

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.2>

УДК: 621.396.67

## МНОГОЛУЧЕВАЯ АНТЕННА С ПОЛНЫМ АЗИМУТАЛЬНЫМ УГЛОМ ОБЗОРА НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ЛИНЗЫ С ОСЕВОЙ СИММЕТРИЕЙ

А.С. Венецкий<sup>1</sup>, В.А. Калошин<sup>1</sup>, Чан Тиен Тханг<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН  
125009, Москва, ул. Моховая, 11, корп.7

<sup>2</sup> МФТИ (Национальный исследовательский университет)  
141700, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Статья поступила в редакцию 23 июня 2023 г.

**Аннотация.** Предложена и исследована многолучевая антенна с полным азимутальным обзором на основе цилиндрической линзы с осевой симметрией в виде набора слоев, каждый из которых представляет собой металло-диэлектрическую геодезическую линзу с оболочкой. Цилиндрическая линза преобразует поля облучателей, расположенных на окружности с центром на оси симметрии в плоскости ее основания, в остронаправленные лучи в той же плоскости. Анализ многолучевой линзовой антенны с металлическими рупорными и металло-диэлектрическими облучателями проведен путем численного моделирования методом конечных элементов.

**Ключевые слова:** многолучевая антенна, цилиндрическая линза, геодезическая линза, полный азимутальный угол обзора.

**Финансирование:** Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-006.

**Автор для переписки:** Чан Тиен Тханг, [trantienthang12@gmail.com](mailto:trantienthang12@gmail.com)

## Введение

В настоящее время возрос интерес к использованию многолучевых антенн на основе линз с центральной симметрией (линз Люнебурга) в качестве антенн базовых станций мобильной связи [1-3]. Однако такие антенны не позволяют обеспечить полный азимутальный обзор ( $360^\circ$ ) из-за затенения апертуры облучающей системой.

Полный азимутальный угол обзора может быть получен при использовании гибридных тороидальных линзовых антенн [3]. Однако КПД такой антенны существенно ниже, чем у антенны на основе линзы Люнебурга. Кроме того, использование фазированной антенной решетки в качестве облучающей системы усложняет конструкцию антенны.

В работе [4] получено решение задачи синтеза многослойной градиентной цилиндрической линзы с осевой симметрией, а в работе [5] исследована многолучевая антенна на базе такой линзы. Исследованная конструкция многолучевой линзовой антенны позволяет обеспечить полный азимутальный обзор ( $360^\circ$ ) в горизонтальной плоскости. Каждый из слоев цилиндрической линзы представляет собой планарную градиентную линзу с осевой симметрией. В работе исследована реализация слоев линзы с радиальным градиентом диэлектрической проницаемости в виде набора диэлектрических колец переменного радиуса и переменной толщины. Период расположения колец в такой структуре должен быть менее половины длины волны, что может вызвать трудности при ее реализации в коротковолновой части миллиметрового диапазона.

Целью данной работы является синтез и анализ многолучевой антенны с полным азимутальным обзором на основе цилиндрической линзы с осевой симметрией, каждый слой которой представляет собой металлическую геодезическую линзу, частично заполненную однородным диэлектриком.

## 1. Синтез многослойной геодезической линзы

Рассмотрим многолучевую антенну на основе цилиндрической линзы высотой  $H$ , состоящей из набора слоев, каждый из которых представляет собой нерегулярную осесимметричную геодезическую линзу (рис. 1), образованную металлическими поверхностями, расположенными на расстоянии  $d$ . Линзы частично заполнены слоем диэлектрика постоянной толщины, одна из поверхностей которого примыкает к металлической поверхности, причем каждая линза содержит оболочку с толщиной диэлектрического заполнения  $a_1$  и центральную часть – с толщиной диэлектрического заполнения  $a_0$ . В плоскости  $Z = d/2$  на окружности радиуса  $f$  с центром на оси  $Z$  находятся фазовые центры облучателей двух типов (металлических рупоров рис. 1а и металло-диэлектрических антенн бегущей волны рис. 1б), оси которых расположены под углом к этой плоскости. Многослойная геодезическая линза преобразует поля облучателей со сферическим фазовым фронтом в поля с плоским фронтом на выходе линзы.

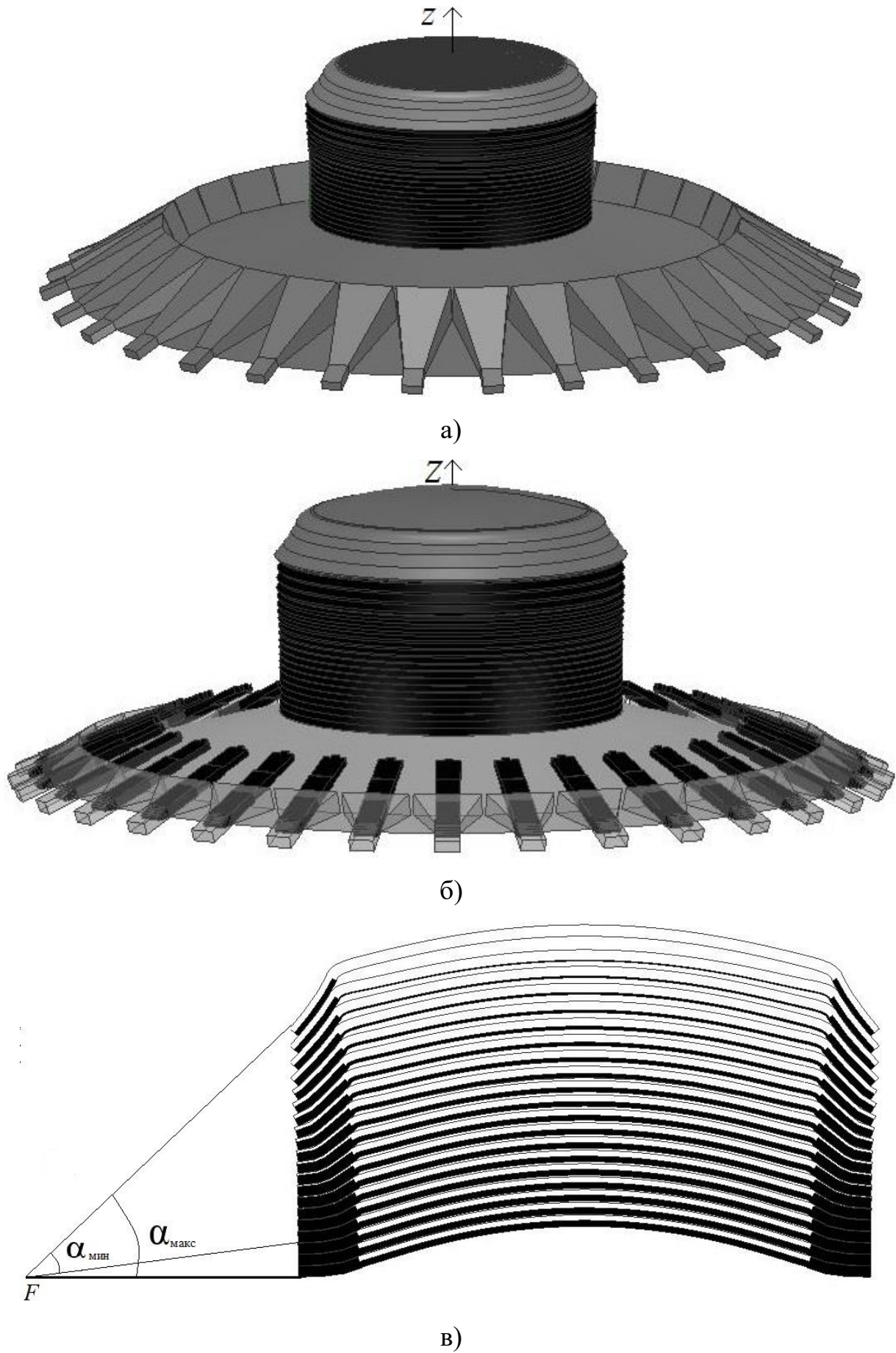


Рис. 1. Цилиндрическая линзовая антенна: а) с металлическими облучателями, б) с металло-диэлектрическими облучателями, в) сечение линзы

Сечение линзы показано на рис. 1в. Для уменьшения затенения апертуры линзы облучающей системой три нижних слоя линзы далее удалены. Задача синтеза состоит в нахождении профилей образующих металлических поверхностей  $z_i = f_i(r)$  и значений толщин диэлектрика в оболочках и центральных частях геодезических линз (соответственно,  $a_1$  и  $a_0$ ). Все размеры далее нормируются на радиус  $r_0$  цилиндрической линзы, в связи с чем при решении задачи синтеза без ограничения общности будем полагать  $r_0 = 1$ .

Для анализа преломления и распространения волны внутри слоев используем приближение геометрической оптики. При падении поля облучателя на поверхность линзы сферическая волна преломляется гибридным образом (естественно и вынуждено), из-за чего нельзя использовать классический закон Снеллиуса. Для анализа преломления используем методику, описанную в работах [4,5]. Рассмотрим луч, падающий из точки  $F$  в точку  $A$  на поверхности линзы (рис. 2а). Из граничных условий следует, что касательные к поверхности линзы азимутальные компоненты волнового вектора, падающей  $\vec{k}_\varphi$  и преломленной волны  $\vec{k}_{1\varphi}$  совпадают. Следовательно, для этих компонент волновых векторов в любой точке  $A$  на поверхности линзы справедливо соотношение:

$$k_\varphi = \frac{f \sin \varphi}{|FA|} = k_{1\varphi} = n_1 \sin \psi_1, \quad (1)$$

где  $|FA|^2 = f^2 + 1 - 2f \cos \varphi + H^2$ ,  $n_1 = n(1)$  – коэффициент преломления (замедления) в оболочке линзы. Из уравнения (1) следует:

$$\sin \psi_1 = \frac{f \sin \varphi}{n_1 |FA|} = \frac{f \sin \varphi}{n_1 \sqrt{f^2 + 1 - 2f \cos \varphi + H^2}}.$$

Найденным лучам преломленной волны в трехмерной задаче соответствует падающее поле в двумерной задаче с углами падения  $\psi(\varphi)$  в плоскости  $z = H$  (рис. 2б). Используя закон Снеллиуса, находим:

$$\sin \psi = n_1 \sin \psi_1 = \frac{f \sin \varphi}{|FA|} = \frac{f \sin \varphi}{\sqrt{f^2 + 1 - 2f \cos \varphi + H^2}}.$$

Отсюда можно выразить  $\varphi$  через  $\psi$  по формуле:

$$\varphi = \arccos\left(\frac{1}{f}\left(h^2 + \sqrt{h^4 - h^2 - h^2 f^2 - h^2 H^2 + f^2}\right)\right),$$

где  $h = \sin\psi$ .

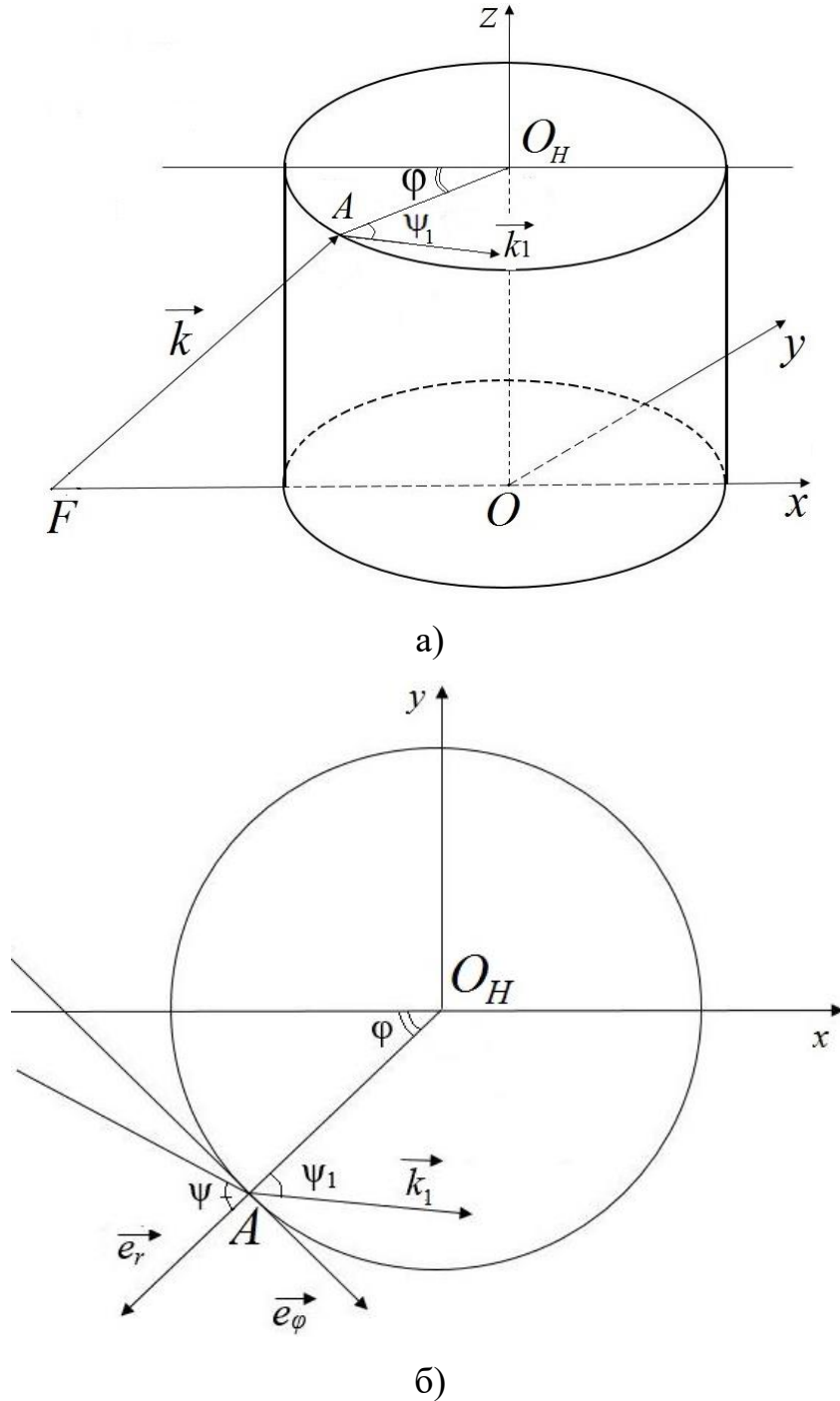


Рис. 2. Геометрия лучей: а) трехмерная задача, б) двумерная задача

Если двумерная задача синтеза геодезической линзы с центральной симметрией, формирующей линейный, ортогональный оси X фронт для каждого

слоя решена, для синтеза трехмерной линзы, формирующей плоский фронт, достаточно приравнять эйконалы центральных лучей слоев.

Таким образом, трехмерная задача синтеза многослойной линзы сведена к решению набора задач синтеза геодезических линз с центральной симметрией, преобразующих заданный волновой фронт в линейный при условии равенства эйконалов центральных лучей в каждом слое.

В работе [6] получено решение задачи синтеза геодезической линзы с диэлектрическим заполнением с центральной симметрией, преобразующей сферический волновой фронт – в произвольный. В силу принципа взаимности это решение остается справедливым и для задачи преобразования произвольного фронта в сферический или, в предельном случае, в плоский. Однако, решение в работе [6] получено при условии полного использования апертуры линзы. В данной задаче это условие нельзя обеспечить, в связи с чем необходимо обобщить решение, полученное в [6], на случай неполного использования апертуры.

Уравнение луча в геодезической металлодиэлектрической линзе имеет вид [6]:

$$d\varphi = \mp \frac{h}{r} \frac{l'(r)}{\sqrt{\rho(r)^2 - h^2}} dr, \quad (2)$$

где  $l'(r) = -\sqrt{1 + (dz/dr)^2}$ ,  $\rho(r) = n(r)r$ ,  $h = r_0 n_1 \sin \psi_1 = \sin \psi$  – лучевой параметр, являющийся инвариантом для каждого луча.

Из условия центральной симметрии для каждого луча (рис. 3) следует:

$$\varphi + 2\Delta\varphi + 2\Delta\Phi + \psi = \pi. \quad (3)$$

Интегрируя уравнения (2) с учетом симметрии луча, можно показать:

$$2\Delta\Phi = -2 \int_{r_{\min}}^a \frac{h}{r} \frac{l'(r)}{\sqrt{n_0^2 r^2 - h^2}} dr, \quad 2\Delta\varphi = -2 \int_a^1 \frac{h}{r} \frac{l'(r)}{\sqrt{n_1^2 r^2 - h^2}} dr, \quad (4)$$

Где  $r_{\min} = h/n_0$ , а  $n_1$  и  $n_0$  – коэффициенты преломления в оболочке и в центральной части линзы, соответственно.





В силу того, что функция  $\rho(r) = n_0 r$  монотонная при  $0 \leq r \leq a$ , переменную интегрирования в (5) можно заменить на  $\rho$ . В результате, получим уравнение:

$$-\int_h^A \frac{h}{r(\rho)} \frac{l'(\rho) d\rho}{\sqrt{\rho^2 - h^2}} = F(h).$$

Разделив обе части последнего уравнения на  $\sqrt{h^2 - \rho^2}$ , интегрируя их по  $h$  от  $\rho$  до  $A$  и меняя порядок интегрирования в левой части, получаем

$$-\int_\rho^A \frac{l'(\rho) d\rho}{r(\rho)} = \frac{2}{\pi} \int_\rho^A \frac{F(h) dh}{\sqrt{h^2 - \rho^2}}.$$

Возвращаясь в левой части к переменной интегрирования  $r$  и проводя интегрирование правой части, получаем:

$$-\int_r^a \frac{l'(r) dr}{r} = \ln[A + \sqrt{A^2 - \rho^2}] - \ln(\rho) + q\left(\frac{\rho}{A}, \frac{f}{A}\right) - q\left(\frac{\rho}{A}, \frac{1}{A}\right) + 2k_i \left( q\left(\frac{\rho}{A}, \frac{n_1 r_{i-1}}{A}\right) - q\left(\frac{\rho}{A}, \frac{n_1 r_i}{A}\right) \right) - \frac{1}{\pi} \int_\rho^A \frac{\varphi(h) dh}{\sqrt{h^2 - \rho^2}} \quad (6)$$

где  $q\left(\frac{\rho}{A}, \frac{t}{A}\right) = \frac{1}{\pi} \int_\rho^A \frac{\arcsin(h/t)}{\sqrt{h^2 - \rho^2}} dh.$

Дифференцируя (6) по  $r$ , находим  $l'(r)$ :

$$\begin{aligned} l'(r) &= r \frac{d}{dr} \left[ \ln[A + \sqrt{A^2 - \rho^2}] - \ln(\rho) - q\left(\frac{\rho}{A}, \frac{1}{A}\right) + \sum_{i=1}^N 2k_i \left( q\left(\frac{\rho}{A}, \frac{n_1 r_{i-1}}{A}\right) - q\left(\frac{\rho}{A}, \frac{n_1 r_i}{A}\right) \right) - \frac{1}{\pi} \int_\rho^A \frac{\varphi(h) dh}{\sqrt{h^2 - \rho^2}} \right] = \\ &= r \frac{d\rho}{dr} \frac{d}{d\rho} \left[ \ln[A + \sqrt{A^2 - \rho^2}] - \ln \rho - q\left(\frac{\rho}{A}, \frac{1}{A}\right) + \sum_{i=1}^N 2k_i \left( q\left(\frac{\rho}{A}, \frac{n_1 r_{i-1}}{A}\right) - q\left(\frac{\rho}{A}, \frac{n_1 r_i}{A}\right) \right) - \frac{1}{\pi} \int_\rho^A \frac{\varphi(h) dh}{\sqrt{h^2 - \rho^2}} \right] = \\ &= \frac{1}{\pi} \left[ \frac{-\pi n_0^2 r^2}{\sqrt{A^2 - n_0^2 r^2} (A + \sqrt{A^2 - n_0^2 r^2})} - \pi - \arcsin \sqrt{\frac{A^2 - \rho^2}{1 - \rho^2}} - \frac{\arcsin A}{\sqrt{A^2 - \rho^2}} + \sum_{i=1}^N 2k_i \left( \arcsin \sqrt{\frac{A^2 - \rho^2}{n_1^2 r_{i-1}^2 - \rho^2}} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{\arcsin(A/n_1^2 r_{i-1}^2)}{\sqrt{A^2 - \rho^2}} - \arcsin \sqrt{\frac{A^2 - \rho^2}{n_1^2 r_i^2 - \rho^2}} + \frac{\arcsin(A/n_1^2 r_i^2)}{\sqrt{A^2 - \rho^2}} \right) - r^2 n_0^2 \left[ \frac{-\varphi(A)}{A\sqrt{A^2 - \rho^2}} + \int_\rho^A \frac{\varphi'(h)h - \varphi(h)}{\sqrt{h^2 - \rho^2}} dh \right] \right]. \quad (7) \end{aligned}$$

где  $\rho = n_0 r$ ,  $\varphi(h) = \arccos \left( \frac{h^2 + \sqrt{h^4 - h^2 - f^2 h^2 - H^2 h^2 + f^2}}{f} \right).$

При этом образующая центральной части геодезической линзы определяется уравнением:

$$z(r) = \int_0^r \sqrt{l'(r)^2 - 1} dr, 0 \leq r \leq a. \quad (8)$$

Отсюда следует, что при выборе параметров  $r_N, n_0, n_1$  необходимо выполнение условия:

$$|l'(r)| \geq 1, 0 \leq r \leq a. \quad (9)$$

При синтезе линзы с неполным использованием апертуры необходимо, чтобы крайний луч с лучевым параметром  $h = A$  удовлетворял условию  $\varphi(A) + 2\Delta\varphi + \arcsin A \leq \pi$ , из которого с учетом выражения:

$$\Delta\varphi = \sum_{i=1}^N k_i \left( \arcsin \left( \frac{A}{n_1 r_{i-1}} \right) - \arcsin \left( \frac{A}{n_1 r_i} \right) \right),$$

следует:

$$a \geq \frac{A}{n_1 \sin \left( \frac{\pi}{2k_N} - \frac{1}{2k_N} \arcsin A + \frac{1}{k_N} \arcsin \frac{A}{n_1 r_{N-1}} + \sum_{i=1}^{N-1} \frac{k_i}{k_N} \left( \arcsin \frac{A}{n_1 r_{i-1}} - \arcsin \frac{A}{n_1 r_i} \right) - \frac{\varphi(A)}{2k_N} \right)}. \quad (10)$$

В качестве примера рассмотрим линзу с фокальным расстоянием  $f = 2$ , высотой  $H_{\max} = 1$ . Для величины замедления в центральной части верхней линзы выберем минимальное значение ( $n_0 = 1$ ). Тогда из условия касания крайнего луча границы центральной части линзы следует  $r_N = a = A/n_0 = A = \sin \psi_0$ , а наименьшее значение коэффициента преломления в оболочке  $n_1 = 1.2$ . Проверка после нахождения  $l'(r)$  показывает, что условия (9), (10) при этом выполнены, а эйконал центрального луча верхнего слоя:

$$L_0 = \sqrt{(f-1)^2 + H_{\max}^2} + 2n_0 \int_0^a |l'(r)| dr + \sum_{i=1}^N 2n_1 \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} = 3.767.$$

Для нахождения параметров слоев будем использовать следующий алгоритм. Обозначим правую часть неравенства (10)  $R(n_1)$  и ограничимся случаем строгого равенства в (9), так как минимальное значение  $a$  соответствует наименьшему значению  $n_1$ . С учетом соотношения  $A = an_0$  получаем  $n_0 = A/R(n_1)$ , после чего приравниваем эйконал центрального луча слоя эйконалу

центрального луча верхнего слоя. В результате, получаем трансцендентное уравнение относительно  $n_1$ :

$$L = \sqrt{(f-1)^2 + H^2} + 2n_0 \int_0^a |l'(r)| dr + \sum_{i=1}^N 2n_1 \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} = L_0, \quad (11)$$

при решении которого проверяем выполнение условия (9). В результате получаем набор геодезических линз с различной величиной замедления  $n_1$ , при этом  $n_0 = A/a$ , а величина  $a$  – минимальная, удовлетворяющей условию (10).

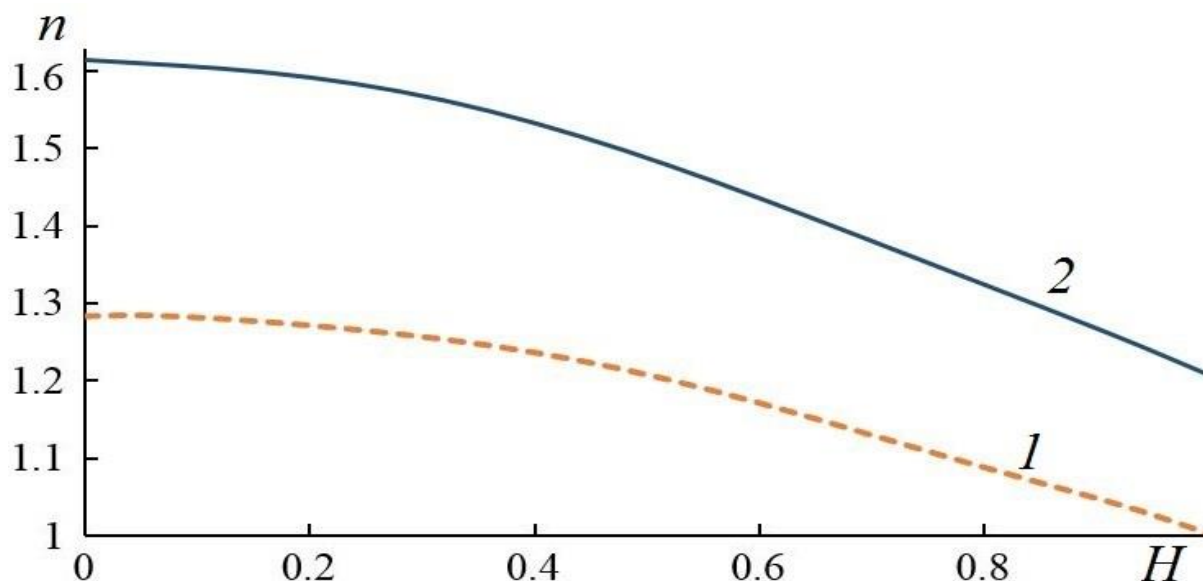


Рис. 4. Зависимости коэффициента замедления в центральной части линзы (1) и в оболочке (2) от высоты слоя

Результаты расчета зависимости коэффициента преломления в центральной части линзы и оболочки приведены на рис. 4.

Зная величину коэффициента преломления в оболочке ( $n_1$ ) и центральной части ( $n_0$ ) геодезических линз, соответствующую толщину диэлектрического слоя  $a$  можно найти из дисперсионного уравнения для основной моды плоского металлодиэлектрического волновода [7]:

$$\cos(k_z nd) = \cos(\chi_1 a) \cos(\chi_2 b) - \frac{1 + \zeta^2}{2\zeta} \sin(\chi_1 a) \sin(\chi_2 b), \quad (12)$$

где  $k_z = k_0 \sin \gamma$ ,  $\zeta = \chi_1 \varepsilon_2 / \chi_2 \varepsilon_1$ ,  $\chi_i = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_i n_i - k_0^2 n^2 \cos^2 \gamma}$ ,  $i = 1, 2$ ,  $\gamma = 90^\circ$ ,  $d$  – расстояние между металлическими стенками волновода,  $b = d - a$ ,  $\varepsilon_1$  – диэлектрическая проницаемость заполнения,  $\varepsilon_2 = 1$ .

На рис. 5 показаны зависимости коэффициента заполнения  $c = a / d$  слоя, частично заполненного полистиролом ( $\epsilon_1 = 2.6$ ) от высоты  $H$  для центральной части и оболочки.

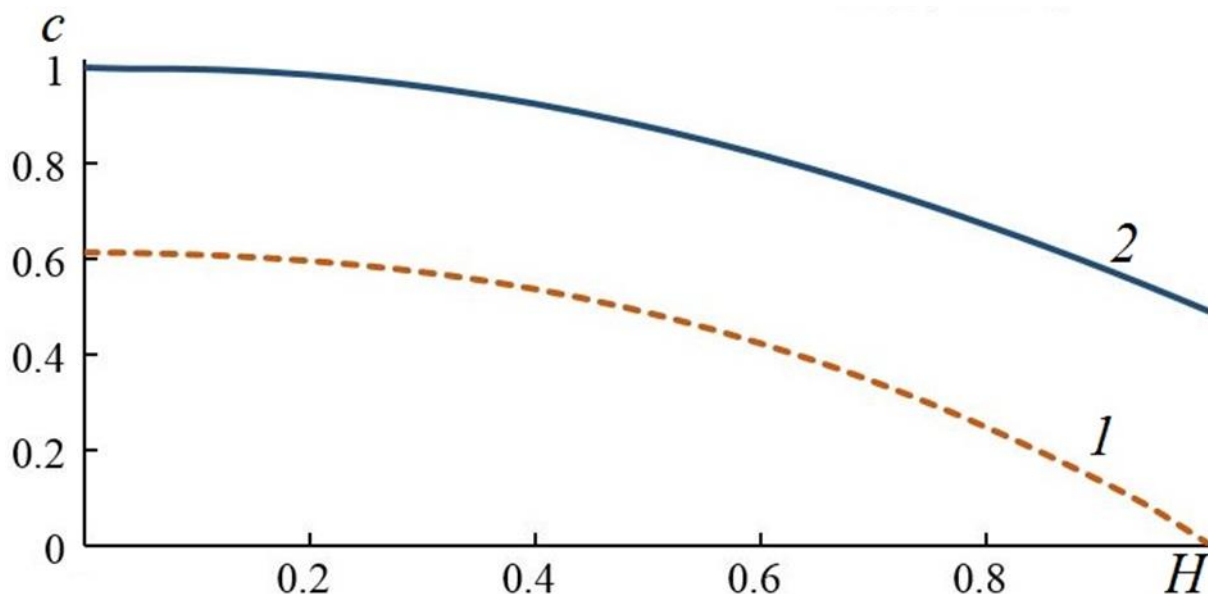


Рис. 5. Зависимости коэффициента заполнения в центральной части линзы (1) и в оболочке (2) от высоты слоя

Таким образом, мы определили как форму геодезических линз, так и толщину диэлектрического заполнения.

## 2. Анализ многолучевой антенны на основе многослойной геодезической линзы

Рассмотрим многолучевую антенну на основе многослойной цилиндрической линзы радиусом  $r_0 = 50$  мм и фокальным расстоянием  $f = 100$  мм (рис. 1), каждый слой которой выполнен в виде геодезической линзы толщиной  $d = 2$  мм, частично заполненной слоем полистирола.

Металло-диэлектрические (рис. 6а) и металлические (рис. 6б) облучатели с входным сечением  $7.2 \times 3.4$  мм расположены вдоль радиальной координаты под углом  $22.5$  градусов к горизонтальной плоскости.

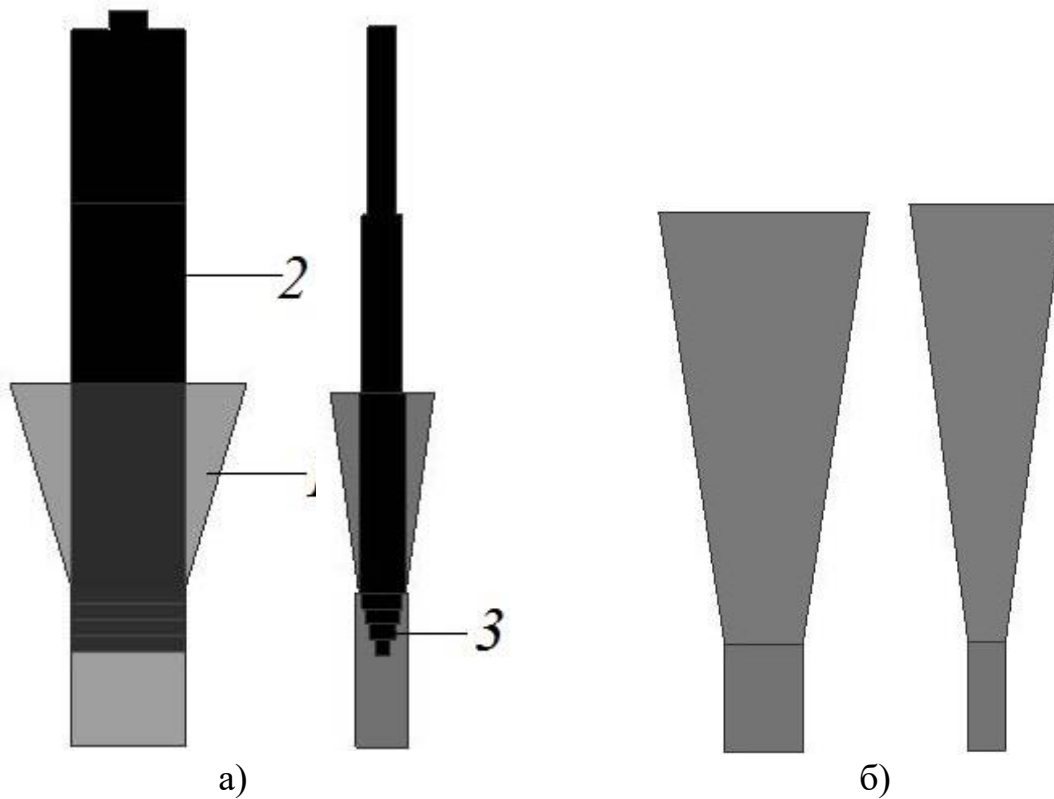
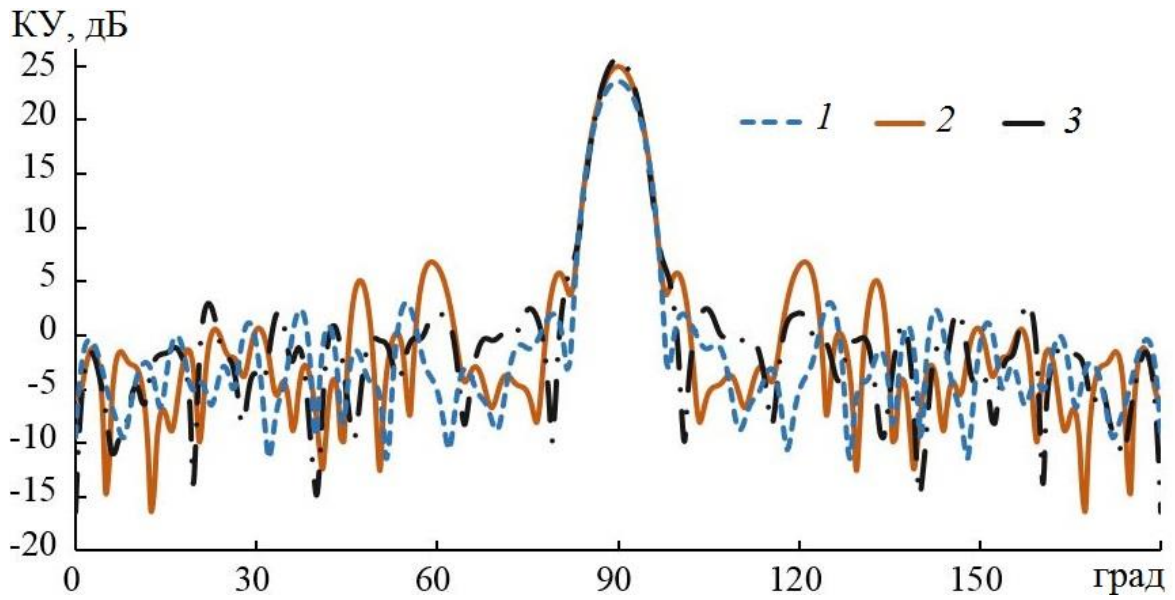


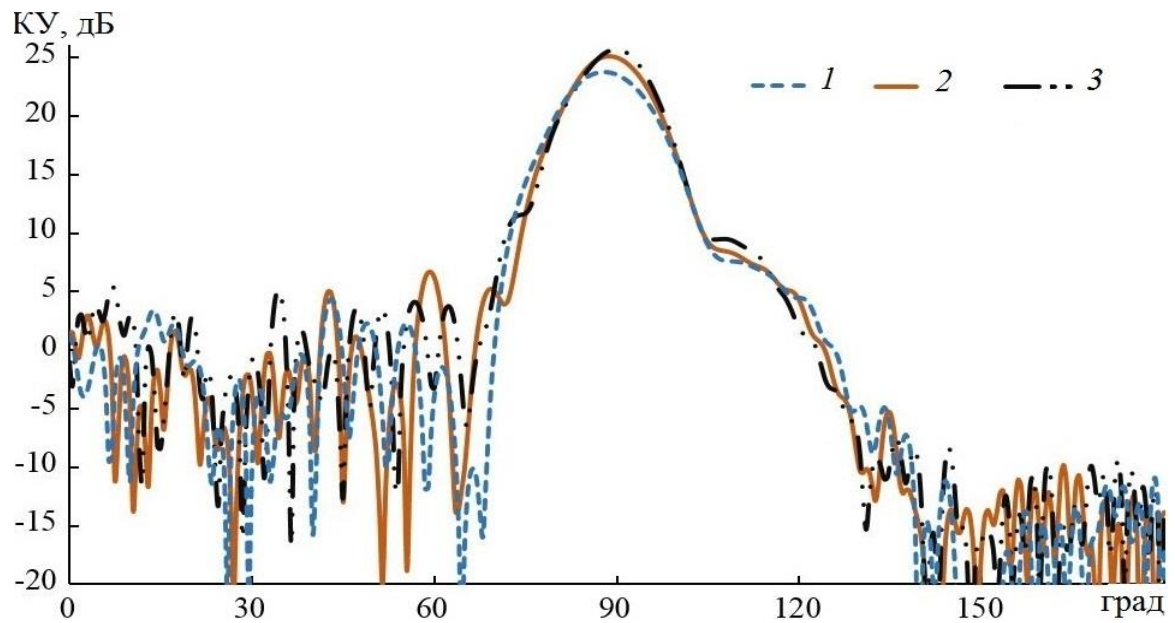
Рис. 6. Металло-диэлектрические (а) и металлические (б) рупорные облучатели

На рис. 7, 8 показаны результаты расчета методом конечных элементов (МКЭ) в программной среде Ansys HFSS диаграмм направленности в  $E$  и  $H$  плоскости линзовой антенны из 20 слоев на трех частотах с одним металло-диэлектрическим и металлическим облучателем, соответственно.

Диаграммы направленности трех соседних лучей в  $H$ -плоскости на частоте 30 ГГц многолучевых антенн с полным азимутальным углом обзора показаны, соответственно, на рис. 8а и 8б.

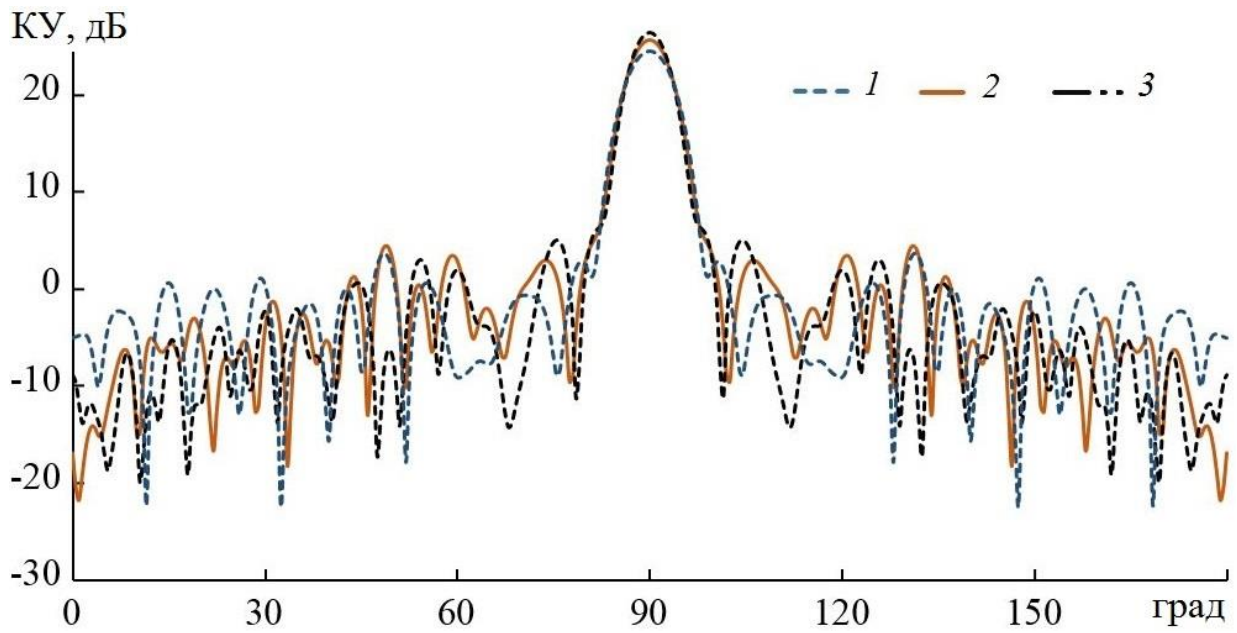


а)

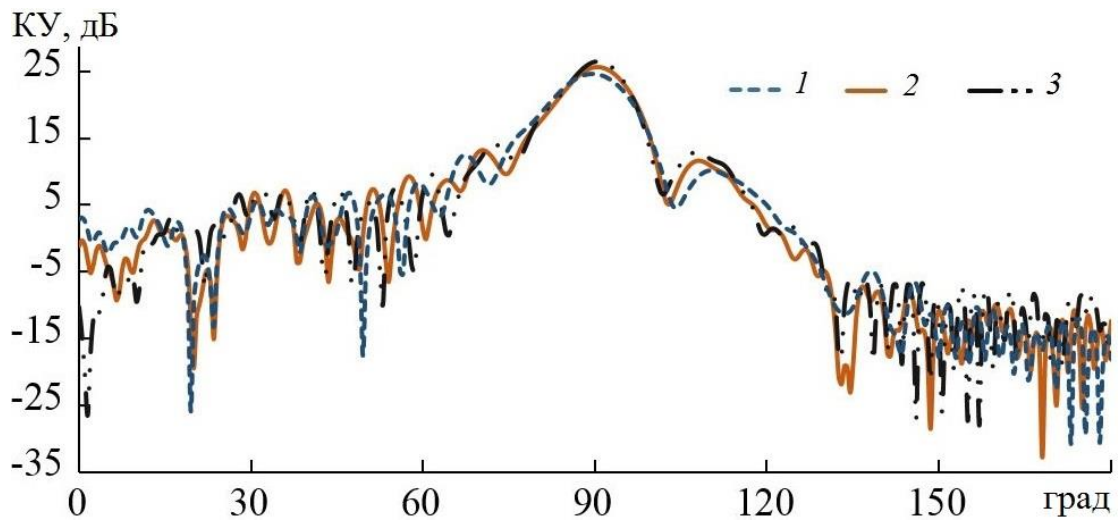


б)

Рис. 6. Диаграммы направленности линзовой антенны с одним облучателем на частотах 27 (1), 30 (2), 33 (3) ГГц в виде металло-диэлектрического облучателя:  
а)  $E$  – плоскость, б)  $H$  – плоскость

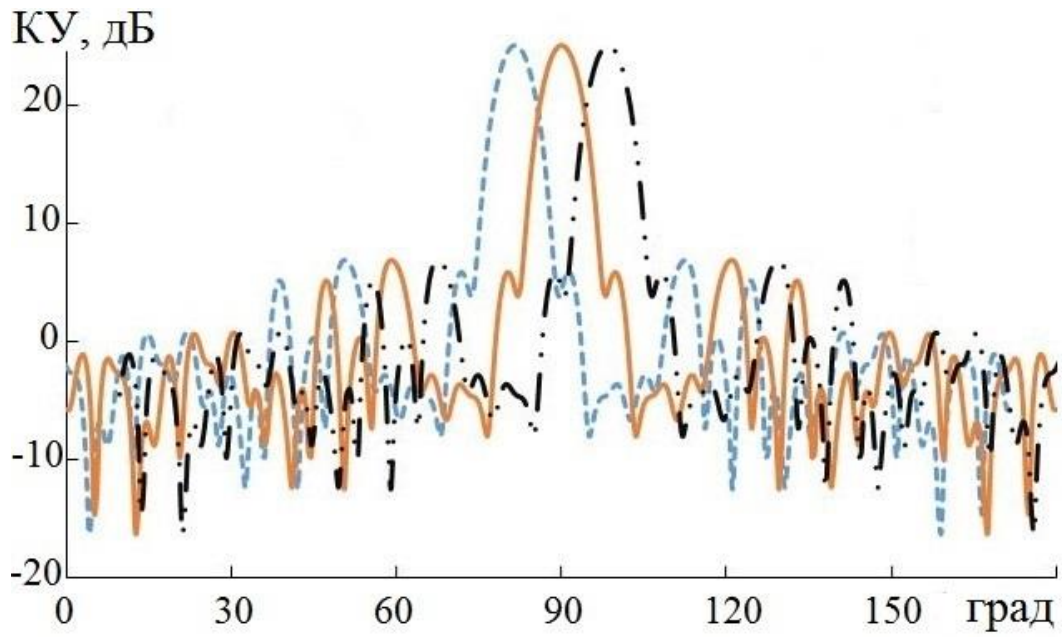


а)

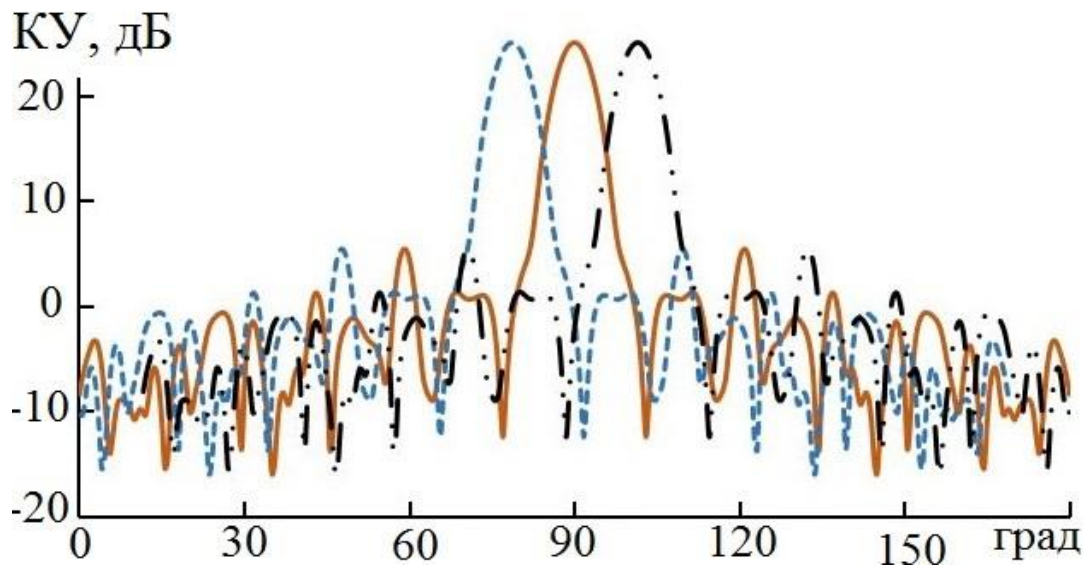


б)

Рис. 7. Диаграммы направленности линзовой антенны с одним облучателем на частотах 27 (1), 30 (2), 33 (3) ГГц в виде металлического облучателя:  
а)  $E$  – плоскость, б)  $H$  – плоскость



а)

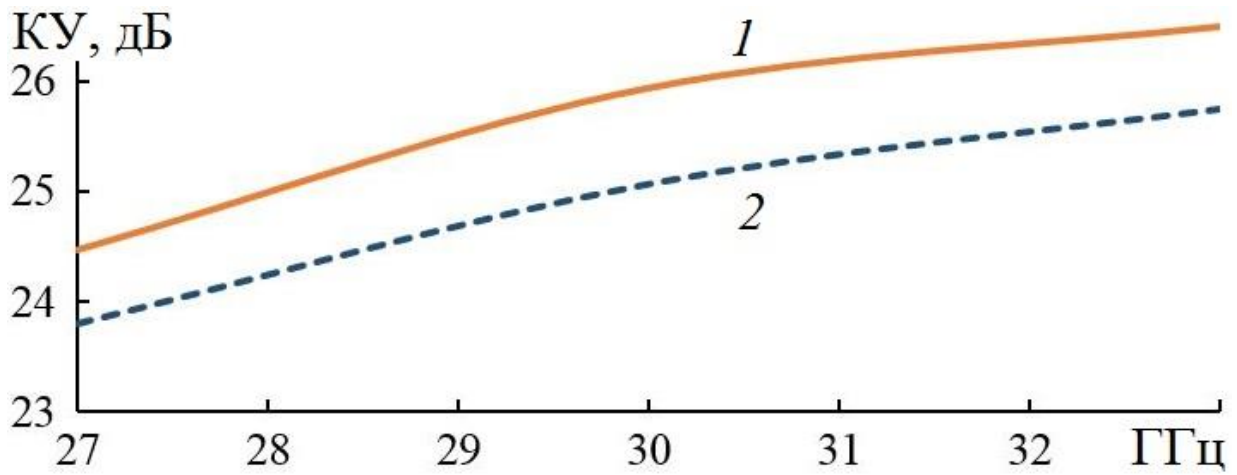


б)

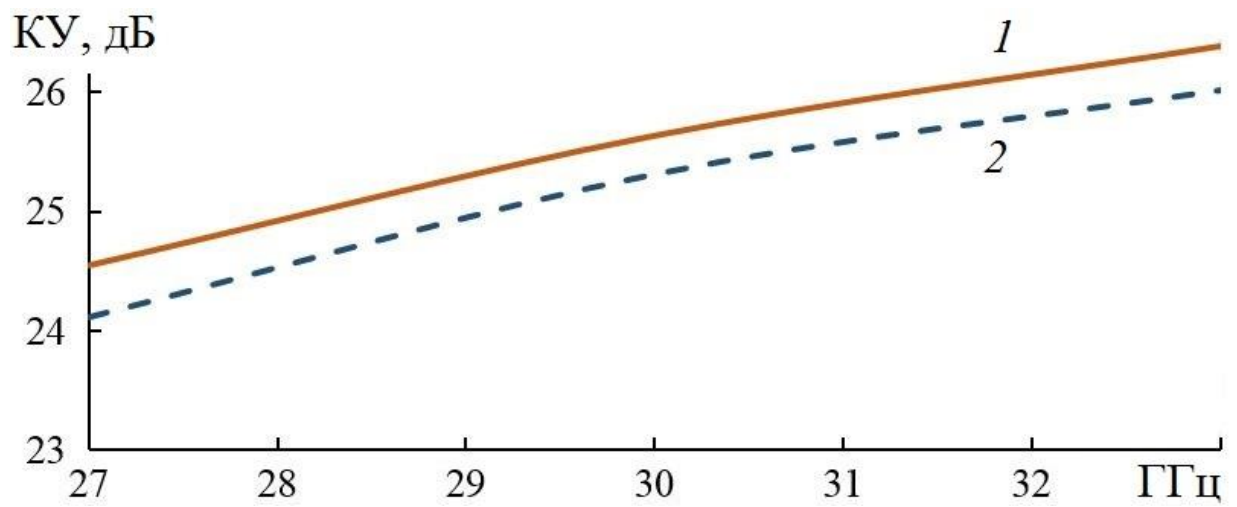
Рис.8. Диаграммы направленности трех лучей линзовой антенны с 43 металло-диэлектрическими облучателями (а) и 31 металлическим облучателями (б)

Частотные зависимости коэффициента усиления и величины КИП антенн показаны на рис. 9, 10, соответственно.



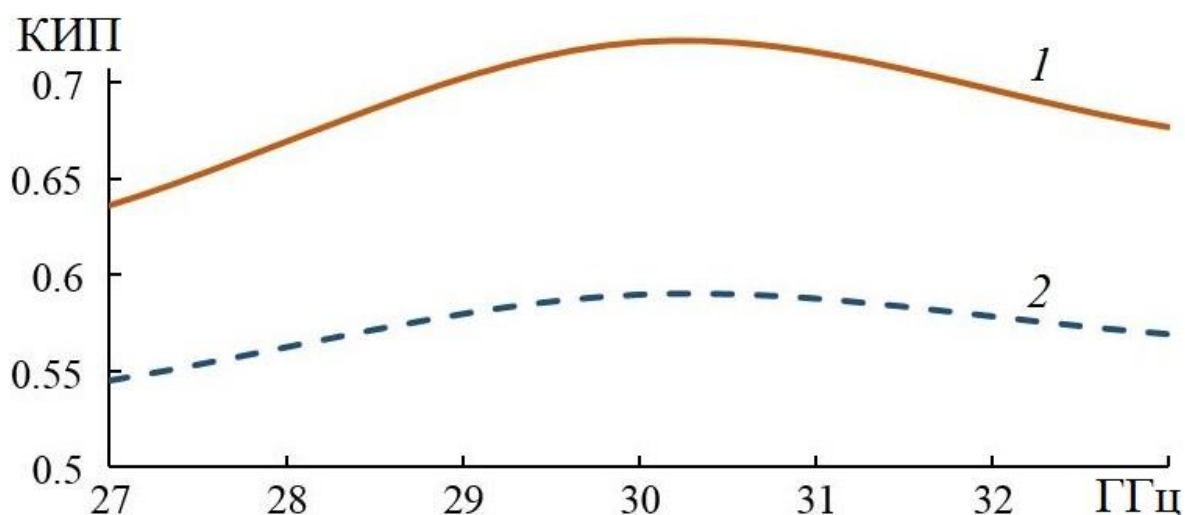


а)

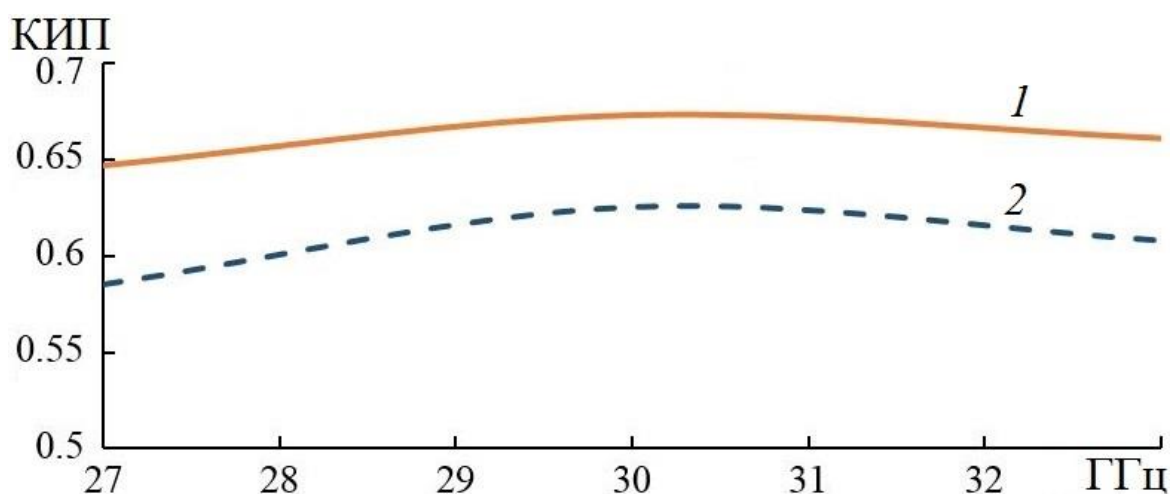


б)

Рис. 9. Зависимость коэффициента усиления от частоты с металло-диэлектрическим (а) и металлическим облучателем: однолучевая антенна (1), многолучевая антенна (2)



а)



б)

Рис. 10. Зависимость коэффициента использования поверхности от частоты линзовой антенны с металло-диэлектрическим (а) и металлическим (б) облучателем: трехлучевая антенна (1), многолучевая антенна (2)

Как видно на рисунках, имеются небольшие отличия коэффициентов усиления и величин КИПа однолучевых и многолучевых антенн, что говорит о слабом влиянии затенения на характеристики излучения антенн, особенно в случае металлических облучателей. Однако уровень пересечения диаграмм направленности соседних лучей (рис. 8) в случае металлических облучателей (9 дБ) существенно ниже, чем в случае металло-диэлектрических облучателей (6 дБ). При этом несмотря на неполное использование апертуры КИП многолучевых антенн с двумя типами облучателей во всей исследованной полосе частот превышает величину 0.55.

## Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1) Многослойная металло-диэлектрическая геодезическая линза может быть использована в качестве фокусирующего устройства широкополосных многолучевых антенн с полным азимутальным углом обзора.
- 2) Несмотря на отсутствие прямого затенения апертуры заполнение всей круговой фокальной линии облучателями незначительно ухудшает характеристики излучения многолучевой антенны.
- 3) Поскольку затенение апертуры антенны облучающей системой связано с дифракционными эффектами, следует ожидать его уменьшения при увеличении электрического размера линзы.

**Финансирование:** Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме 0030-2019-006.

## Литература

1. Guo Y. J. et al. Quasi-optical multi-beam antenna technologies for B5G and 6G mmWave and THz networks: A review //IEEE Open Journal of Antennas and Propagation. – 2021. – Vol. 2. – P. 807-830.
2. Denisov D. V. et al. Base station multibeam antenna for 5G network based on the lunenburg lens structure //2021 XV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems Of Electronic Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2021. – P. 260-263.
3. Захаров Е. В. и др. Гибридные диэлектрические линзовые антенны средств связи сантиметрового и миллиметрового диапазонов //Журнал радиоэлектроники. – 2020. – №. 2. <http://jre.cplire.ru/jre/feb20/3/text.pdf>
4. Kaloshin V., Tien T. T., Venetskiy A. Layered Gradient Cylindrical Lens with Axial Symmetry //2022 IEEE 8th All-Russian Microwave Conference (RMC). – IEEE, 2022. – P. 195-198. <https://doi.org/10.1109/RMC55984.2022.10079354>

5. Венецкий А.С., Калошин В.А., Чан Тиен Тханг. Многолучевая антенна с полным азимутальным углом обзора на основе слоистой металлодиэлектрической цилиндрической линзы //Журнал радиотехники и электроники. – 2023. – Т.68. – №6. – С. 674-681.  
<https://doi.org/10.1134/S1064226923060165>
6. Венецкий А.С., Калошин В.А., Чан Тиен Тханг. Общее решение задачи синтеза геодезической линзы с центральной симметрией и диэлектрическим заполнением //Журнал радиотехники и электроники. – 2023. – Т.68. – №5. – С.489. <https://doi.org/10.1134/S1064226923050170>
7. Мальцев В.П., Нефедов Е.И., Шевченко В.В. // Изв. Вузов. СССР. Радиофизика. – 1969. – Т.12. – №12. – С.1855-1861.

**Для цитирования:**

Венецкий А.С., Калошин В.А., Чан Тиен Тханг. Многолучевая антенна с полным азимутальным углом обзора на основе многослойной геодезической линзы с осевой симметрией. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2023. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.7.2>