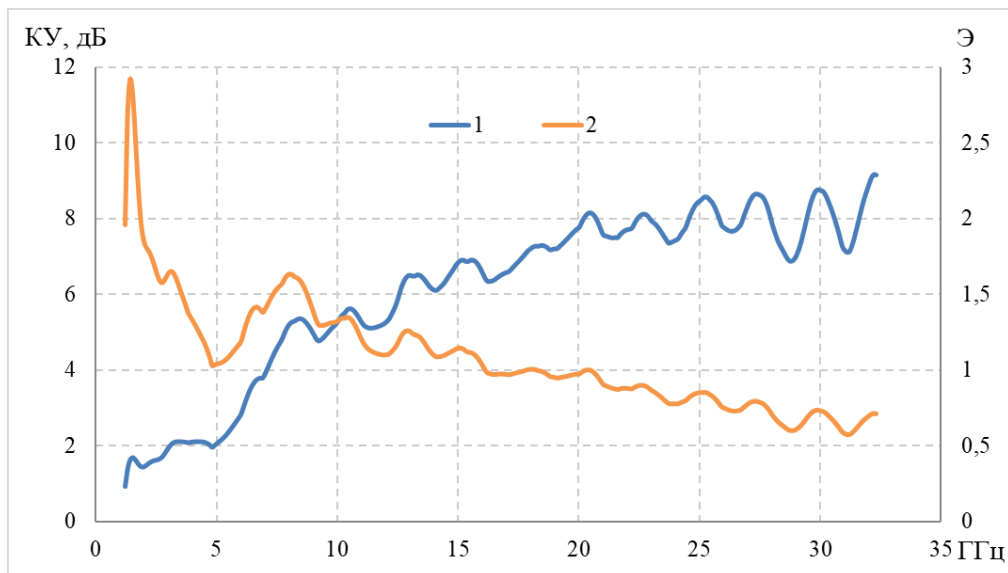


Рис. 20. Зависимость от частоты коэффициента усиления (1) и эффективности (2) антенны с однородной анизотропной двухповерхностной линзой из соосных диэлектрических дисков.

На рис. 20 видно, что поликоническая антенна с однородной анизотропной двухповерхностной линзой из соосных диэлектрических дисков обеспечивает наибольшую максимальную величину КУ 9.2 дБ и минимальный значение эффективности $\mathcal{E} = 0.6$.

Далее был исследован вариант антенны с однородной анизотропной двухповерхностной линзой из диэлектрических цилиндров (рис. 21). Решение задачи синтеза для второй образующей этой линзы по-прежнему определяется формулами (15) при замене компонент тензора диэлектрической проницаемости ε_x на ε_z , и ε_z на ε_x

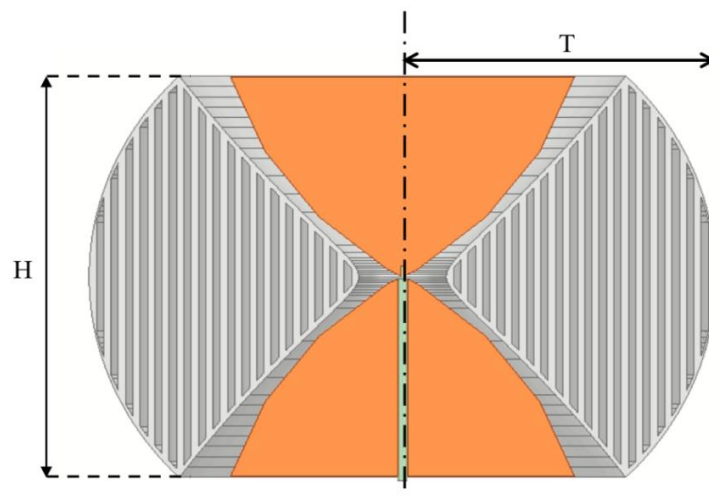


Рис. 21. Сечение антенны с однородной анизотропной двухповерхностной линзой из цилиндров.

Затем были проведены анализ и оптимизация параметров антенны с синтезированной линзой с использованием МКЭ и МКРВО с целью максимизации величины КИР. В результате, для диэлектрической проницаемости линзы $\epsilon_d = 1.5$ были найдены значения параметров $H_1 = 0.98$, $H_2 = 7.77$, $H_3 = 9.89$, $H_4 = 11.36$, $D_1 = 4.2$, $D_2 = 22.7$, $D_3 = 36.58$, $D_4 = 44.84$, $T = 43$.

Результаты исследования КО от входа поликонической линзовой антенны в зависимости от частоты, рассчитанные с использованием МКЭ и МКРВО, показаны на рис. 22.

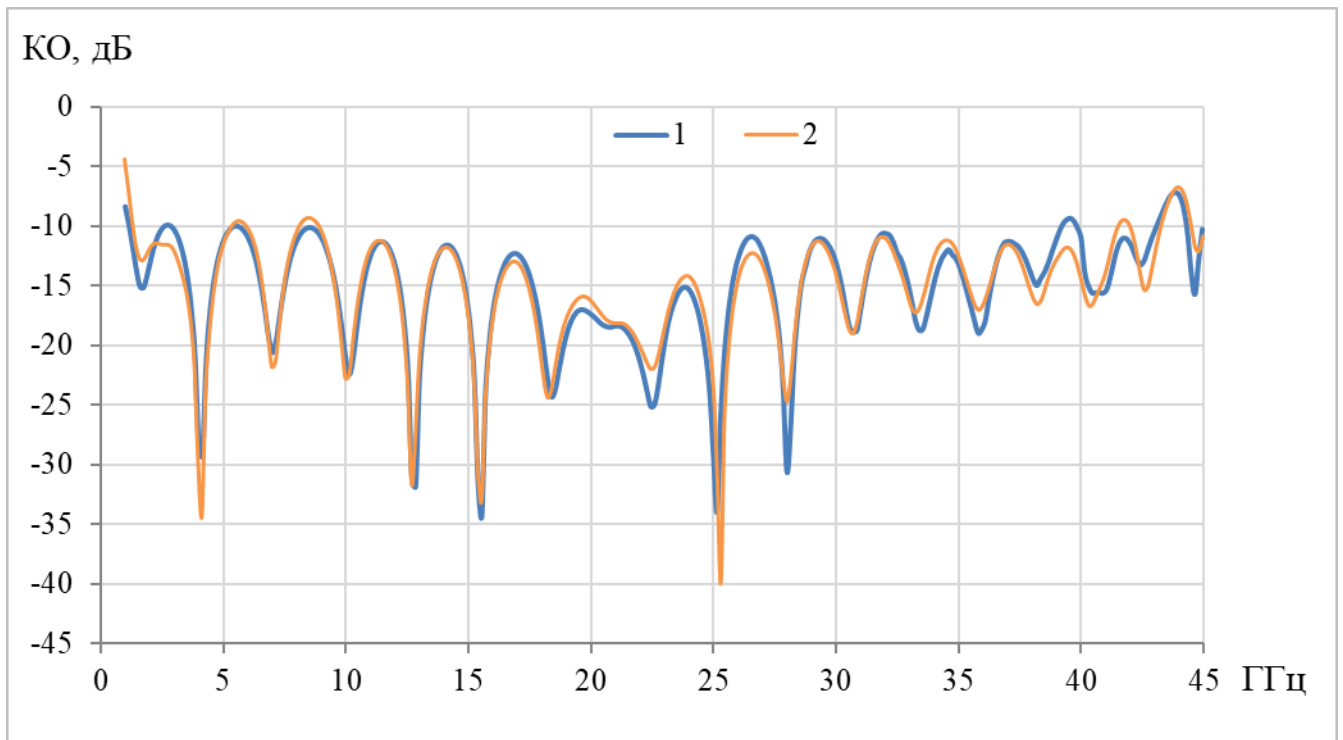


Рис. 22. Зависимость от частоты коэффициента отражения антенны с однородной анизотропной двухповерхностной линзой из цилиндров МКЭ (1), МКРВО (2).

Как видно на рисунке, среднее значение КО антенны, вычисленное двумя методами, в полосе частот 1.27...43 ГГц не превышает уровень -10 дБ.

ДН, рассчитанные с использованием МКЭ на 5 частотах, представлены на рис. 23, а частотные зависимости КУ и Э, рассчитанные с использованием МКРВО, показаны на рис. 24.

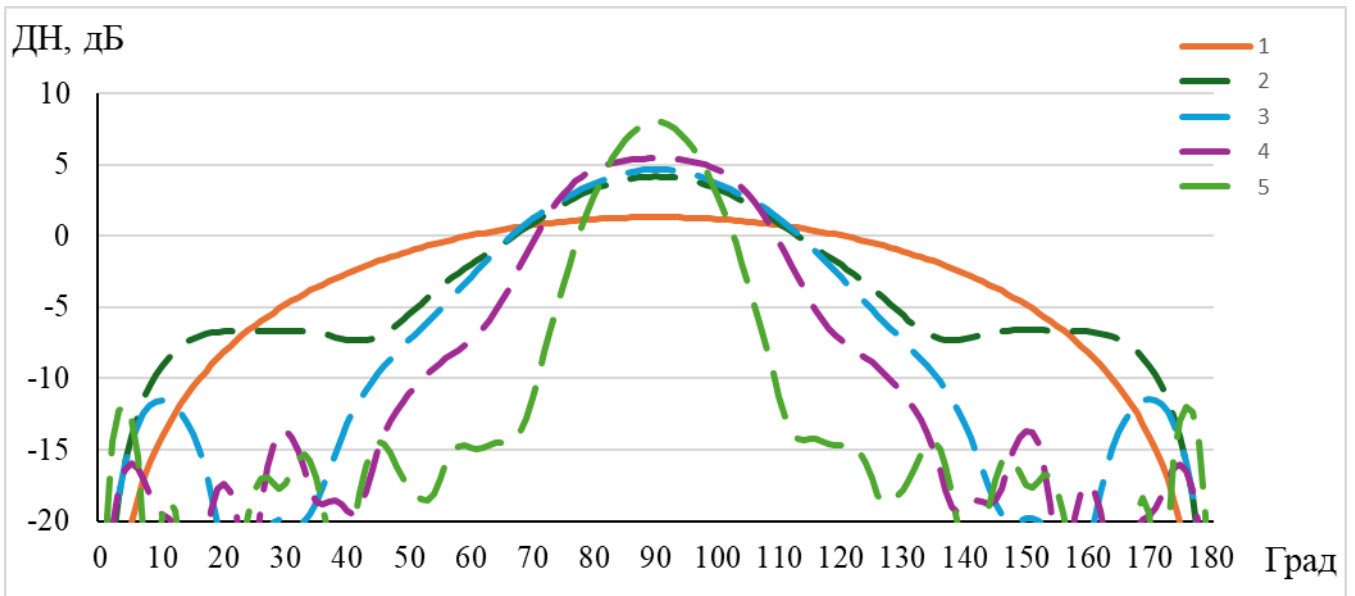


Рис. 23. Диаграммы направленности на частоте 1.5 (1), 10 (2), 15 (3) 25 (4) и 35 ГГц (5).

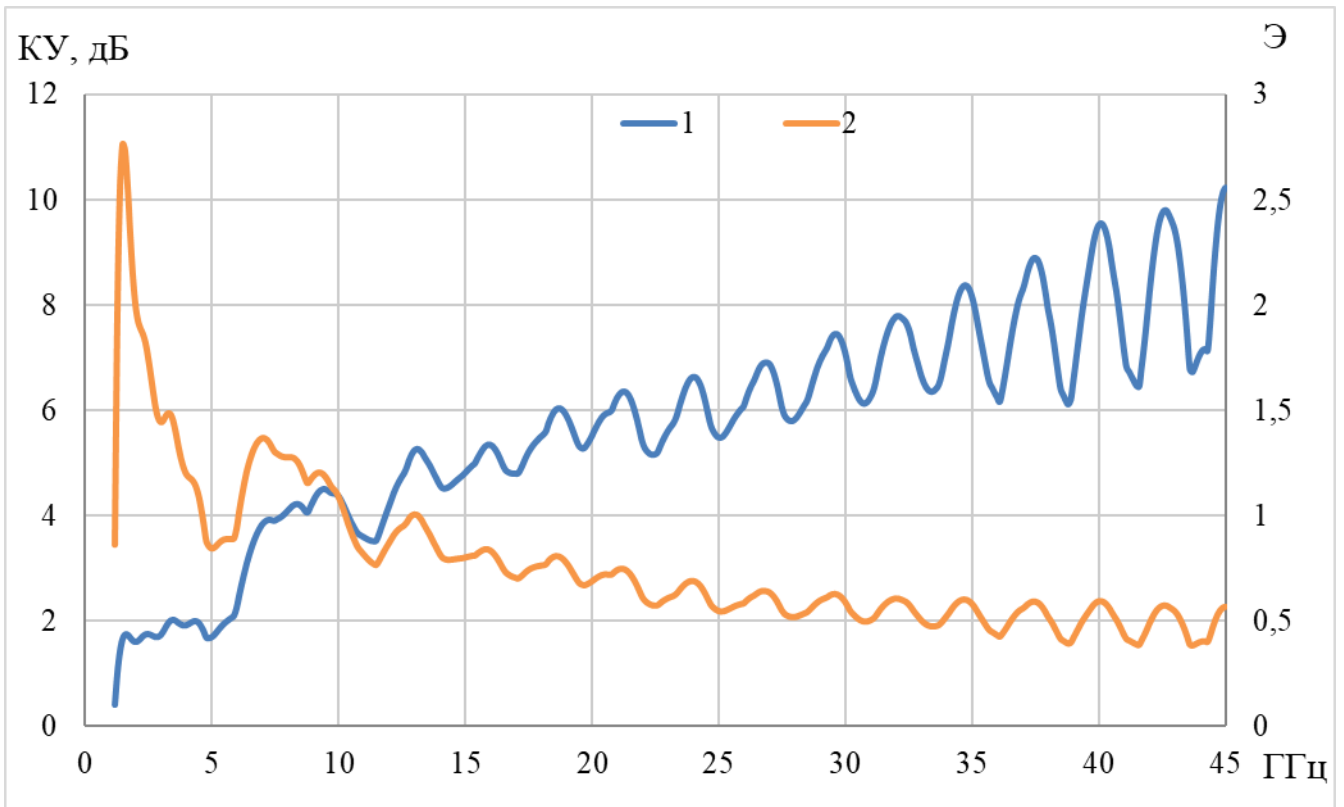


Рис. 24. Зависимость от частоты коэффициента усиления (1) и эффективности (2) антенны с однородной анизотропной двухповерхностной из цилиндров.

Как видно на рис 24, поликоническая антенна обеспечивает наибольшую максимальную величину $KY = 10.23$ дБ при и минимальное значение эффективности $\mathcal{E} = 0.39$.

Полученные в результате исследований параметры для всех 5 вариантов антенны сведены в Таблицу 1. Для сравнения в таблице приведены соответствующие результаты из известных публикаций в хронологическом порядке.

Таблица 1. Параметры биконических и поликонических линзовых антенн.

№ ссылки	Высота антенны	Радиус антенны	Ка мин	КИР	Полоса частот, ГГц	Макс. усиление, дБ	Эффективность
[1]	120	70	3.86	0.163	2–8 (4:1)	3.9	0.35–0.62
[2]	160	170	2.75	0.228	0.7–12 (17:1)	10.5	0.47–1.73
[5]	115	106	5.05	0.124	2–18 (9:1)	7.5	0.28–1.46
[4]	54	52	32	0.02	26–40 (1.5:1)	9.0	0.3–1.49
[3]	30	30	2.8	0.224	4–20 (5:1)	9.0	0.34–1.55
[6]	60	50	1.83	0.343	1.5–60 (40:1)	10.6	0.5–1.85
[7]	60	83	2.96	0.2124	1.6–70 (44:1)	14.4	0.8–2.3
Вариант 1	60	110	2.72	0.23	1.14–37 (37:1)	11.2	0.62–2.58
Вариант 2	60	70	2.23	0.28	1.4–42 (35:1)	11.9	0.6–3.75
Вариант 3	60	51	1.38	0.46	1.29–70 (60:1)	11.3	0.4–2.91
Вариант 4	60	56	1.4	0.45	1.2–31 (28:1)	9.2	0.57–2.92
Вариант 5	60	43	1.14	0.55	1.27–42 (35:1)	10.23	0.39–2.73

Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) Максимальную рабочую полосу частот обеспечивает поликоническая антенна с двухповерхностной изотропной линзой со сферической внешней поверхностью (вариант 3).

2) Максимальный коэффициент усиления обеспечивает поликоническая антенна с одноповерхностной анизотропной линзой из коаксиальных цилиндров (вариант 2).

3) Минимальную величину КИР обеспечивает поликоническая антенна с двухповерхностной анизотропной линзой из коаксиальных цилиндров со сферической внешней поверхностью (вариант 5).

Уменьшение коэффициента усиления и величину эффективности антенн с анизотропными линзами на высоких частотах можно объяснить частотной дисперсией периодической структуры. Эти параметры, по-видимому, можно улучшить путем уменьшения периода расположения дисков и цилиндров.

Литература

1. Marcel D. Blech, Arndt T. Ott, Thomas F. Eibert. A Two Octave Bandwidth Dielectric Loaded Biconical Antenna with High Sidelobe Suppression// 3rd European Conference on Antennas and Propagation. Berlin, Germany. 2009. P. 1006-1010.
2. Titan Z., Sievert B., Eube M., et al. Rotationally Symmetric Lens Antenna with Biconical Feed for Broadband Measurement Applications // 52th Europ. Microwave Conf. (EuMC). Milan, Italy. 2022. P. 612.
3. Uskov G.K., Smuseva K.V., Seregina E.A., et al. Biconical Antenna with Anisotropic Dielectric Lens for the Antenna Pattern Side Lobes Reduction // IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC). Moscow, Russia. 2022. P.191.

4. Zhang Zhi-Yi, Leung Kwok Wa, Lu Kai. Wideband and High Gain Omnidirectional Biconical Antenna for Millimeter-Wave Applications // IEEE Trans. Antennas Propag. 2023. V. 71. № 1. P.58.
5. Dubrovka F.F., Piltyay S., Movchan M., Zakharchuk I. Ultrawideband Compact Lightweight Biconical Antenna with Capability of Various Polarization Reception for Modern UAV Applications // IEEE Trans. Antennas Propag. 2023. V. 71. № 4. P. 2922.
6. Калошин В.А., Нгуен Т.Т. Сверхдиапазонная поликоническая антенна с диэлектрической линзой // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 2. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.2.16>
7. Калошин В.А., Нгуен Т.Т. Сверхдиапазонная поликоническая антенна с градиентной диэлектрической линзой // Радиотехника и электроника. 2025. Т. 70. № 1. С.12-18.
8. Chu L.J. Physical limitations of omnidirectional antennas // Journal of Applied Physics. 1948. V. 19. P. 1163.
9. Кухаркин Е.С. Основы инженерной электрофизики. – М.: Высшая школа. 1969. Часть I. С.172.
10. Рытов С.М. Электромагнитные свойства мелкослоистой среды // ЖЭТФ. 1955. Т.2. № 3. С.605.

Для цитирования:

Буи Туан Кхан, Калошин В.А., Фам Конг Уан. Поликонические линзовые антенны с анизотропными линзами // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.6.7>