

УДК 621.396.01

**НЕОБХОДИМЫЕ УСЛОВИЯ ФИЗИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗУЕМОСТИ
БИФОКАЛЬНОГО ЛИНЗОВОГО КОЛЛИМАТОРА****М.А. Степанов, Ю.С. Никулина***Новосибирский государственный технический университет*

Рассматриваются условия физической реализуемости одной из разновидностей апланатических линзовых коллиматоров – бифокального линзового коллиматора, имеющего две точки идеальной фокусировки, не лежащих на главной оптической оси. На основе взаимосвязи параметров, задаваемых при проектировании бифокального линзового коллиматора (размер раскрытия, толщина, фокусное расстояние, расстояние от главной оптической оси до точки фокуса, наклон фазового фронта в раскрытии), сформулированы условия, выполнение которых необходимо для синтеза физически реализуемого коллиматора. Решение поставленной задачи базируется на свойствах эллипса равных краев и геометрии бифокального линзового коллиматора. Приводятся и анализируются графические зависимости полученных выражений. На основе этого анализа определена взаимная зависимость параметров, задаваемых в начале вычислений поверхности линзы. Записаны системы неравенств, устанавливающие условия реализуемости бифокального линзового коллиматора. Записан ряд ограничений на начальные параметры бифокального линзового коллиматора. Выполнение полученных в статье неравенств является необходимым условием физической реализуемости бифокального линзового коллиматора.

Ключевые слова: бифокальный линзовый коллиматор, эллипс равных краев, физическая реализуемость.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-68-78

Введение

Использование одноповерхностных асферических линзовых антенн в качестве коллиматора имеет существенный недостаток. Смещения облучателя из точки фокуса линзы в перпендикулярном к главной оптической оси направлении приводят к искажениям фазового фронта в ее раскрытии.

Апланатические линзовые коллиматоры позволяют осуществлять широкоугольное сканирование без искажения формы диаграммы направленности путем большого смещения облучателя из фокуса. Расчет апланатических линз достаточно полно рассмотрен в оптике [1, 2], апланатические линзовые коллиматоры рассмотрены в [3–5].

Одной из разновидностей апланатических линзовых коллиматоров являются бифокальные, которые рассматриваются в литературе [6–8].

Бифокальные линзовые антенны имеют две преломляющие поверхности и две симметричные точки идеальной фокусировки, расположенные не на главной оптической оси. При облучателе, расположенном в любой из этих двух точек, в раскрытии коллиматора получается плоский фазовый фронт, наклоненный на задаваемый на этапе расчета коллиматора угол $\pm\alpha$, который определяется относительно раскрытия линзового коллиматора.

Из литературы известен ряд методов построения поверхности бифокальных линзовых коллиматоров [9–12], однако они являются трудоемкими, приближенными и не всегда позволяют получить физически реализуемую поверхность линзового коллиматора.

Одна из проблем заключается в следующем. Геометрия коллиматора и возможности его физической реализуемости существенно зависят от таких параметров, как фокусное расстояние, размер апертуры антенны, расстояние от фокуса до главной оптической оси коллиматора, а также угол наклона фазового фронта относительно главной оптической оси в раскрыве линзы [9]. По сути, синтез любого бифокального линзового коллиматора начинается с задания этих параметров.

В литературе отмечается, что не всякий набор таких параметров позволяет получить набор точек, аппроксимирующих поверхности линзового коллиматора, и не всегда полученный набор точек позволяет реализовать физически реализуемую линзовую антенну [9]. Поэтому зачастую успех проектирования зависит от опыта проектировщика.

Однако рекомендаций ни по выбору конкретных значений величин, ни даже диапазона, в котором они могут лежать, в литературе не приводится. Это определяет цель настоящей работы: на основе взаимосвязи параметров, задаваемых при проектировании бифокального линзового коллиматора, сформулировать условия, выполнение которых необходимо для синтеза физически реализуемого коллиматора.

1. Теория

Синтез бифокальной линзы начинается с задания таких параметров, как фокусное расстояние X_B , размер апертуры антенны Y_B , расстояние от фокуса до главной оптической оси линзы a , а также угол наклона фазового фронта относительно главной оптической оси в раскрыве линзы α (рис. 1). Геометрия линзы и возможности ее физической реализуемости существенно зависят от этих параметров. Определим условия, накладываемые на перечисленные параметры и гарантирующие синтез коллиматора.

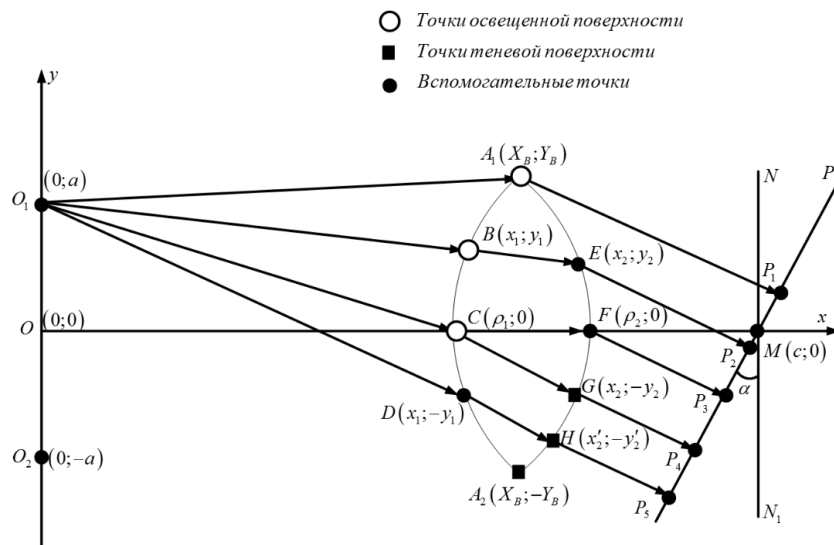


Рис. 1 – Геометрия бифокальной линзовой антенны
 Fig. 1 – Geometry of the bifocal lens antenna

Согласно [10], при построении бифокальной линзовой антенны необходимо, чтобы освещенная и теневая поверхности лежали по разные стороны от кривой эллипса равных краев:

$$x^2 + y^2 \cos^2 \alpha = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha .$$

Так как кривая эллипса равных краев проходит через вершины линзы, то, подставив ее координаты, получаем уравнение

$$X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha. \quad (1)$$

Кроме того, кривая эллипса краев пересекает главную оптическую ось (ось x на рис. 1) в некоторой точке с координатами $(x, y) = (X_B + s, 0)$. Тогда из (1) получаем уравнение

$$(X_B + s)^2 = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha, \quad (2)$$

где s – параметр, определяющий кривизну эллипса краев.

Используя уравнения (1) и (2), составляем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha; \\ (X_B + s)^2 = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha. \end{cases} \quad (3)$$

Получим зависимость угла наклона фазового фронта α от размера апертуры линзы Y_B , кривизны эллипса краев s и фокусного расстояния X_B .

Для этого раскроем скобки и перенесем одинаковые слагаемые по одну сторону каждого уравнения:

$$\begin{cases} Y_B^2 \cos^2 \alpha = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - X_B^2; \\ 2X_B s + s^2 = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - X_B^2. \end{cases}$$

Получаем уравнение

$$Y_B^2 \cos^2 \alpha = 2X_B \cdot s + s^2. \quad (4)$$

Отсюда выражаем α :

$$\alpha(X_B, Y_B, s) = \arccos \left(\frac{\sqrt{2X_B \cdot s + s^2}}{Y_B} \right). \quad (5)$$

Получим также зависимость расстояния от облучателя до главной оптической оси a от размера апертуры линзы Y_B , кривизны эллипса краев s и угла наклона фазового фронта α .

Для этого в (3) выразим X_B из первого уравнения и подставим во второе:

$$\begin{cases} X_B = \sqrt{a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - Y_B^2 \cos^2 \alpha}; \\ 2X_B \cdot s + s^2 = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - X_B^2. \end{cases}$$

Получим

$$2\sqrt{a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - Y_B^2 \cos^2 \alpha} \cdot s + s^2 = a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - \left(\sqrt{a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - Y_B^2 \cos^2 \alpha} \right)^2.$$

После раскрытия скобок и приведения подобных

$$2\sqrt{a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - Y_B^2 \cos^2 \alpha} \cdot s = Y_B^2 \cos^2 \alpha - s^2.$$

Возведем обе части уравнения в квадрат:

$$4s^2 \cdot a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - 4s^2 \cdot Y_B^2 \cos^2 \alpha = Y_B^4 \cos^4 \alpha - 2Y_B^2 \cdot s^2 \cos^2 \alpha + s^4.$$

И выразим a :

$$a = \frac{\sqrt{Y_B^4 \cos^4 \alpha + s^4 + 2s^2 Y_B^2 \cos^2 \alpha}}{2s \operatorname{ctg} \alpha} = \frac{\pm (Y_B^2 \cos^2 \alpha + s^2)}{2s \operatorname{ctg} \alpha}.$$

Таким образом, получаем зависимость расстояния от облучателя до главной оптической оси a от размера апертуры линзы Y_B , кривизны эллипса краев s и угла наклона фазового фронта α :

$$a(Y_B, \alpha, s) = \pm \frac{s^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha}{2s \operatorname{ctg} \alpha}. \quad (6)$$

Определим из системы уравнений (3) зависимость кривизны эллипса краев от угла наклона фазового фронта, от размера апертуры линзы Y_B и фокусного расстояния X_B . Для этого решим уравнение (4) как квадратное уравнение через дискриминант:

$$\begin{aligned} s^2 + 2X_B \cdot s - Y_B^2 \cos^2 \alpha &= 0; \\ D &= (2X_B)^2 - 4 \cdot 1(-Y_B^2 \cos^2 \alpha) = 4(X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha); \\ x_{1,2} &= \frac{-2X_B \pm \sqrt{4(X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha)}}{2 \cdot 1} = -X_B \pm \sqrt{X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha}. \end{aligned}$$

Таким образом, получается, что кривизна эллипса равных краев зависит от угла наклона фазового фронта, от размера апертуры линзы Y_B и фокусного расстояния X_B :

$$s(X_B, Y_B, \alpha) = -X_B \pm \sqrt{X_B^2 + Y_B^2 \cos^2 \alpha}. \quad (7)$$

2. Графические зависимости

Графически полученные зависимости показаны на рис. 2–5.

По полученным зависимостям (5)–(7) (рис. 2–5) можно сделать следующие выводы. При одинаковом фокусном расстоянии с увеличением диаметра и уменьшением кривизны эллипса равных краев происходит увеличение угла наклона фазового фронта и расстояния от главной оптической оси до фокуса. При идентичных углах наклона фазового фронта с увеличением диаметра линзы и уменьшением кривизны эллипса равных краев происходит увеличение расстояния от начала координат до вершины линзы X_B . При одинаковом расстоянии от главной оптической оси до фокуса с увеличением диаметра линзы и уменьшением кривизны эллипса равных краев происходит увеличение расстояния от начала координат до вершины линзы X_B .

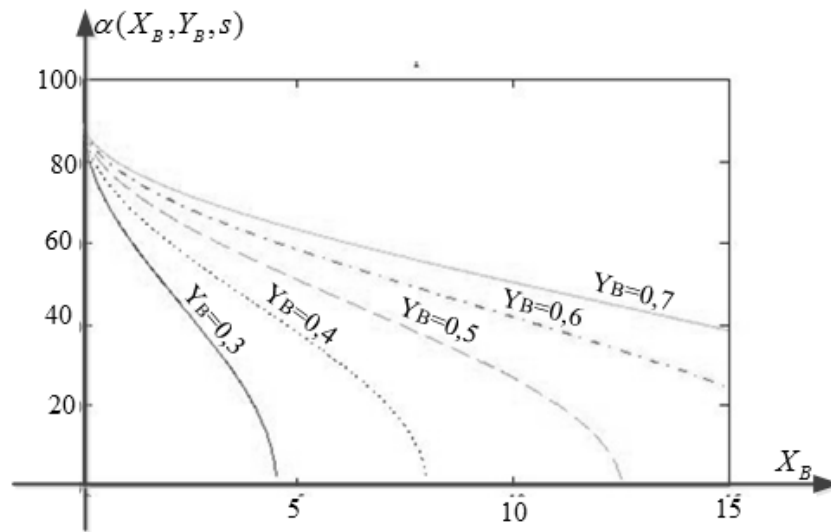


Рис. 2 – Зависимость угла наклона фазового фронта от кривизны линзы, фокусного расстояния и размера апертуры антенны $\alpha(X_B, Y_B, s)$, $s = 0,01$ при различных размерах апертуры линзы Y_B (по выражению 4)

Fig. 2 – The dependence of the angle of the phase front inclination on the lens curvature, focal length and size of the antenna aperture $\alpha(X_B, Y_B, s)$, $s = 0,01$ for various sizes of the Y_B lens aperture (according to expression 4)

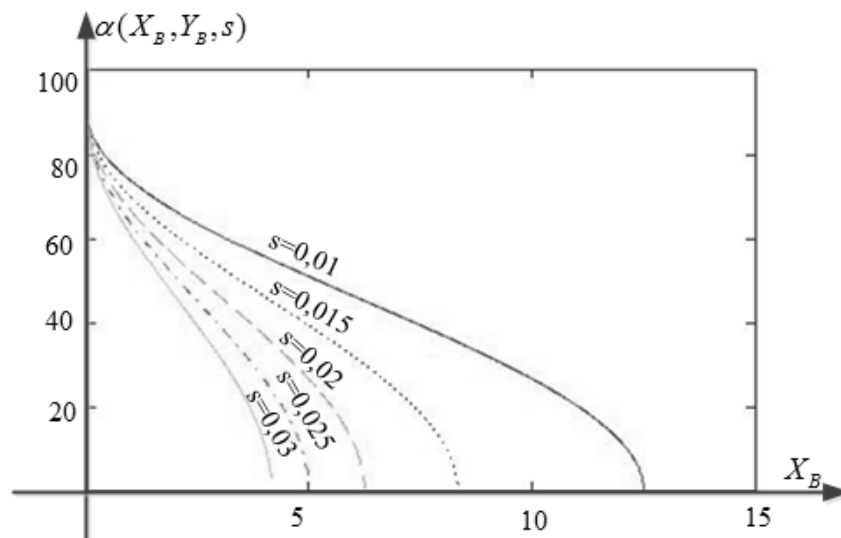


Рис. 3 – Зависимость угла наклона фазового фронта от размера апертуры антенны и кривизны эллипса краев, фокусного расстояния $\alpha(X_B, Y_B, s)$, $Y_B = 0,5$ м при различных значениях кривизны эллипса краев s (по выражению 4)

Fig. 3 – Dependence of the angle of the phase front inclination on the antenna aperture size and the curvature of the ellipse of the edges, the focal length $\alpha(X_B, Y_B, s)$, $Y_B = 0,5$ m for various values of the ellipse curvature of edges s (according to expression 4)

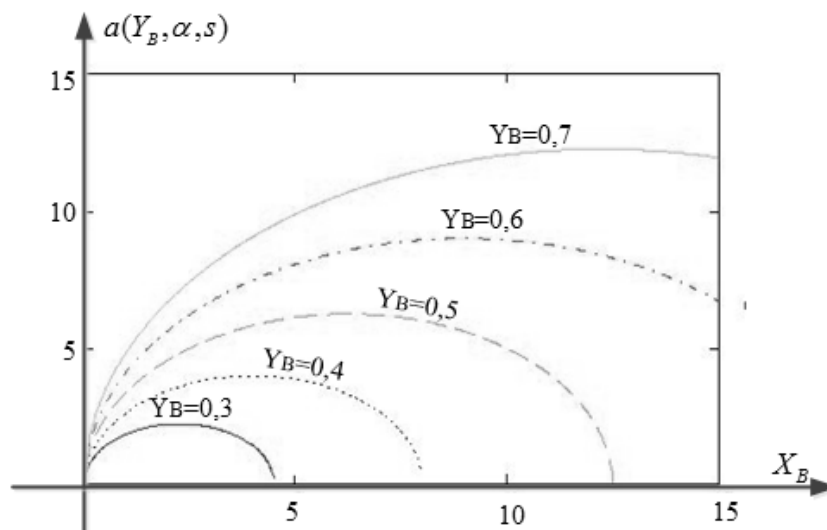


Рис. 4 – Зависимость расстояния от облучателя до главной оптической оси от радиуса и кривизны линзы, фокусного расстояния $\alpha(Y_B, a, s)$, $s = 0,01$, при различных размерах апертуры линзы Y_B (по выражению 5)
 Fig. 4 – Dependence of the distance from the irradiator to the main optical axis on the radius and curvature of the lens, focal length, $s = 0,01$, for various sizes of the lens aperture Y_B (according to expression 5)

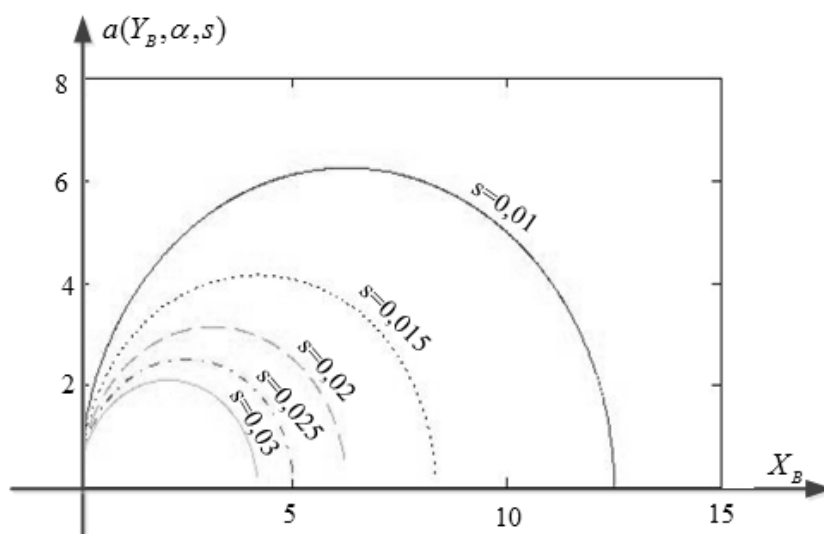


Рис. 5 – Зависимость расстояния от облучателя до главной оптической оси от радиуса и кривизны линзы, фокусного расстояния $\alpha(Y_B, a, s)$, $Y_B = 0,5$ м, при различных значениях кривизны эллипса краев s (по выражению 5)
 Fig. 5 – Dependence of the distance from the irradiator to the main optical axis on the radius and curvature of the lens, focal length $\alpha(Y_B, a, s)$, $Y_B = 0,5$ m, for various values of the ellipse curvature of edges s (according to expression 5)

Кривизна эллипса краев при одинаковых углах наклона фазового фронта с увеличением диаметра линзы возрастает. С увеличением углов наклона фазового фронта кривизна эллипса равных краев при равных размерах апертуры антенны крайне убывает.

Кривизна эллипса краев при одинаковых углах наклона фазового фронта или при одинаковых размерах апертуры антенны с увеличением фокусного расстояния и размера апертуры линзы возрастает.

3. Условия реализуемости бифокального линзового коллиматора

Полученные зависимости позволяют определить взаимную зависимость параметров, задаваемых в начале вычислений поверхности линзы.

Исходными параметрами, при проектировании линзового коллиматора являются: Y_B – координата вершины линзы (определяется размером апертуры исследуемой антенны); a – расстояние от главной оптической оси до точки фокуса (определяется требуемым диапазоном перемещения облучателя); X_B – фокусное расстояние (определяется размером радиобезэховой камеры). Свободными параметрами остаются α – угол наклона фазового фронта в раскрыте линзового коллиматора и s – параметр, определяющий кривизну. Они выбираются такими, чтобы выполнялись равенства (5) и (6).

Из геометрии линзы (рис. 1) следует ряд условий, накладываемых на исходные параметры и определяющих физическую реализуемость линзы [171].

Это означает, что координата вершины линзы ($x = X_B$), а также координаты точек освещенной и теневой поверхности (x_{1N} и x_{2N} соответственно) должны быть расположены между координатой облучателя ($x = 0$) и координатой исследуемой антенны ($x = c$).

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 < X_B < c; \\ 0 < \rho_1 < a \operatorname{ctg} \alpha; \\ 0 < x_{1N} < a \operatorname{ctg} \alpha; \\ a \operatorname{ctg} \alpha < x_{2N} < c; \\ a \operatorname{ctg} \alpha < \rho_2 < c; \\ -Y_B < y_{1N} < Y_B; \\ -Y_B < y_{2N} < Y_B. \end{array} \right. \quad (8)$$

Точки освещенной и теневой поверхности также должны находиться в указанном диапазоне. Кроме того, как уже говорилось ранее, точки освещенной поверхности должны быть расположены по одну сторону от кривой эллипса равных краев ($a \operatorname{ctg} \alpha$), а точки теневой поверхности – по другую [10]. Координаты точек, освещенной и теневой поверхности (y_{1N} и y_{2N} соответственно) должны быть расположены между координатами вершин линзы ($y = Y_B$ и $y = -Y_B$).

Из уравнения эллипса равных краев следует, что должно выполняться неравенство

$$\frac{a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - X_B^2}{\cos^2 \alpha} \geq 0.$$

Это неравенство выполняется в случае, если

$$a^2 \operatorname{ctg}^2 \alpha - X_B^2 \geq 0.$$

Отсюда

$$-a \operatorname{ctg} \alpha \leq X_B \leq a \operatorname{ctg} \alpha. \quad (9)$$

Длины лучей физически реализуемой линзы не могут быть отрицательными. Отсюда следует ряд условий, определяющих начальные параметры бифокального линзового коллиматора.

Длину луча, проходящего из точки фокуса $O_1(0; a)$ через верхний край линзы с координатами $(X_B; Y_B)$, можно найти по выражению

$$O_1 A_1 = \sqrt{X_B^2 + (Y_B - a)^2}. \quad (10)$$

Длину другого луча, от края линзы с координатами $(X_B; Y_B)$ до точки, лежащей на поверхности фазового фронта (см. рис. 1), P_1 , можно найти по выражению

$$A_1 P_1 = (c - X_B + Y_B \operatorname{tg} \alpha) \cos \alpha. \quad (11)$$

Длина этого луча всегда будет положительна.

Отсюда

$$X_B < c + Y_B \cos \alpha, \quad \text{если} \quad \cos \alpha > 0 \left(\alpha \in \left(-\frac{\pi n}{2}; \frac{\pi n}{2} \right), n \in Z \right), \quad (12)$$

$$X_B > c + Y_B \cos \alpha, \quad \text{если} \quad \cos \alpha < 0 \left(\alpha \in \left(\frac{\pi n}{2}; \frac{3\pi n}{2} \right), n \in Z \right). \quad (13)$$

Длина луча CG определяется из геометрии линзы:

$$CG(\rho_1, x_2) = \frac{x_2 - \rho_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{a}{\rho_1 n} \right)^2}} > 0.$$

Отсюда следует, что

$$-\rho_1 n < a < \rho_1 n. \quad (14)$$

Выражения, описывающие лучи GP_4 , EP_2 и HP_5 , записывают исходя из того, что фазовый фронт должен быть перпендикулярен лучам:

$$GP_4(x_2, y_2) = \cos \alpha (c - x_2) + \sin(\alpha) y_2 > 0;$$

$$EP_2 = |\cos \alpha (c - x_2) - \sin(\alpha) y_2|;$$

$$HP_5(x'_2, y'_2) = |\cos \alpha (c - x'_2) - \sin(\alpha) y'_2|.$$

Отсюда следующее ограничение:

$$c > x_2 + \operatorname{tg}(\alpha) y_{2N}.$$

Так как y_{2N} лежит в пределах от $-Y_B$ до Y_B , следовательно,

$$\begin{cases} c > x_2 + \operatorname{tg}(\alpha)Y_B, & \text{если } \operatorname{tg} \alpha > 0 \left(\alpha \in \left(\pi n; \frac{\pi}{2} + \pi n \right), n \in Z \right); \\ c > x_2 - \operatorname{tg}(\alpha)Y_B, & \text{если } \operatorname{tg} \alpha < 0 \left(\alpha \in \left(\frac{\pi}{2} + \pi n; \pi + \pi n \right), n \in Z \right). \end{cases} \quad (15)$$

Заключение

Определены неравенства, устанавливающие условия реализуемости бифокального линзового коллиматора. Записан ряд ограничений (8) – (15) на начальные параметры бифокальной линзовой антенны (фокусное расстояние, расстояние от облучателя до главной оптической оси, угол наклона фазового фронта).

Выполнение неравенств является необходимым условием физической реализуемости бифокального линзового коллиматора.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Martin L.C.** Wide-aperture aplanatic single lenses // Proceedings of the Physical Society. – 1944. – Vol. 56, N 2. – P. 104–113.
2. **Wassermann G., Wolf E.** On the theory of aplanatic aspheric systems // Proceedings of the Physical Society. Section B. – 1942. – Vol. 62. – P. 2–8.
3. **Sternberg R.L.** Successive approximation and expansion methods in the numerical design of microwave dielectric lenses // Journal of Mathematics and Physics. – 1955. – Vol. 34, N 1–4. – P. 209–235.
4. **Friedlander F.G.** A dielectric-lens aerial for wide-angle beam scanning // Journal of the Institution of Electrical Engineers. Part IIIA: Radiolocation. – 1946. – Vol. 93, N 4. – P. 658–662.
5. **Bekefi G., Farnell G.W.** A homogeneous dielectric sphere as a microwave lens // Canadian Journal of Physics. – 1956. – Vol. 34 (8). – P. 790–803.
6. High-efficiency dual-band bifocal metalens based on reflective metasurface / R. Xie, Y. Liu, T. Wang, G. Zhai, J. Gao, J. Ding // 2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM 2019): Proceedings. – Shanghai, China, 2019. – P. 1–3.
7. **Калошин В.А., Нгием Х.Д.** Синтез и анализ диэлектрических бифокальных линз // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 8. – С. 1–15.
8. Сканирующая тороидально-бифокальная линзовая антенная система диапазона 57–64 ГГц / А.А. Мальцев, В.М. Селезнев, А.С. Рульков, О.В. Болховская // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 36–47.
9. **Жук М.С., Молочков Ю.Б.** Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств. – М.: Энергия, 1973. – 440 с.
10. **Зелкин Е.Г., Петрова Р.А.** Линзовые антенны. – М.: Советское радио, 1974. – 280 с.
11. **Brown R.** Dielectric bifocal lenses // 1958 IRE International Convention Record. – 1956. – Vol. 4. – P. 180–187.
12. Bifocal wide angle lens with optimized construction algorithm for 60 GHz / H. Gulan, S. Marahrens, C. Rusch, B. Goettel, T. Zwick // 2014 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Novel EM Structures and Materials, and Applications (iWAT). – Sydney, NSW, Australia, 2014. – P. 43–46.

**NECESSARY CONDITIONS OF PHYSICAL REALIZABILITY
OF THE BIFOCAL LENS COLLIMATOR****Stepanov M.A., Nikulina Yu.S.***Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The conditions of physical realizability of one of the varieties of aplanatic lens collimators, a bifocal lens collimator, which has two points of perfect focus and do not lie on the main optical axis, are considered. Based on the relationship of the parameters specified during the design of the bifocal lens collimator (aperture size, thickness, focal length, distance from the main optical axis to the focal point, tilt of the phase front in the aperture), conditions that are necessary for the synthesis of a physically feasible collimator are formulated. The solution of this problem is based on the properties of an ellipse of equal edges and the geometry of a bifocal lens collimator. The graphic dependencies of the obtained expressions are given and analyzed. Based on this analysis, the mutual dependence of the parameters specified at the beginning of the calculation of the lens surface is determined. Systems of inequalities that establish the conditions for the realizability of a bifocal lens collimator are written. A number of restrictions on the initial parameters of the bifocal lens collimator are recorded. The fulfillment of the inequalities obtained in the article is a necessary condition for the physical realizability of the bifocal lens collimator.

Keywords: bifocal lens collimator, ellipse of equal edges, physical realizability.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-68-78

REFERENCES

1. Martin L.C. Wide-aperture aplanatic single lenses. *Proceedings of the Physical Society*, 1944, vol. 56, no. 2, pp. 104–113.
2. Wassermann G., Wolf E. On the theory of aplanatic aspheric systems. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1942, vol. 62, pp. 2–8.
3. Sternberg R.L. Successful approximation and expansion methods in the numerical design of microwave dielectric lenses. *Journal of Mathematics and Physics*, 1955, vol. 34, no. 1–4, pp. 209–235.
4. Friedlander F.G. A dielectric-lens aerial for wide-angle beam scanning. *Journal of the Institution of Electrical Engineers. Part IIIA: Radiolocation*, 1946, vol. 93, no. 4, pp. 658–662.
5. Bekefi G., Farnell G.W. A homogeneous dielectric sphere as a microwave lens. *Canadian Journal of Physics*, 1956, vol. 34 (8), pp. 790–803.
6. Xie R., Liu Y., Wang T., Zhai G., Gao J., Ding J. High-efficiency dual-band bifocal metalens based on reflective metasurface. *2019 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM 2019)*, Shanghai, China, 2019, pp. 1–3.
7. Kaloshin V.A., Ngiem H.D. Sintez i analiz dielektricheskikh bifokal'nykh linz [Synthesis and analysis of dielectric bifocal lenses]. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radioelectronics*, 2018, no. 8, pp. 1–15.
8. Maltsev A.A., Seleznev V.M., Rulkov A.S., Bolkhovskaya O.V. Skaniruyushchaya toroidal'no-bifokal'naya linzovaya antennaya sistema diapazona 57–64 GGts [Steerable toroidal bifocal lens-array antenna in 57–64 GHz range]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii Rossii. Radioelektronika = Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*, 2019, vol. 22, no. 3, pp. 36–47.
9. Zhuk M.S., Molochkov Yu.B. *Proektirovanie linzovykh, skaniruyushchikh, shirokodiapazonnykh antenn i fidernykh ustroystv* [Design of lens, scanning, wide-range antennas and feeder devices]. Moscow, Energiya Publ., 1973. 440 p.
10. Zelkin E.G., Petrova R.A. *Linzovye anteny* [Lens antennas]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1974. 280 p.
11. Brown R. Dielectric bifocal lenses. *1958 IRE International Convention Record*, 1956, vol. 4, pp. 180–187.
12. Gulan H., Marahrens S., Rusch C., Goettel B., Zwick T. Bifocal wide angle lens with optimized construction algorithm for 60 GHz. *2014 International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Novel EM Structures and Materials, and Ap-plications (iWAT)*, Sydney, NSW, Australia, 2014, pp. 43–46.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Степанов Максим Андреевич – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: моделирование сложной радиолокационной обстановки в реальном масштабе времени. Опубликовано более 80 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).

Stepanov Maksim Andreevich, Doctor of Sciences (Eng.), associate professor, associate professor of the department of radio receivers and radio transmitting devices in the Novosibirsk State Technical University. His research interests include real-time modeling of complex radar conditions. He has published over 80 research papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: m.stepanov@corp.nstu.ru).



Никулина Юлия Сергеевна – аспирант кафедры радиоприемных и радиопередающих устройств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: синтез диэлектрических линзовых коллиматоров. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: julija.wo@mail.ru).

Nikulina Julia Sergeevna, a graduate student at the Department of Radio and Radio Transmitting Devices in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests include synthesis of dielectric lens collimators. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: julija.wo@mail.ru).

Статья поступила 28 мая 2020 г.

Received May 28, 2020

To Reference:

Stepanov M.A., Nikulina Yu.S. Neobkhodimye usloviya fizicheskoi realizuемости bifokal'nogo linzovogo kollimatora [Necessary conditions of physical realizability of the bifocal lens collimator]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 1–2 (46–47), pp. 68–78. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-1-2-68-78.