

Низкопрофильная двухзеркальная антенна с двойным продольным фокусом для сканирующих терминалов спутниковой связи

© А.М. Александрин, Е.Р. Гафаров, А.А. Ерохин, С.В. Поленга, Е.А. Стригова,
Р.О. Рязанцев, А.В. Станковский

Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия
E-mail: aalexandrin@sfu-kras.ru

Поступило в Редакцию 10 ноября 2025 г.

В окончательной редакции 27 ноября 2025 г.

Принято к публикации 1 декабря 2025 г.

Разработана зеркальная антенна для сканирующих спутниковых терминалов. Предложена конструкция двухзеркальной антенны круговой поляризации с двойным продольным фокусом, имеющей малые продольные размеры и неосесимметричную форму рефлектора. Показано, что такая антенна демонстрирует удовлетворительный уровень коэффициента использования площади при соотношении сторон рефлектора 1:0.35 и отношении продольного размера к большему диаметру 0.35, что делает ее пригодной для механического сканирования в ограниченном пространстве под радиопрозрачным укрытием антенной системы.

Ключевые слова: двухзеркальная антенна, сканирующая антенна, спутниковая связь, SatCom.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.07.62514.20566

В настоящее время развиваются мобильные средства приема и передачи спутниковых сигналов, в том числе системы SatCom [1,2]. Антенна таких систем должна осуществлять сканирование в верхней полусфере. Для этих целей часто применяется механическое или механоэлектрическое сканирование [3,4]. В качестве антенн таких систем применяются антенные решетки или зеркальные антенны [5,6].

Хотя антенные решетки обеспечивают высокий уровень усиления, зеркальные антенны представляются привлекательным вариантом из-за большей простоты устройства и меньшей массы. Возбуждение круговой поляризации в зеркальной антенне также проще, чем в решетке.

В клиентских устройствах приема и передачи типа SatCom для целей сканирования антенна должна иметь по возможности узкую форму, чтобы уменьшить вертикальные размеры всей системы. Применительно к зеркальным антеннам это значит, что форма рефлектора близка к прямоугольнику, у которого высота намного меньше ширины. Это означает, что применять в них облучатель с осесимметричной диаграммой направленности (ДН) (характерной для антенн круговой поляризации) нельзя из-за перетекания мощности через зеркало. Дополнительным ограничением является необходимость применения глубоких короткофокусных зеркал с целью сокращения продольных размеров системы для удобства механического сканирования.

Преимуществом зеркальных антенн также является широкая рабочая полоса частот. В решениях, основанных на печатных антенных решетках, полоса частот составляет единицы процентов [7], тогда как при использовании зеркальной системы можно реализовать

коэффициент перекрытия порядка 1.5, что достаточно для работы во всем Ku-диапазоне.

Для зеркальных антенн существуют решения с облучателем типа hat feed, однако такие конструкции обычно осесимметричны [8,9].

В настоящей работе рассматривается возможность построения двухзеркальной неосесимметричной антенны с основным рефлектором, имеющим соотношение сторон 1:0.35 и отношение продольного размера к большему диаметру 0.35. Для реализации такой системы авторами предлагается использовать основной и вторичный рефлекторы с двойным продольным фокусом.

Одним из способов реализовать различную ширину ДН в разных плоскостях с сохранением круговой поляризации является использование вторичного рефлектора. В качестве облучателя применяется антенна с осесимметричной ДН. Для того чтобы в различных плоскостях ширина ДН была разной, профиль вторичного рефлектора в этих плоскостях должен различаться. Соответственно положение его фокуса в ортогональных плоскостях будет различным, причем во всех сечениях фокальная точка лежит на продольной оси системы (ось z).

В качестве вторичного рефлектора целесообразно применить гиперboloид, так как он обеспечивает меньшие продольные размеры антенной системы. Известна формула гиперболы в явном виде для $z(x)$:

$$z_{hyp}(x) = a \sqrt{\left(\frac{x}{b}\right)^2 + 1}, \quad (1)$$

где a , b — полуоси гиперболы. Выразим уравнение гиперболы через фокальный параметр f , который равен

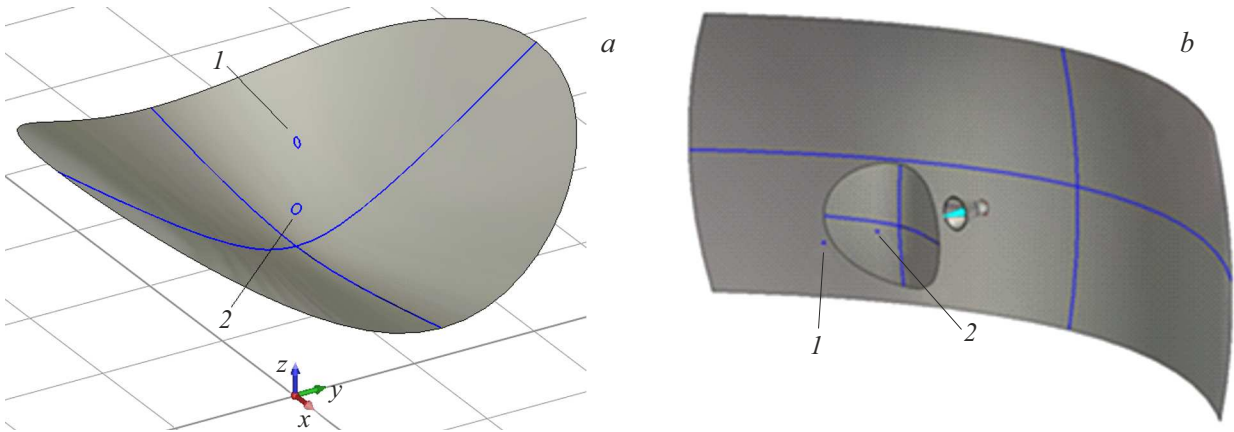


Рис. 1. *a* — схема гиперboloида с двойным продольным фокусом. 1 — фокус в плоскости xz , 2 — фокус в плоскости xy . *b* — двухзеркальная антенна с двойным продольным фокусом. 1 — фокус в вертикальной плоскости, 2 — фокус в горизонтальной плоскости.

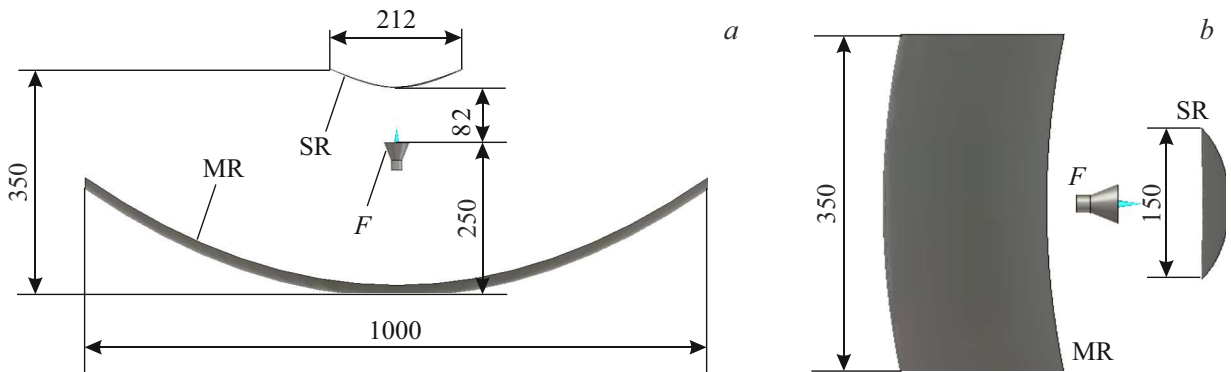


Рис. 2. Вид сверху (*a*) и слева (*b*) на антенную систему с указанием размеров (в мм). MR — основной рефлектор (main reflector), SR — вторичный рефлектор (sub reflector), *F* — облучатель (feed).

расстоянию от фокуса одной ветви гиперболы до вершины другой ветви:

$$f = c + a = \sqrt{a^2 + b^2} + a,$$

где $c = \sqrt{a^2 + b^2}$ — половина расстояния между фокусами гиперболы. Отсюда

$$a = \frac{f^2 - b^2}{2f}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим в явном виде выражение для образующей гиперболы через фокальный параметр f и малую полуось b :

$$z_{hyp}(\rho, b) = \frac{f^2 - b^2}{2f} \sqrt{\left(\frac{\rho}{b}\right)^2 + 1}. \quad (3)$$

При построении трехмерной поверхности в цилиндрических координатах профили гипербол, задаваемые выражением (3), усредняются с весами $\cos \varphi$ и $\sin \varphi$:

$$z_{refl}(\rho, \varphi) = \sqrt{z_{hyp}(\rho, b_1) \cos \varphi)^2 + (z_{hyp}(\rho, b_2) \sin \varphi)^2}, \quad (4)$$

где b_1 и b_2 — малые полуоси гипербол, образующих гиперboloид в ортогональных плоскостях.

Пример полученного по формуле (4) гиперboloида изображен на рис. 1, *a*. На данной схеме фокус, в котором размещается облучатель, находится в начале координат.

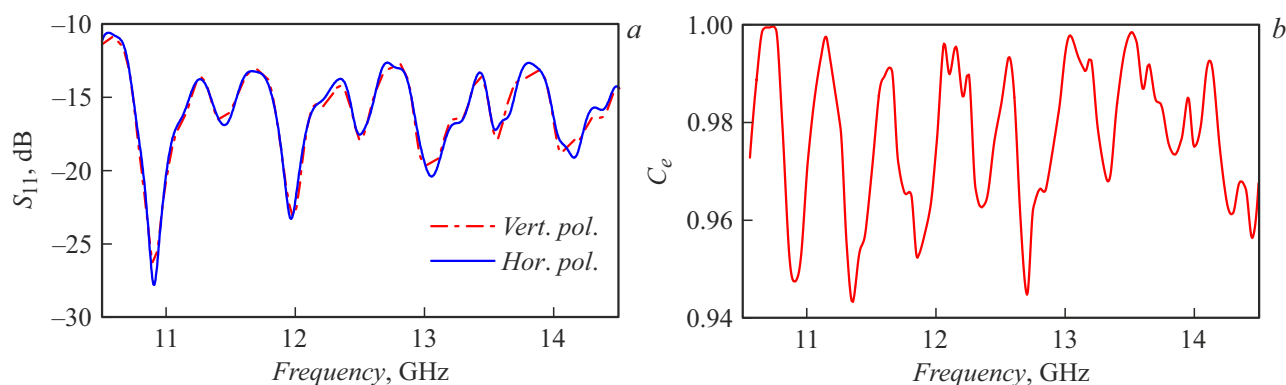
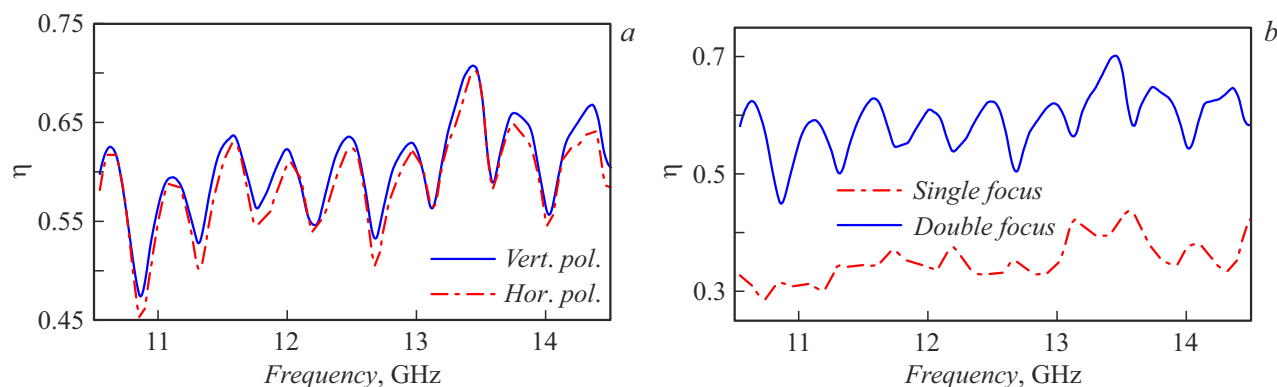
Основной параболический рефлектор также имеет два фокуса, которые совмещены с фокусами гиперboloида. Его профиль рассчитывается по формуле (4), в которую вместо $z_{hyp}(\rho, b_1)$ подставляются уравнения параболы с разными фокусными расстояниями.

Общий вид двухзеркальной антенной системы представлен на рис. 1, *b*.

В качестве облучателя двухзеркальной антенны применяется конический рупор с конической диэлектрической вставкой. Такой облучатель имеет более стабильное положение фазового центра, чем диэлектрический конус, сохраняя при этом малые поперечные размеры. Облучатель оптимизирован по критерию стабильности фазового центра и постоянства ширины ДН в полосе. Геометрия рефлекторов получена путем численной оптимизации модели по критерию максимального коэффициента использования площади (КИП) в полосе частот (геометрия облучателя при этом не менялась).

Основные геометрические параметры антенны

Параметр	Горизонтальная плоскость	Вертикальная плоскость
Размер основного рефлектора, mm	1000	350
Размер вторичного рефлектора, mm	212	150
Малая полуось гиперболоида b , mm	85	54
Фокусное расстояние основного рефлектора, mm	367	420
Фокусное расстояние вторичного рефлектора, mm	170	118
Продольные размеры системы, mm	350	

Рис. 3. a — коэффициент отражения S_{11} ; b — коэффициент эллиптичности C_e антенны.Рис. 4. a — апертурный КИП η антенной системы для двух ортогональных поляризаций возбуждения; b — апертурный КИП η антенны с двойным фокусом (double focus) в сравнении с КИП антенны с одиночным фокусом (single focus).

Габариты всей антенной системы составляют $1000 \times 350 \times 350$ mm. Система таким образом вписывается в цилиндр диаметром 350 mm, что позволяет механически вращать вокруг горизонтальной оси антенну, находящуюся под радиопрозрачным укрытием.

Чертеж рассчитанной антенной системы с указанием основных размеров приведен на рис. 2.

В таблице представлены основные геометрические параметры антенной системы. Путем численных расчетов были получены частотные зависимости S_{11} (рис. 3, a), коэффициента эллиптичности (рис. 3, b), а также КИП антенной системы (рис. 4, a) для двух ортогональных поляризаций возбуждения. Коэффициент эллиптичности

определялся для системы, в которой облучатель возбуждался двумя ортогональными поляризациями со сдвигом фазы 90° .

Также на рис. 4, b приведен КИП антенны с двойным фокусом в сравнении с КИП аналогичной антенны с одиночным фокусом, т.е. классической антенны Кассегрена. В последнем случае антенна имела те же размеры и фокусное расстояние, а параметры b_1 и b_2 вторичного рефлектора были равны 0.7 (подобраны численной оптимизацией по критерию наилучшего КИП).

Из результатов расчетов можно видеть, что антенная система демонстрирует удовлетворительный уровень КИП и при этом имеет все преимущества двухзеркальной системы (подвод фидера сзади, возможность испол-

нения без дополнительных несущих штанг), а также малые продольные размеры. При этом средний по полосе КИП равен 0.58. Расчетный коэффициент эллиптичности при возбуждении волной круговой поляризации близок к единице во всей полосе частот.

Характеристики предлагаемой антенны делают ее пригодной для применения в сканирующих системах спутниковых терминалов SatCom, где антенна может вращаться в горизонтальной и вертикальной плоскостях, вписываясь в габариты радиопрозрачного укрытия.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-20081), гранта Красноярского краевого фонда науки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] L. Marcellini, R.L. Forti, G. Bellaveglia, in *Proc. of the 5th European Conf. on Antennas and Propagation (EUCAP)* (IEEE, 2011), p. 2346–2350.
- [2] X. Feng, Q. Tan, Z. Liang, in *2011 6th Int. ICST Conf. on Communications and Networking in China (CHINACOM)* (IEEE, 2011), p. 1110–1114.
DOI: 10.1109/ChinaCom.2011.6158322
- [3] E.A. Strigova, S.V. Polenga, A.A. Stankovsky, A.D. Poligina, B.N. Gladkih, in *2024 IEEE 3rd Int. Conf. on Problems of Informatics, Electronics and Radio Engineering (PIERE)* (IEEE, 2024), p. 270–273.
DOI: 10.1109/PIERE62470.2024.10804996
- [4] A.V. Stankovsky, S.V. Polenga, A.D. Nemshon, Ye.A. Litinskaya, A.M. Alexandrin, K.V. Lemberg, Yu.P. Salomatov, in *2017 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)* (IEEE, 2017), p. 45–48.
DOI: 10.1109/RSEMW.2017.8103559
- [5] Q. Luo, S. Gao, in *2017 Int. Workshop on Antenna Technology: Small Antennas, Innovative Structures, and Applications (iWAT)* (IEEE, 2017), p. 260–263.
DOI: 10.1109/IWAT.2017.7915374
- [6] J.I. Herranz-Herruzo, A. Valero-Nogueira, M. Ferrando-Rocher, B. Bernardo, A. Vila, R. Lenormand, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, **66** (5), 2661 (2018).
DOI: 10.1109/TAP.2018.2806421
- [7] X. Xue, H. Shi, T. Jiang, Y. Han, G. Zhi, in *2022 IEEE 6th Information Technology and Mechatronics Engineering Conf. (ITOEC)* (IEEE, 2022), p. 1765–1769.
DOI: 10.1109/ITOEC53115.2022.9734657
- [8] M.K. Dwivedi, A.K. Sharma, in *2019 6th Int. Conf. on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)* (IEEE, 2019), p. 254–257. DOI: 10.1109/SPIN.2019.8711648
- [9] H. Wang, Z. Huang, H. Zhang, J. Chen, Z. Zhang, in *2024 IEEE 12th Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation (APCAP)* (IEEE, 2024), p. 1–2.
DOI: 10.1109/APCAP62011.2024.10881346