

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.19>

УДК: 621.396.67

ДВУХЗЕРКАЛЬНАЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ АНТЕННАЯ СИСТЕМА С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

В. А. Калошин¹, Ви Ут Нам²

¹ Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125007, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, стр. 7

² Московский физико-технический институт (НИУ),
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер. 9

Статья поступила в редакцию 29 июля 2021 г.

Аннотация. Развита методика синтеза двухзеркальных цилиндрических антенных систем по заданному амплитудному распределению в апертуре. На первом этапе проводится синтез в приближении геометрической оптики, на втором этапе находится уточненное решение с использованием поля облучателя, найденного на вспомогательном зеркале численным методом конечных элементов. В качестве примера синтезирована двухзеркальная цилиндрическая антенная система с рупорно-линзовым облучателем и равномерным распределением поля в апертуре главного зеркала. С использованием электродинамического моделирования методом конечных элементов проведен анализ характеристик излучения синтезированной двухзеркальной антенной системы. Исследованы характеристики сканирования антенной системы за счет поворота главного зеркала.

Ключевые слова: антенна, двухзеркальная, цилиндрическая, рупорно-линзовый облучатель.

Abstract. A technique for the synthesis of two-mirror cylindrical antenna systems for a given amplitude distribution in the aperture has been developed. At the first stage

geometrical-optical synthesis is carried out, at the second stage a refined solution is found using the field of the feed on the secondary mirror found by the numerical method of finite element. As an example, a two-mirror cylindrical antenna system with a horn-lens feed and a uniform field distribution in the main mirror aperture has been synthesized. Using full-wave simulation by the finite element method, the analysis of the radiation characteristics of a synthesized two-mirror antenna system is carried out. The scanning characteristics of the antenna system by turning the main mirror are investigated. The efficiency of a cylindrical two-mirror antenna system with a horn-lens waveguide transition in the E-plane and an H- sectorial horn feed reaches 0.95 i.e. is close to the limiting value. When scanning the main lobe of the pattern in an angular sector of 27 degrees due to the rotation of the main mirror gain exceeds 26 dB, and efficiency exceeds 0.8.

Key words: antenna, two-mirror, cylindrical, horn-lens feed.

Введение.

Цилиндрические зеркала фокусируют падающее на них поле только в одной плоскости. Для фокусировки в двух плоскостях можно использовать два ортогонально расположенных параболических цилиндрических зеркала или линзу и зеркало, а также гибридную зеркальную антенну в виде параболического цилиндра и расположенную вдоль его фокальной линии линейную решетку облучателей. В последнем случае при расположении фокальной линии в Е-плоскости можно реализовать достаточно высокий уровень величины КИП (до 0.9 [1]).

Дальнейшее увеличение величины КИП можно обеспечить использованием двухзеркальной цилиндрической системы с распределением поля в апертуре главного зеркала, близким к равномерному. Решение этой задачи является целью данной работы.

1. Двухмерная задача синтеза двухзеркальной системы по заданному амплитудному распределению.

Рассмотрим двухмерную задачу синтеза двухзеркальной системы, геометрия которой показана на рис. 1.

Двухзеркальная система, содержащая главное (1) и вспомогательное (2) зеркало, возбуждается источником цилиндрической волны, расположенным в начале декартовой системы координат (x,y).

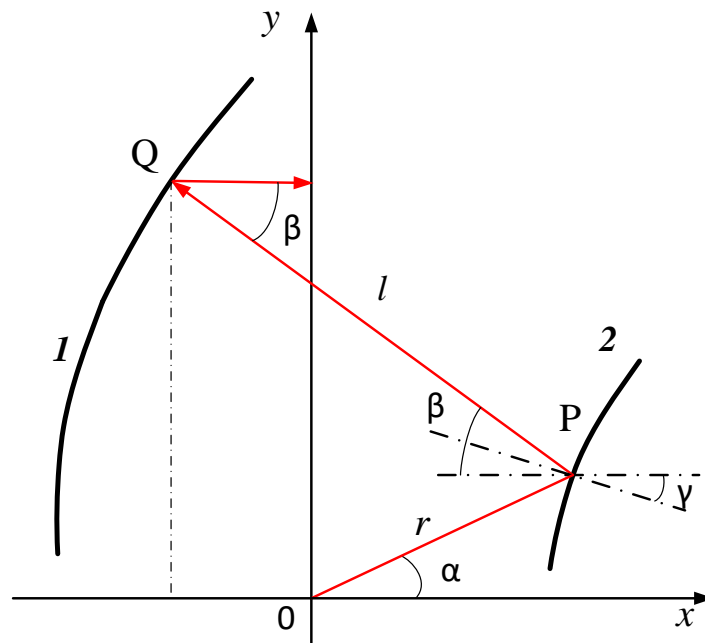


Рис. 1. Геометрия двухзеркальной системы.

Рассмотрим задачу синтеза формы зеркал системы, которая формирует на выходе линейный фронт с заданным $E_{out}(y)$ амплитудным распределением при заданном угловом распределении амплитуды поля источника $E(\alpha)$ в пределах сектора углов $\alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max}$ (угол α показан на рис. 1). Для остальных значений угла α будем полагать $E(\alpha) = 0$. При этом поля $E(\alpha)$ и $E_{out}(y)$ удовлетворяют условию закону сохранения энергии, который в приближении геометрической оптики имеет вид:

$$\int_{\alpha_{min}}^{\alpha} E^2(\alpha) d\alpha = C \int_{y_{min}}^{y(\alpha)} E_{out}^2(y) dy, \quad (1)$$

где $C = \frac{\int_{\alpha_{min}}^{\alpha_{max}} E^2(\alpha) d\alpha}{\int_{y_{min}}^{y_{max}} E_{out}^2(y) dy}.$

В случае равномерного амплитудного распределения на выходе системы ($E_{\text{out}}(y)=E_0$) функция отображения $y(\alpha)$ определяется выражением:

$$y(\alpha) = \frac{1}{CE_0} \int_{\alpha_{\min}}^{\alpha} E^2(\alpha) d(\alpha) + y_{\min}. \quad (2)$$

Далее используем методику решения задачи синтеза по заданной функции отображения, описанную в работах [2 – 4]. Предложим, что луч, который выходит из источника под углом α , падает на вспомогательное зеркало в точке Р (α, r), отражается от него, падает на главное зеркало в точке Q(x_Q, y_Q) и отражается от него параллельно оси X.

Из геометрии задачи (рис. 1) следует, что эйконал этого луча равен $L = r + l - x_Q$, при этом:

$$\begin{cases} r \sin(\alpha) + l \sin(\beta) = y_Q = y(\alpha) \\ r \cos(\alpha) - l \cos(\beta) = x_Q \end{cases}. \quad (3)$$

Учитывая закон отражения, получаем:

$$\frac{dr}{d\alpha} = \operatorname{tg}\left(\frac{\beta + \alpha}{2}\right). \quad (4)$$

Находя β из уравнения (3) и поставляя в (4), получаем дифференциальное уравнение Бернулли:

$$\frac{dr}{d\alpha} + A(\alpha)r + B(\alpha)r^2 = 0, \quad (5)$$

$$\text{где } A(\alpha) = \frac{y(\alpha) \sin(\alpha) + L(1 - \cos(\alpha))}{y(\alpha)(1 - \cos(\alpha)) - L \sin(\alpha)} \text{ и } B(\alpha) = \frac{-2(1 - \cos(\alpha))}{y(\alpha)(1 - \cos(\alpha)) - L \sin(\alpha)}. \quad (6)$$

Обозначая $v = l/r$, из (5) получаем:

$$v' + A(\alpha)v + B(\alpha) = 0. \quad (7)$$

Решение линейного дифференциального уравнения (7) имеет вид

$$v(\alpha) = W(\alpha, \alpha_0)v_0 + \int_{\alpha_0}^{\alpha} B(\tau)W(\alpha, \tau)d\tau, \quad (8)$$

где $W(\alpha, \tau) = \exp \int_{\rho}^{\alpha} A(\rho) d\rho$ и $v_0 = v(\alpha_0) = \frac{1}{r(\alpha_0)}$.

Из (6) следует:

$$B(\tau)W(\alpha, \tau) = \frac{1}{L} \frac{\partial}{\partial \tau} ((1 - \cos(\tau))W(\alpha, \tau)). \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8) и заменяя τ на $1/v$, получаем:

$$r(\alpha) = \frac{L}{1 - \cos(\alpha) + \left(\frac{S}{r_0} + \cos(\alpha) - 1\right)W(\alpha, \alpha_0)}. \quad (10)$$

Зная координаты точки Р и требуя равенство эйконалов на выходе, определяем координаты точки Q на главном зеркале:

$$\begin{cases} y_Q = y(\alpha) \\ x_Q = \frac{2r(\alpha)L - L^2 + y(\alpha)^2 - 2r(\alpha)y(\alpha)\sin(\alpha)}{L - r(\alpha)(1 - \cos(\alpha))}. \end{cases} \quad (11)$$

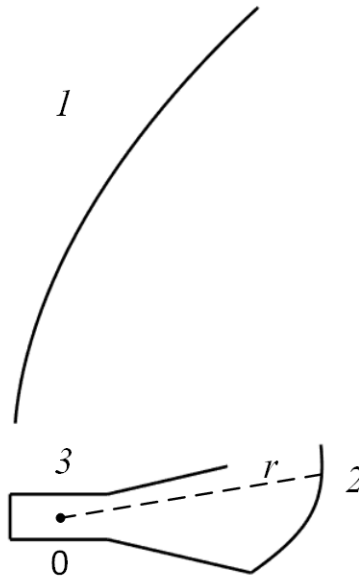


Рис. 2. Двухзеркальная антенная система, 1 - главное зеркало, 2 - вспомогательное зеркало, 3 - рупор

Рассмотрим в качестве источника цилиндрической волны Н-секториальный рупор с углом раствора $2\alpha_0 = 28.6$ градусов, одна из стенок

которого касается вспомогательного зеркала (рис. 2, где 1- главное зеркало, 2- вспомогательное зеркало, 3 – рупорный облучатель).

В приближении геометрической оптики угловое распределение амплитуды поля вблизи источника совпадает с полем рупорной моды и при постоянном радиусе ($r = \text{const}$) имеет вид $E(\alpha) = \cos(\pi\alpha/(2\alpha_0))$. Поставляя это выражение в (2), находим функцию отображения:

$$y(\alpha) = 2(y_{\max} - y_{\min})(\alpha - \alpha_0 + \frac{\sin(\pi\alpha / \alpha_0)}{4\pi}) + y_{\min} . \quad (12)$$

Подставляя выражение (12) в выражения (10), (11), находим форму зеркала. Результаты расчета методом конечных элементов (МКЭ) в среде Ansys HFSS диаграммы направленности (ДН) синтезированной цилиндрической двухзеркальной антенны с апертурой 2000 мм, расположенной внутри планарного металлического волновода с расстоянием между стенками 310 мм и возбужденной описанным выше Н-секториальным рупором на частоте 2.4 ГГц показаны на рис. 3.

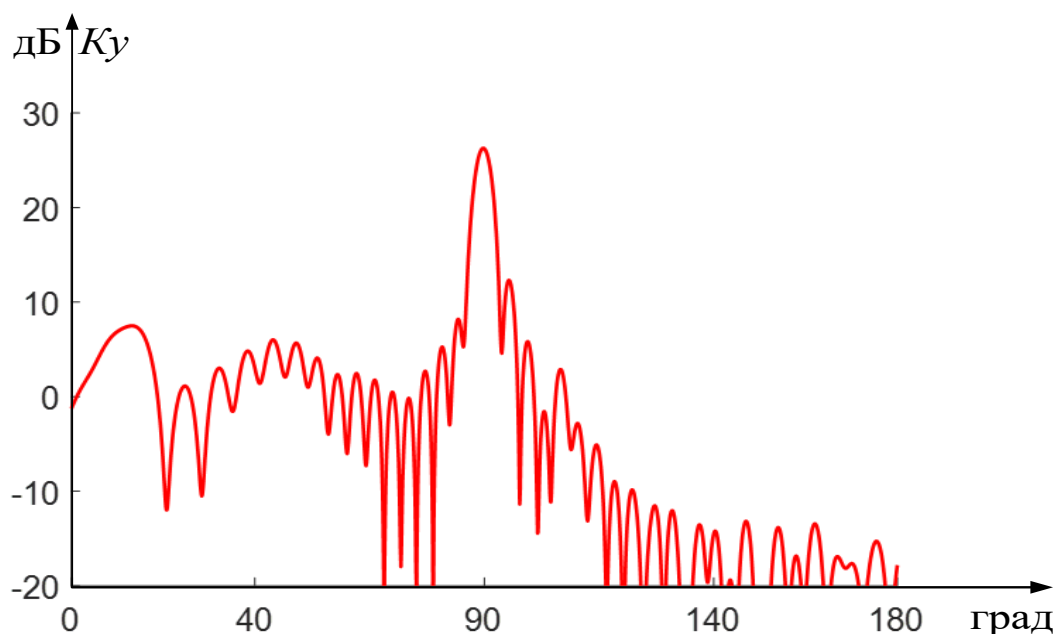


Рис. 3. Коэффициент усиления двухзеркальной антенны в зависимости от угла в Н-плоскости.

Как видно на рис. 3 максимальное значение коэффициента усиления K_u $\text{max} = 26.25$ дБ, что соответствует КИП = 0.85.

Для увеличения величин K_u и КИП антенной системы проведем анализ распределения поля рупора, падающего на зеркало с использованием МКЭ. Это распределение показано на рис. 4 сплошной линией. Пунктирной линией на рисунке показано распределение в приближении геометрической оптики, которое было использовано в процессе синтеза.

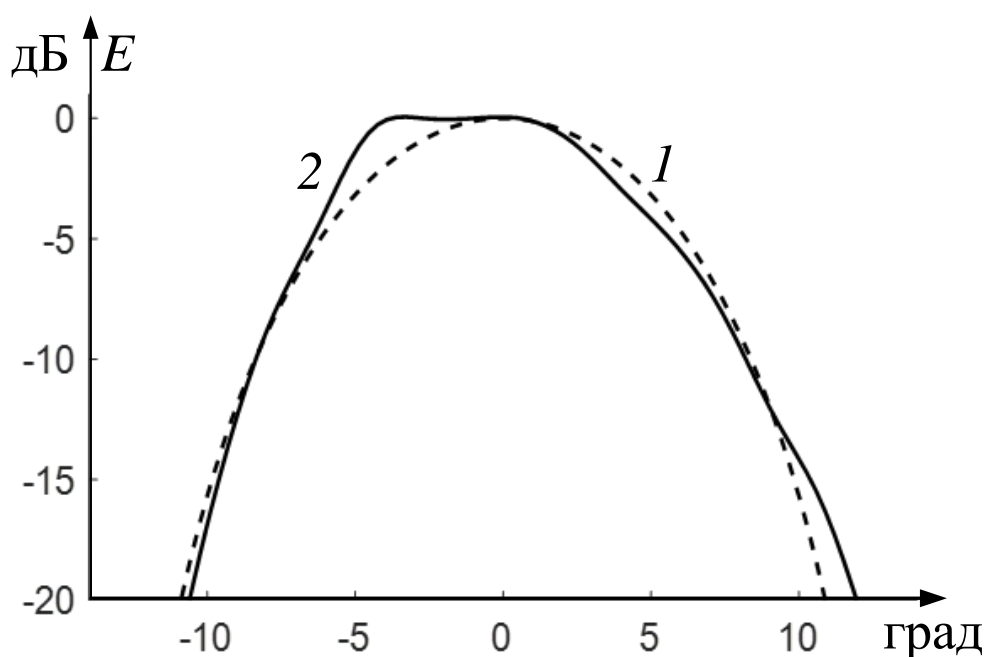


Рис. 4. Распределения амплитуды падающего поля на вспомогательном зеркале: 1- в приближении геометрической оптики, 2 – расчет с использованием МКЭ.

Как видно на рис. 4 кривые 1, 2 отличаются, что объясняется дифракцией рупорной моды на кромке рупора. Это приводит, во-первых, к увеличению переливания мощности источника за край вспомогательного зеркала, а во-вторых, к неточному синтезу равномерного амплитудного распределения в апертуре системы.

Проведем повторный синтез с использованием амплитудного распределения поля рупора на вспомогательном зеркале, рассчитанного МКЭ, и описанную выше методику синтеза.

На рис. 5 показаны амплитудные распределения поля, отраженного от вспомогательного зеркала, на поверхности главного зеркала, а на рис. 6 – ДН синтезированных антенных систем, расположенных внутри описанного выше планарного волновода на частоте 2.4 ГГц.

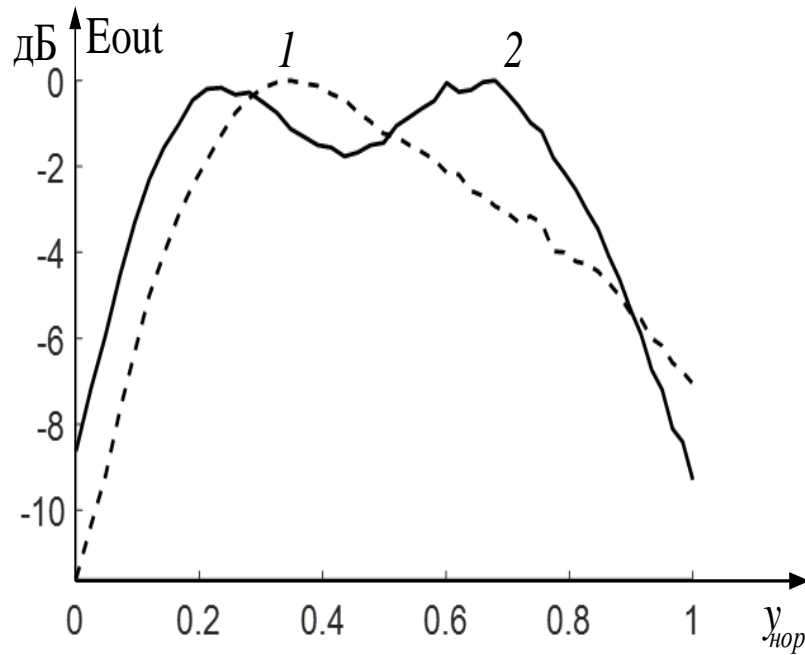


Рис. 5. Нормированное амплитудное распределение поля на поверхности главного зеркала: 1 – синтез с учетом геометрического распределения амплитуды поля на вспомогательном зеркале, 2- синтез с использованием МКЭ

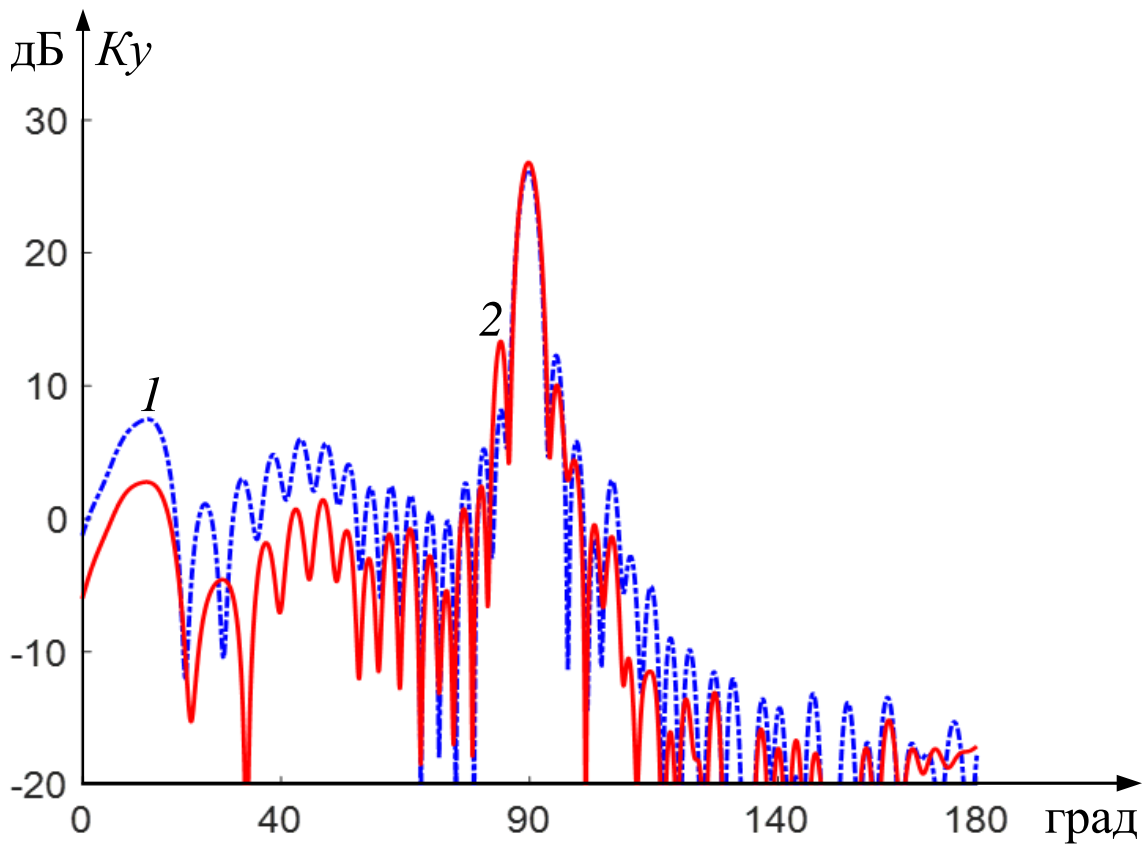


Рис. 6. ДН в Н- плоскости двухзеркальных антенных систем: 1– синтез с учетом геометрического распределения амплитуды поля на вспомогательном зеркале, 2 – синтез с использованием МКЭ.

Как видно на рис. 5, распределение поля на главном зеркале системы, синтезированной с использованием МКЭ, имеет симметричный вид и близко к равномерному (с провалом в центре в пределах 2 дБ).

Как видно на рис. 6, K_u системы, синтезированной с использованием МКЭ, имеет более высокое максимальное значение (26.7 дБ) и более низкий уровень бокового излучения (за исключением первого бокового лепестка).

2. Двухзеркальная цилиндрическая антенная система с рупорно – линзовым волноводным переходом.

Повышение величины K_u антенной системы можно обеспечить увеличением размера апертуры в Е-плоскости. Используем для этого волноводный переход в виде Е-секториального рупора с диэлектрической линзой, оптимизированный и исследованный в работе [5]. Соответствующая антенная система с размером апертуры 2000 мм x 310 мм показана на рис. 7.

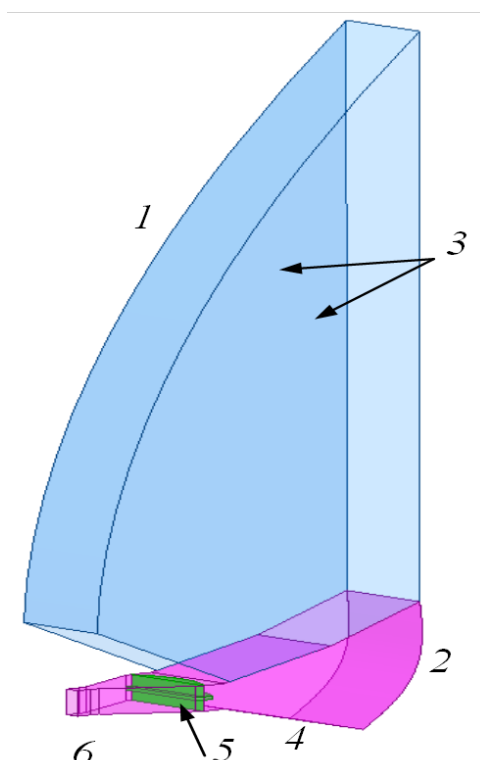


Рис. 7. Двухзеркальная цилиндрическая антенная система с рупорно – линзовым волноводным переходом: 1- основное зеркало, 2- вспомогательное зеркало, 3- боковые стенки, 4- Н- секториальный рупор, 5- линза, 6- Е- секториальный рупор.

Рассчитанные с использованием МКЭ зависимости K_u , КИПа и коэффициента отражения от частоты показаны на рис. 9, 10, 11, соответственно.

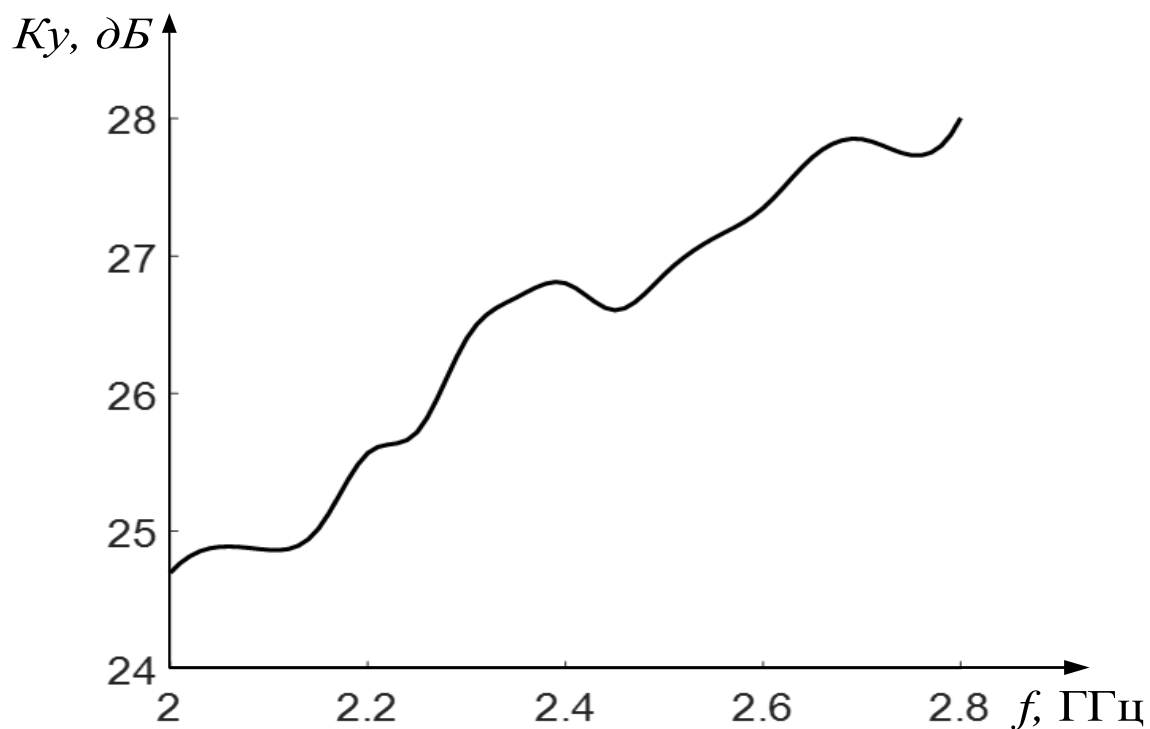


Рис. 9. Зависимость коэффициента усиления от частоты

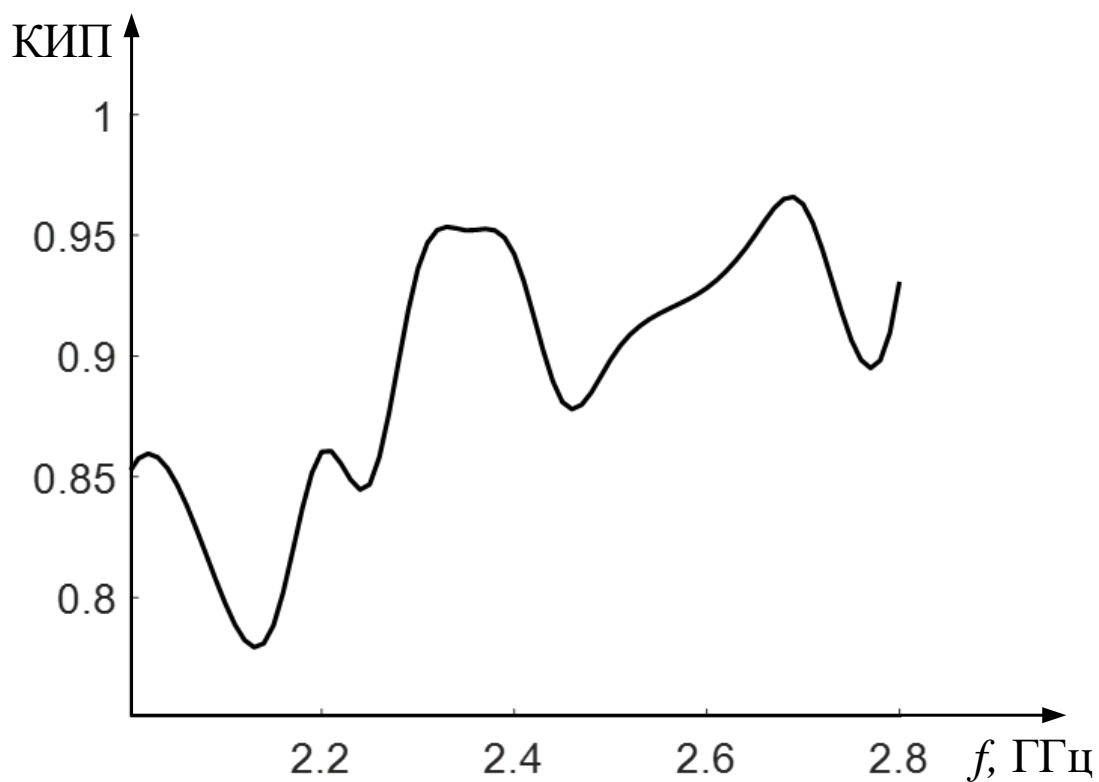


Рис. 10. Зависимость величины КИП от частоты

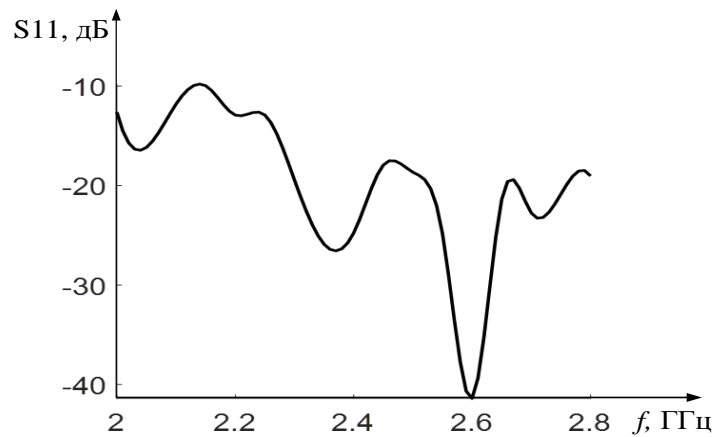


Рис. 11. Зависимость коэффициента отражения от частоты

На рисунках видно, что на частотах более 2.3 ГГц коэффициент отражения – ниже уровня -18 дБ, величина K_u растет с частотой от 26 до 28 дБ, а величина КИП – более 0.9.

3. Исследование характеристик сканирования антенной системы за счет поворота зеркала.

Рассмотрим сканирование луча синтезированной двухзеркальной антенной системы за счет поворота главного зеркала на угол $\alpha_{\text{пер}}$. Результаты моделирования ДН для различных $\alpha_{\text{пер}}$ величин показаны на рис. 12.

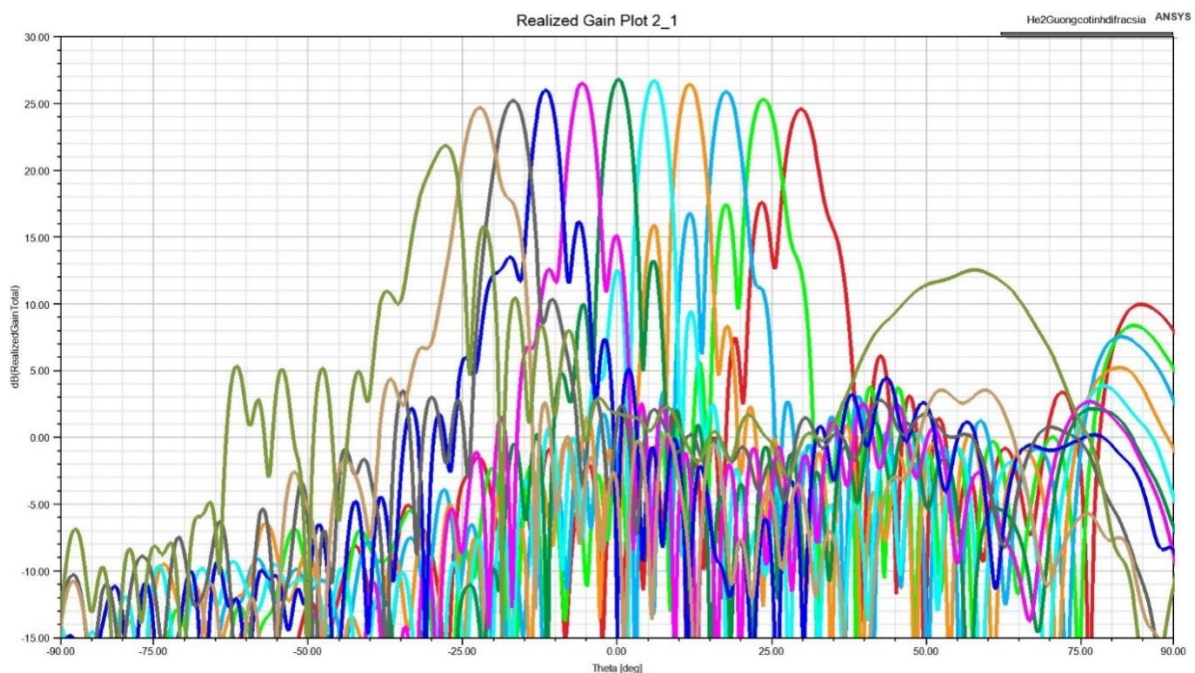


Рис. 12. ДН двухзеркальной системы в Н плоскости при сканировании за счет поворота главного зеркала.

Зависимости величин K_u и $K_{ИП}$ от угла $\alpha_{откл}$ показаны на рис. 13, 14, соответственно.

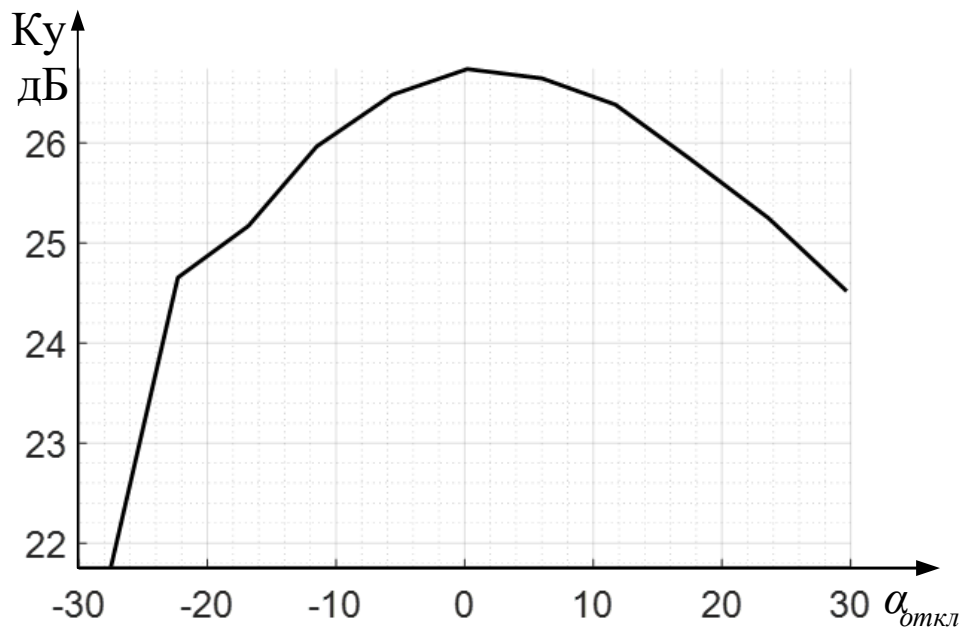


Рис. 13. Зависимость коэффициента усиления от угла отклонения главного лепестка ДН двухзеркальной системы в Н плоскости.

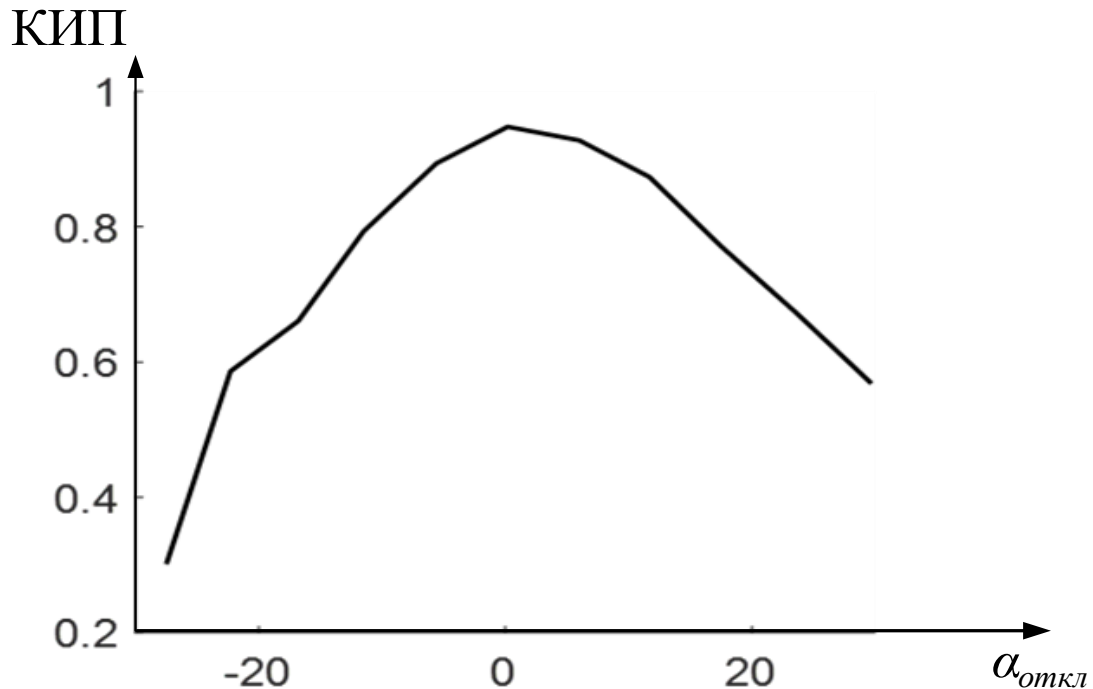


Рис. 14. Зависимость КИПа от угла отклонения главного лепестка ДН двухзеркальной системы в Н плоскости.

Как видно на рисунках, при отклонении главного лепестка ДН от -11 до 16 градусов K_u превышает 26 дБ, а $K_{ИП}$ – 0.8.

Заключение.

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1) Синтез цилиндрической двухзеркальной антенной системы с учетом дифракции на отрытом конце облучающего Н-секториального рупора позволяет повысить равномерность распределения амплитуды поля в апертуре и за счет этого увеличить КИП антенны.
- 2) Величина КИП цилиндрической двухзеркальной антенной системы с рупорно-линзовым волноводным переходом в Е-плоскости и Н-секториальным рупорным облучателем достигает 0.95, т.е. близка к предельной величине.
- 3) При сканировании главного лепестка ДН в угловом секторе 27 градусов за счет поворота главного зеркала K_u превышает 16 дБ, а КИП – 0.8.

Финансирование.

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования в рамках государственного задания по теме № 0030-2019-006.

Литература

1. Калошин В.А, Нгуен К.Т. Гибридные и многолучевые антенны на основе параболического цилиндра. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2020. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.7.9>.
2. Head A.K. The Two Mirror Aplanat. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1957. V.70. №10. P. 945-949. <https://doi.org/10.1088/0370-1301/70/10/304>
3. Head A.K. A Class of Aplanatic Optical Systems. *Proceedings of the Physical Society. Section B*. 1958. V.71. №4. P.546-551. <https://doi.org/10.1088/0370-1328/71/4/302>
4. Бодулинский В.К., Кинбер Б.Е., Романова В.И. Образующие двухзеркальных антенн. *Радиотехника и Электроника*. 1985. Т.30. №10. С.1914-1918.
5. Калошин В.А, Нгуен К.Т. Широкополосные волноводные переходы в Е – плоскости. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2020. №5 <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.5.13>

Для цитирования:

Калошин В.А., Ви Ут Нам. Двухзеркальная цилиндрическая антенная система с высоким коэффициентом использования поверхности. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.8.19>