

DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.1 УДК: 621.396.67

# СВЕРХШИРОКОПОЛОСНАЯ ОФСЕТНАЯ ДВУХЗЕРКАЛЬНАЯ АНТЕННА С РУПОРНО-ЛИНЗОВОЙ ОБЛУЧАЮЩЕЙ СИСТЕМОЙ

В.А. Калошин<sup>1</sup>, Нгуен Тхе Тхань<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет), 141700, Моск. обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Статья поступила в редакцию 1 апреля 2025 г.

Аннотация. Разработана и исследована сверхширокополосная антенна на основе офсетной двухзеркальной системы Мерсенна с рупорно-линзовой облучающей системой. В результате численного моделирования с использованием методов моментов и конечных элементов, а также оптимизации параметров, двухзеркальная антенна обеспечивает величину полного коэффициента использования поверхности 0.5-0.87 в полосе частот 9:1.

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

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

Автор для переписки: Нгуен Тхе Тхань, nguen.t@phystech.edu

1

## Введение

В связи с развитием радиоастрономии, радиомониторинга и систем связи новых поколений возрос интерес к разработке сверхширокополосных (СШП) зеркальных антенн. В результате были разработаны и исследованы как однозеркальные [1-6], так и двухзеркальные [7-18] антенные системы.

Наибольшая рабочая полоса частот (1-20 ГГц) получена в офсетной двухзеркальной антенне [18], однако при достаточно низком уровне минимального в полосе частот апертурного КИПа (0.4). Следует отметить, что апертурный КИП не учитывает потери на отражение на входе облучателя, дифракционные потери на главном и вспомогательном зеркалах.

Максимальная величина расчитанного полного КИПа (0.83) получена в двухзеркальной осесимметричной антенной системе, разработанной и исследованной в работе [11], при этом минимальный уровень величины КИП в полосе частот 5:1 выше 0.5. Однако следует отметить высокий уровень первого бокового лепестка, характерный для осесимметричных двухзеркальных антенн небольших электрических размеров.

Цель данной работы – разработка и исследование СШП офсетной двухзеркальной антенны с относительно небольшими электрическими размерами и двумя типами облучателей.

2

## 1. Конструкция офсетной двухзеркальной антенны

Продольное сечение офсетной двухзеркальной антенны с рупорно-линзовой облучающей системой показано на рис. 1.

Офсетная двухзеркальная антенна содержит главное параболичесское зеркало (1), вспомогательное параболическое зеркало (2) и рупорно-линзовую облучающую систему, которая в первом случае (рис. 2а) состоит из осесимметричной диэлектрической линзы (3), расположенной на расстоянии от четырехреберного металлодиэлектрического облучателя (4), а во втором случае (рис. 2б) линза расположена в апертуре металлического конического рупора.



Рис. 1. Продольное сечение офсетной двухзеркальной антенны.

Металлодиэлектрический четырехреберный облучатель (рис. 2а), как и в работе [2], состоит из двух частей: конического четырехреберного металлического рупора 1 длиной  $L_1$  и радиусом апертуры d с четырьмя ребрами, расстояние между которыми составляет c, и волновода 5 длиной  $L_2$ и радиусом d<sub>3</sub>. Внутри рупора 1 вдоль его оси расположены конические диэлектрические вставки 3, 4, которые соединены с диэлектрическими соосными цилиндрическими вставками диаметром d<sub>1</sub> и d<sub>2</sub> соответственно, заходящими в волновод. Диэлектрическая проницаемость вставки 3 составляет  $\varepsilon_1$  и радиус основания a, а вставка 4 с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon_2$  и радиусом основания b.



Рис. 2. Продольное сечение облучающей системы: линза на расстоянии *L* от металло-диэлектрического рупора (а) и линза в апертуре металлического рупора (б).

### 2. Синтез диэлектрической линзы

Для получения высоких значений коэффициента усиления (КУ) и КИП антенны синтезируем в апертуре главного зеркала трапециидальное амплитудное распределение (рис. 3).



Рис. 3. Распределение амплитуды поля в апертуре главного зеркала.

Поскольку функция отображения плоских волновых фронтов на входе и выходе системы Мерсенна является линейной, распределение амплитуды поля в апертуре главного зеркала в приближении геометрической оптики (ГО) подобно распределению на выходе облучающей системы. Таким образом, для получения трапециидального распределения в апертуре главного зеркала необходимо сформировать подобное распределение на выходе облучающей системы. Используем для этого метод ГО.

Закон сохранения потока мощности в элементарной лучевой трубке имеет вид:

$$D^{2}(\alpha)\sin\alpha d\alpha = CA^{2}(r)rdr, \qquad (1)$$

где  $D(\alpha)$  – диаграмма направленности (ДН) рупора для линзы на расстоянии от рупора и амплитуда поля рупорной моды в Е-плоскости для линзы в апертуре

рупора, а A(r) – требуемое распределение поля на выходе облучающей системы. Нормировочная постоянная C может быть найдена путем приравнивая полных потоков мощности:

$$C = \int_{0}^{\alpha_0} D^2(\alpha) \sin \alpha d\alpha \bigg/ \int_{0}^{r_0} A^2(r) r dr, \qquad (2)$$

где  $\alpha_0$  – угол между лучом, проходящим через кромку линзы и осью излучения,  $r_0$  – радиус линзы.

Для уменьшения дифракции на краях вспомогательного зеркала уровень облучения кромок зададим на уровне –15…–20 дБ (рис. 3).

Интегрируя уравнение (1), находим функцию отображения  $r(\alpha)$ , приведенную на рис. 4.



Рис. 4. Функция отображения: линза на расстоянии 120 мм от апертуры металло-диэлектрического рупора (1), линза в апертуре металлического рупора (2).

Дифференциальное уравнение относительно функции  $l(\alpha)$ , определяющей первую преломляющую поверхность линзы имеет вид [10]:

$$\frac{dl(\alpha)}{d\alpha} = l(\alpha) \frac{\sin\theta}{\cos\theta - 1/n},$$
(3)

где: 
$$\theta = \alpha + \arccos \frac{S(\alpha)}{\sqrt{K(\alpha)^2 + S(\alpha)^2}} - \arcsin \frac{nK(\alpha)}{\sqrt{K(\alpha)^2 + S(\alpha)^2}},$$
  
 $S(\alpha) = l(\alpha)(\cos \alpha - 1) + T(n - 1),$   
 $K(\alpha) = r(\alpha) - l(\alpha)\sin \alpha$  (рис. 5).





Решая дифференциальное уравнение (3) численным методом, находим образующую первой преломляющей поверхности, после чего определяем образующую второй преломляющей поверхности в параметрической форме:

$$r(\alpha) = l(\alpha)\sin\alpha + \frac{l(\alpha)(\cos\alpha - 1) + T(n - 1)}{n - \cos(\alpha - \theta)}\sin(\alpha - \theta), \qquad (4)$$

$$z(\alpha) = \frac{l(\alpha)(n\cos\alpha - \cos(\alpha - \theta)) + T(n-1)\cos(\alpha - \theta)}{n - \cos(\alpha - \theta)}.$$
 (5)

## 3. Моделирование и оптимизация параметров облучающей системы

Для диэлектрической исследования влияния проницаемости на характеристики антенны были синтезированы линзы с диэлектрической проницаемостью 2.25, 2.56 и 3.2, расположенные на расстоянии 120 мм от И диэлектрической проницаемостью 2.56, апертуры рупора линза С расположенная в апертуре металлического рупора.

#### ЖУРНАЛ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ, elSSN 1684-1719, №4, 2025

Далее с использованием метода конечных элементов (МКЭ) в программной среде ANSYS HFSS проведены расчеты распределения поля в продольном сечении синтезированной облучающей системы с линзой диэлектрической проницаемостью 2.56 на частоте 20 ГГц.

Результаты расчетов приведены на рис. 6. На рисунке видно формирование на выходе облучающей системы волны с фронтом, близким к плоскому.



Рис. 6. Распределение в продольном сечении облучающей системы: линза на расстоянии 120 мм от апертуры металло-диэлектрического рупора (а) и линза в апертуре металлического рупора (б).

Далее с использованием МКЭ исследованы частотные зависимости уровня спадания поля на крае выходной поверхности облучающей системы с линзой диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2.25$ , 2.56 и 3.2. В процессе исследования проводилась оптимизация параметров металлодиэлектрического облучателя с целью максимизации полосы частот, в которой уровень спадания поля в апертуре находится в интервале -15...-20 дБ. В результате оптимизации были найдены оптимальные значения параметров: a = 24 мм, b = 44 мм, c = 62

мм, d = 104 мм,  $d_1 = 20$  мм,  $d_2 = 26$  мм,  $d_3 = 34$  мм,  $\varepsilon_1 = 1.18$ ,  $\varepsilon_2 = 1.4$ , которые обеспечивают уровень спадания амплитуды поля, близкий к заданному, и минимизацию разброса фазы поля.

На рис. 7-9 и рис. 10-12, соответственно, приведены распределения фазы и амплитуды поля на выходной поверхности облучающей системы с линзой диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon = 2.25$ , 2.56 и 3.2, расположенной на расстоянии 120 мм от апертуры металло-диэлектричского рупора.



Рис. 7. Зависимости фазы от радиуса на выходе облучающей системы с линзой диэлектрической проницаемостью 2.25 в *H* (а) и *E* (б) плоскости на частотах 6 (1), 12 (2), 18 (3), 24 (4) и 30 ГГц (5).



Рис. 8. Зависимости фазы от радиуса на выходе облучающей системы с линзой диэлектрической проницаемостью 2.56 от радиуса в *H* (а) и *E* (б) плоскости на частотах 6 (1), 12 (2), 18 (3), 24 (4) и 30 ГГц (5).



Рис. 9. Зависимости фазы от радиуса на выходе облучающей системы с линзой диэлектрической проницаемостью 3.2 от радиуса в *H* (а) и *E* (б) плоскости на частотах 6 (1), 12 (2), 18 (3), 24 (4) и 30 ГГц (5).

На рис. 7-9 видно, что разброс фазы на всех трех частотах не превышает 50 градусов.



Рис. 10. Зависимости амплитуды поля от радиуса на выходе облучающей системы с линзой диэлектрической проницааемостью 2.25 от радиуса в *H* (а) и *E* (б) плоскости на частотах 6 (1), 12 (2), 18 (3), 24 (4) и 30 ГГц (5).



Рис. 11. Зависимости амплитуды поля от радиуса на выходе облучающей системы с линзой диэлектрической проницааемостью 2.56 от радиуса в *H* (а) и *E* (б) плоскости на частотах 6 (1), 12 (2), 18 (3), 24 (4) и 30 ГГц (5).



Рис. 12. Зависимости амплитуды поля от радиуса на выходе облучающей системы с линзой диэлектрической проницааемостью 3.2 от радиуса в *H* (а) и *E* (б) плоскости на частотах 6 (1), 12 (2), 18 (3), 24 (4) и 30 ГГц (5).

На рис. 13 и рис. 14, соответственно, приведены фазовое и амплитудное распределения на выходе облучающей системы с линзой диэлектрической проницаемостью 2.56, расположенной в апертуре металлического рупора диаметром 104 мм.



Рис.13. Фазовое распределение в *H* (а) и *E* (б) плоскости на частотах 6 (1), 12 (2), 18 (3), 24 (4) и 30 ГГц (5).



Рис.14. Амплитудное распределение в *H* (а) и *E* (б) плоскости на частотах 6 (1), 12 (2), 18 (3), 24 (4) и 30 ГГц (5).

На рис. 10-14 видно, что полученное распределение амплитуды поля близко к заданному (трапециидальному), при этом разброс фазы не превышает 50 градусов.

# 4. Анализ офсетной двухзеркальной антенны

Анализ характеристик офсетной двухзеркальной антенны был проведен с использованием численного метода моментов (ММ).



Рис. 15. Диаграммы направленности офсетной двухзеркальной антенны в *H* (*1*,*3*) и *E* (*2*,*4*) плоскости на частотах: a) 6 (*1*, *2*), 12 ГГц (*3*, *4*), б) 18 (*1*, *2*), 24 ГГц (*3*, *4*), в) 30 (*1*, *2*), 36 ГГц (*3*, *4*).

Диаграммы направленности (ДН) офсетной двухзеркальной антенны диаметром главного зеркала 300 мм с рупорно-линзовой облучающей системой диаметром 200 мм и диэлектрической проницаемостью линзы  $\varepsilon = 2.56$  на шести частотах представлены на рис.15.



Рис. 16. Зависимость от частоты уровня боковых лепестков ДН двухзеркальной антенной системы с диэлектрической проницаемостью линзы 2.25 (1), 2.56 (2), 3.2 (3) и линзой в апертуре рупора (4).

На рис. 16 приведена частотная зависимость уровня бокового излучения (УБЛ), рассчитанные с использованием ММ. Видно, что УБЛ с увеличением частоты падает, при этом выше 5.3 ГГц для антенны с линзой в апертуре рупора УБЛ ниже –17 дБ.



Рис. 17. Зависимость от частоты КУдвухзеркальной антенной системы с линзой диэлектрической проницаемостью 2.25 (1), 2.56 (2), 3.2 (3) и линзой в апертуре рупора.

На рис. 17 приведена частотная зависимость КУ двухзеркальной антенны, рассчитанная с использованием ММ. На рисунке видно, что КУ монотонно растет при увеличении частоты.



Рис. 18. Зависимость от частоты величины КИП двухзеркальной антенной системы с рупорно-линзовой облучающей системой и диэлектрической проницаемостью линзы 2.25 (1), 2.56 (2), 3.2 (3) и линзой в апертуре рупора.

На рис. 18 приведена частотная зависимость величины КИП двухзеркальной антенны. На рисунке видно, что облучающая система с линзой в апертуре металлического рупора обеспечивают наибольшую минимальную величину КИП (0.5) в полосе частот 5.3-47 ГГц.

# Заключение

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) Разработанная и оптимизированная офсетная двухзеркальная антенна обеспечивает величину полного КИП более 0.5 в полосе частот 5.3-47 ГГц.

2) Уровень боковых лепестков офсетной двухзеркальной антенны ниже –17 дБ в полосе частот 5.3-47 ГГц.

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

# Литература

- Jonas Flygare, Mirolav Pantaleev, Simon Olvhammar et al. BRAND: Ultrawideband feed development for the European VLBI network - A dielectrically loaded decade bandwidth quad-ridge flared horn // 12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018). London. 2018. P. 1-5.
- Jonas Flygare, Miroslav Pantaleev. Dielectrically loaded quad-ridge flared horn for beamwidth control over decade bandwidth optimization, manufacture, and measurement // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. 2020. Vol. AP-68. Issue 1. P. 207-216.
- 3. Dirk I.L. de Villiers, Fahmi Mokhupuki and Brandt Klopper. Low-Cost Frequency Variation Models of Quad-Ridge Flared Horn Reflector Feed Antennas //2018 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO). Reykjavik. 2018. P. 1-4.
- Fan Yang, Dong Li, Biao Du, et al. Development of a 6-18GHz Quad-Ridged Flared Horn //2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP).Auckland. 2018.P. 108-109.
- Калошин В.А., Тхань Нгуен Тхе. Сверхширополосный металлодиэлектрический облучатель на основе пирамидального рупора. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2023. №4. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.4.3
- 6. Калошин В.А., Нгуен Т.Т. Двухполяризационный сверхширополосный металлодиэлектрический рупорный облучатель // РЭ. 2024. Т. 69. № 10. С. 21–26.
- Jun Shi, Sander Weinreb, WeiyeZhong, et al. Quadruple-Ridged Flared Horn Operating from 8 to 50 GHz //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2017. Vol. AP-65. Issue. 12. P. 7322.
- Tercero F., Garcia-Perez O., Serna J.M., et al. Optimization of the Quad-Ridged Horn for the geodetic VGOS station of the Yebes observatory //12th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2018).London. 2018.. P. 1-5.
- Andrea Martellosio, Marco Pasian, Remi Rayet, et al. Wideband Cryogenic Receiver for Very Long Baseline Interferometry Applications //IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2018. Vol. 17. Issue. 2. P. 275.

- Oscar Garcia-Perez, Felix Tercero, Alejandro Baldominos, et al. A Modular Approach for the Design of Quadruple Ridged Flared Horn Antenna Feeds // IEEE Access. 2024. Vol. 12.P. 69642.
- ВенецкийА.С., Калошин В.А., Нгуен Тхе Тхань. Сверхширокополосная двухзеркальная антенна с металлодиэлектрической облучающей системой // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №3. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.3.16
- Ahmed Akgiray, Sander Weinreb, William Imbriale. Design and measurements of dual-polarized wideband constant-beamwidth quadruple-ridged flared horn // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. 2011. P. 1135-1138.
- Theunis S. Beukman, Petrie Meyer, Ivashina Marianna V., et al. Modal-Based Design of a Wideband Quadruple-Ridged Flared Horn Antenna //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol. AP-64. Issue. 5. P. 1615 - 1626.
- 14. Jonas Flygare, BhushanBillade, Magnus Dahlgren, et al.Beam pattern measurement on offset Gregorian reflector mounted with a wideband room temperature receiver for the Square Kilometre Array //2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting.Boston. 2018.P. 1759-1760.
- Jonas Flygare, Bin Dong, Jian Yang, et al.Wideband single pixel feed system over 4.6–24 GHz for the Square Kilometre Array // 2019 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA).Granada. 2019. P. 630 – 635.
- 16. Jonas Flygare, Adriaan Peens-Hough, Leif Helldner, et al.Sensitivity simulation and measurement of the SKA Band 1 wideband feed package on MeerKAT // 2019
  13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). Krakow.2019.
  P. 1-5.
- 17. Yue Ma, Chan Hwang See, Feng Pang. et al. A 10:1 bandwidth cryogenic quadruple ridged flared horn design for reflector antennas in radio astronomy // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 81101-81115.

18. Jonas Flygare, Jian Yang, Alexander W. Pollak. et al. Beyond decade ultra wideband quad ridge flared horn with dielectric load from 1 to 20 GHz // IEEE Transaction on Antennas and Propagation. 2023. Vol. AP-71. Issue 3. P. 2110-2125.

19. Head A.K. // Proc. Phys. Soc. 1959. V. L24. № 6. P. 731.

# Для цитирования:

Калошин В.А., Нгуен Тхе Тхань. Сверхширокополосная офсетная двухзеркальная антенна с рупорно-линзовой облучающей системой. // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – № 4. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.1