

АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ СЕГМЕНТО-ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПЛАВНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ЛИНЕЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

И.А. Баранников¹, Е.А. Ищенко¹, Ю.Г. Пастернак¹, Д.К. Прокурин¹, С.М. Фёдоров^{1,2}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается разработанная антенная решетка на основе сегменто-параболических элементов с плавным управлением линейной поляризацией. Разработанная система обладает двумя ортогональными линейными поляризациями (одна – на прием, другая – на передачу). Антенная решётка реализуется на основе двух соприкасающихся зеркальных параболических сегментов. Использование именно такой конфигурации объясняется тем, что антенная решётка даёт выигрыш по коэффициенту усиления и выигрыш в плане сужения луча диаграммы направленности. В конструкции решетки используется два дроссельно-фланцевых облучателя. Между дроссельно-фланцевыми облучателями и переходами от волноводов на коаксиальные разъемы 50 Ом располагаются 3 дБ синфазные делители мощности, реализуемые на печатных платах. В конструкции используются механически управляемые синхронно вращающиеся части, необходимые для реализации плавного управления двумя ортогональными поляризациями. Рассматривается конструкция антенной системы, проводится компьютерное моделирование с целью получения характеристик антенны. По итогам компьютерного моделирования КНД (коэффициент направленного действия) облучателя на частоте 14.5 ГГц составил 10.82 дБи. На частоте 14.3 ГГц КНД антенной системы составил 29.98 дБи, ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности составила 4.7 градуса. Уровень боковых лепестков системы при этом составил -14.1 дБ

Ключевые слова: антенная решётка, зеркальная антенна, ортогональная линейная поляризация

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (проект № FZGM-2025-0004)

Введение

В настоящее время применение антенных решёток в области радиосвязи распространилось довольно широко в силу их эффективности использования во многих сферах. Антенная решётка – это более сложная антенна, которая может состоять из разнообразнейших элементов, расположенных и ориентированных в пространстве по какой-либо закономерности, либо же квазислучайно. Отдельное внимание в контексте данной статьи стоит уделить отражательным антенным решёткам. В составе отражательной антенной решётки используется поверхность, которая может быть либо плоской, либо изогнутой. Например, элементом отражательной решётки может служить сегмент параболической антенны. Данная поверхность специально предназначена для отражения радиоволн с целью формирования необходимой формы диаграммы направленности. Применение таких отражательных антенных решёток обычно оказывается эффективнее использования единичных параболических отражательных антенн. Использование

антенны решёток даёт выигрыш в отношении коэффициента усиления и сужение диаграммы направленности. Но использование решёток должно быть оправдано их пользой в отношении энергоэффективности, эффективности излучения и экономическим фактором, так как производство антенной решётки из нескольких антенн обычно является более дорогостоящим, чем одной такой антенны.

Рассмотрим пример антенной решётки из работы [1]. В данной работе представлена отражательная антенная решётка для сетей дуплексной спутниковой связи. Элементом решётки является так называемый мальтийский крест. Использование такого элемента подразумевает возможность разработки антенной решётки с круговой или двумя ортогональными линейными поляризациями. Основой решётки предстаёт листовой вспененный поливинилхлорид с толщиной слоя 8 мм. Топология макета решётки изготовлена на металлизированном лавсане, применяя методику химического травления слоя. Подложка произведена из вспененного полиэтилена. На частоте 14 ГГц наблюдается значительное несоответствие расчётной и измеренной ширины диаграммы направленности и уровня боковых лепестков. Расчётная

ШДН (ширина диаграммы направленности) на данной частоте соответствует 5,5 градусов, в то время как реально измеренная 10,8 градусов. Расчётный УБЛ (уровень боковых лепестков) на частоте 14 ГГц соответствует -21 дБ, в то время как реально измеренный -9 дБ. Наблюдается значительный уход от рабочей частоты в более низкочастотную область в силу влияния неточности маски для химического травления и неполный учет диэлектрических свойств материалов. При разработке подобных высокоточных антенных решёток следует учитывать сложность реальной физической высокоточной реализации макета проекта и тонкости технологического процесса производства. Стоит отметить, что у всех печатных антенн будут наблюдаться проблемы с потерями в диэлектрике.

Теперь рассмотрим отражательную зеркальную antennу отдельно. Зеркальные параболические антенны (ЗПА) – это наиболее повсеместно распространенные остронаправленные антенны. Их частое использование в разнообразнейших системах связи можно пояснить простотой их конструкции, возможностью получения различных диаграмм направленности, большим уровнем коэффициента полезного действия, малой шумовой температурой, достойными диапазонными характеристиками и т.п. В радиолокации использование ЗПА даёт возможность добиться равносигнальной зоны, позволяет реализовать единовременное формирование нескольких диаграмм направленности одним общим зеркалом. Определённые виды зеркальных антенн дают возможность реализовать достаточно быстрое качание луча в угловом секторе [2]. В статье [3] приводится пример планарной печатной зеркальной антенны. Реально измеренные характеристики антенны: ширина луча 2.7 градуса; КНД 36.6 дБ, КУ (коэффициент усиления) 33 дБ; уровень боковых лепестков с одной стороны 17 дБ, уровень боковых лепестков с другой стороны 15.5 дБ. Измерения проводились в полосе частот 24.5...26 ГГц. Значения реально измеренных параметров имеют некоторое отличие от результатов математического моделирования, это может быть связано с тем, что печатные антенны, как было сказано выше, имеют проблемы с потерями в диэлектрике.

Конструкция антенной системы

В данной статье будет рассмотрена антенная решетка на основе сегменто-параболических элементов с плавным управле-

нием линейной поляризацией. Разработанная система обладает двумя ортогональными линейными поляризациями (одна – на прием, другая – на передачу). Антennaя решётка реализуется на основе двух частей зеркальных антенн, а именно – на основе двух соприкасающихся зеркальных параболических сегментов. Использование именно такой конфигурации объясняется тем, что антennaя решётка даёт выигрыш по коэффициенту усиления и выигрыш в плане сужения луча диаграммы направленности. Внешний вид рассматриваемой системы представлен на рис. 1.

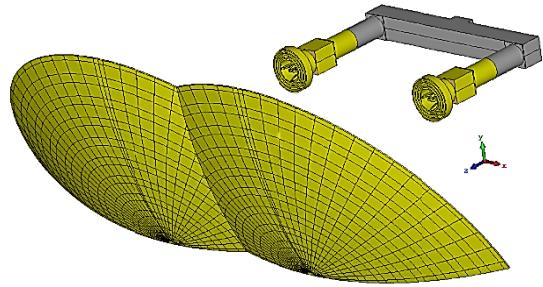


Рис. 1. Внешний вид разработанной антенной системы

Из рисунка можно увидеть, что конструкция антенны включает в себя непосредственно решётку из двух зеркальных параболических сегментов и излучающую конструкцию, включающую в себя делители мощности, волноводные элементы, элементы антенны Вивальди и два дроссельно-фланцевых облучателя.

Ширина антенны – 570 мм (по оси x), высота – 198.5 мм (по оси y), глубина – 373.6 мм (по оси z). Серым цветом на рисунке выделены неподвижные части конструкции делителя мощности и облучателей, желтым цветом – синхронно вращающиеся части.

Механически управляемые синхронно вращающиеся части необходимы для реализации указанного плавного управления двумя ортогональными поляризациями. Между дроссельно-фланцевыми облучателями и переходами от волноводов 19×9.5 мм на коаксиальные разъемы 50 Ом располагаются 3 дБ синфазные делители мощности, реализуемые на печатных платах. На рис. 2 располагается сам дроссельно-фланцевый облучатель.

Из рис. 2 можно наблюдать, что в дроссельно-фланцевом облучателе располагается четыре облучателя типа Вивальди, при этом параллельные облучатели запитываются синфазно и равноамплитудно. Элементы Вивальди в данном случае функционируют попарно.

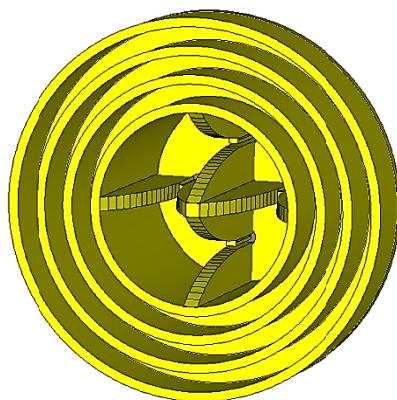


Рис. 2. Дросельно-фланцевый облучатель с двумя ортогональными поляризациями

Волноводный делитель мощности разделяет поступающую к нему энергию на две равные части. Далее по ходу волны следует переход с прямоугольного волновода на круглый волновод. В прямоугольном волноводном элементе, располагающимся ближе к дросельно-фланцевому облучателю, находится элемент Вивальди, являющийся плавным широкополосным экспоненциальным переходом, который преобразует электромагнитную волну, пришедшую из волновода, в электрический ток. Далее через коаксиальный кабель и систему переходов энергия поступает непосредственно на дросельно-фланцевый облучатель. Дросельно-фланцевый облучатель излучает энергию уже непосредственно на antennную решётку, состоящую из двух зеркальных параболических сегментов. Каждый элемент решётки в виде сегмента параболической зеркальной антенны отражает приходящую волну, сужает диаграмму направленности и сосредотачивает мощность излучения в определённом направлении.

Характеристики разработанной антенной системы

Было проведено компьютерное моделирование представленной антенной системы с помощью программы CST STUDIO, перейдём к рассмотрению полученных результатов. На рис. 3 располагаются характеристики облучателя на частоте 14.5 ГГц.

КНД облучателя на частоте 14.5 ГГц составил величину 10.82 изотропных дБ. На рис. 4 располагается трёхмерная диаграмма направленности всей антенной системы, а на

рис. 5 располагается проекция ДН на плоскость (угол Theta = 150).

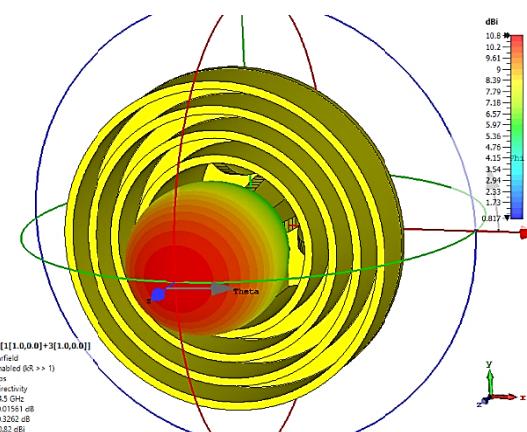


Рис. 3. Характеристики облучателя (вертикальная поляризация, запитаны синфазно и равноамплитудно верхний и нижний щелевые излучатели)

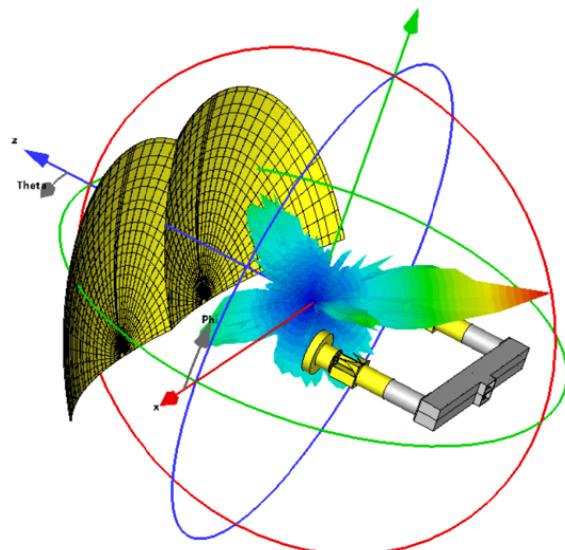


Рис. 4. ДН системы на частоте 14.3 ГГц

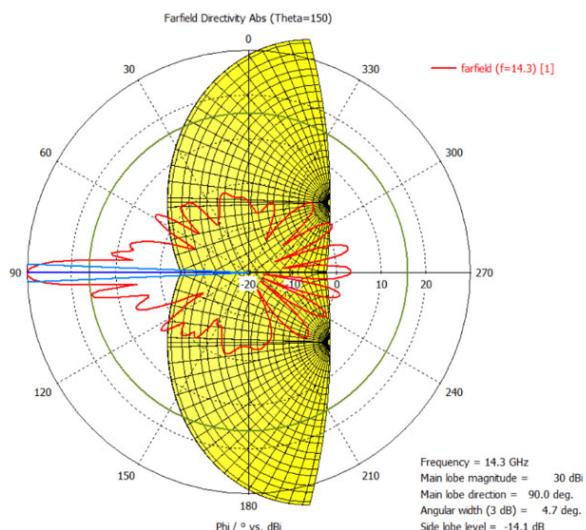


Рис. 5. Проекция ДН системы на плоскость на частоте 14.3 ГГц (Theta = 150)

На частоте 14.3 ГГц КНД системы составил 29.98 изотропных дБ, проекция на плоскость (Theta = 150) показала, что ширина главного лепестка по уровню половинной мощности составила величину 4.7 градуса. Уровень боковых лепестков при этом составил величину -14.1 дБ.

Заключение

Таким образом, в данной работе была рассмотрена и исследована разработанная антенная решетка на основе сегменто-параболических элементов с плавным управлением линейной поляризацией. Разработанная система обладает двумя ортогональными ли-

нейными поляризациями (одна – на прием, другая – на передачу). Преимущество такой конфигурации системы заключается в возможности непосредственного управления двумя имеющимися ортогональными поляризациями с помощью синхронного поворота по оси подвижных частей конструкции. В системе было использовано два дроссельно-фланцевых облучателя, по итогам машинного моделирования КНД облучателя на частоте 14.5 ГГц составил 10.82 изотропных дБ. На частоте 14.3 ГГц КНД всей антенной системы составил величину 29.98 изотропных дБ, а проекция на плоскость (Theta = 150) показала, что ширина главного лепестка диаграммы направленности по уровню половинной мощности составила величину 4.7 градуса. Уровень боковых лепестков системы при этом составил величину -14.1 дБ. С помощью использования данной конфигурации системы удалось добиться главных целей разработки - было получено достаточно высокое значение КНД и довольно узкая ширина главного лепестка.

Литература

1. Литинская Е.А., Поленга С.В., Саломатов Ю.П. Разработка и исследование отражательной антенной решетки для сетей дуплексной спутниковой связи // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. №. 2-1 (24). 2011. С. 214-218.
2. Чистюхин В.В. Антенно-фидерные устройства: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2010.
3. Планарная печатная зеркальная антенна / М.Д. Парнес [и др.] // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника, 2005. С. 56-59.

Поступила 05.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

- Бараников Илья Андреевич** – аспирант, ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>
- Ищенко Евгений Алексеевич** – аспирант, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>
- Пастернак Юрий Геннадьевич** – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: pasternakyg@mail.ru
- Прокурин Дмитрий Константинович** – канд. физ.-мат. наук, доцент, ректор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: rector@cchgeu.ru
- Фёдоров Сергей Михайлович** – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

ANTENNA ARRAY BASED ON SEGMENT-PARABOLIC ELEMENTS WITH SMOOTH CONTROL OF LINEAR POLARIZATION

I.A. Barannikov¹, E.A. Ishchenko¹, Yu.G. Pasternak¹, D.K. Proskurin¹, S.M. Fedorov^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: this paper discusses a developed antenna array based on segmented-parabolic elements with smooth control of linear polarization. The developed system has two orthogonal linear polarizations (one for reception, the other for transmission). We implemented the antenna array based on two touching mirror parabolic segments. We explained the use of this particular configuration by the antenna array's gain and beam narrowing advantages. The array design utilizes two choke-flange feeders. Between the choke-flange feeders and the transitions from the waveguides to 50-ohm coaxial connectors, 3-dB common-mode power dividers implemented on printed circuit boards are located. The design utilizes mechanically controlled synchronously rotating parts, necessary for smooth control of the two orthogonal polarizations. We discussed the antenna system design, and performed computer modeling to obtain the antenna's characteristics. Computer simulations showed that the directivity gain (DP) of the feed at 14.5 GHz was 10.82 dBi. At 14.3 GHz, the antenna system's DP was 29.98 dBi, with a half-power beamwidth of 4.7 degrees. The system's sidelobe level was -14.1 dB

Key words: antenna array, reflector antenna, orthogonal linear polarization

Acknowledgments: the work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment (project no. FZGM-2025-0004)

References

1. Litinskaya E.A., Polenga S.V., Salomatova Yu.P. "Development and study of a reflective antenna array for duplex satellite communication networks", *Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki)*, 2011, no. 2-1 (24), pp. 214-218.
2. Chistyukhin V.V. "Antenna-feeder devices" ("Antenno-fidernye ustroystva"), Moscow: MIET, 2010, 116 p.
3. Parnes M.D., Korol'kov V.D., Gashinova M S., Kolmakov I.A., Kolmakov Ya.A., Vendik O.G. "Planar printed reflector antenna", *News of Higher Educational Institutions of Russia. Radioelectronics (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika)*, 2005, pp. 56-59.

Submitted 05.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

- Il'ya A. Barannikov**, graduate student, assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>
- Evgenny A. Ishchenko**, graduate student, engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>
- Yuriy G. Pasternak**, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru
- Dmitriy K. Proskurin**, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Rector, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: rector@cchgeu.ru
- Sergey M. Fedorov**, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Associate Professor, International Institute of Computer Technologies (29b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), tel.: +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>