

**АНТЕННАЯ РЕШЕТКА НА ОСНОВЕ ПАТЧ-ЭЛЕМЕНТОВ С ВОЗМОЖНОСТЬЮ РАБОТЫ С ДВУМЯ ЛИНЕЙНЫМИ ПОЛЯРИЗАЦИЯМИ****И.А. Баранников<sup>1</sup>, Е.А. Ищенко<sup>1</sup>, Ю.Г. Пастернак<sup>1</sup>, Д.К. Проскурин<sup>1</sup>, С.М. Фёдоров<sup>1,2</sup>****<sup>1</sup>Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия****<sup>2</sup>Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия**

**Аннотация:** рассматривается разработанная антенная решетка на основе патч-элементов с возможностью работы с двумя линейными поляризациями. В основе антенной системы лежит использование апланатической линзы. Рассматривается конструкция антенной системы, проводится компьютерное моделирование для получения характеристик антенной системы. Конструкция антенны подразумевает три плоские металлические пластины, формирующие два плоскопараллельных волновода, между пластинами располагаются две апланатические линзы, сделанные из полистирола с показателем преломления 2,56. На выходе системы располагается антенная решетка из патч-излучателей. Преимущество использования в системе апланатической линзы заключается в том, что у неё почти нет потерь (так как тангенс угла диэлектрических потерь полистирола крайне мал и составляет величину приблизительно 0,0002), а средней распространения волн фактически является диэлектрически заполненный волновод. В ходе выполнения компьютерного моделирования были получены S<sub>1,1</sub> и S<sub>2,2</sub> параметры, диаграмма направленности на частоте 12 ГГц и картина электрического поля на частоте 11,6 ГГц. На частоте 12 ГГц для центрального порта запитки удалось добиться величины КНД (коэффициента направленного действия), равного 20,49 дБ. Уровень боковых лепестков при этом соответствует величине -10,5 дБ. Приведённая антенная система подразумевает коммутационное сканирование в азимутальной плоскости

**Ключевые слова:** апланатическая линза, патч-излучатель, ортогональная 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 для разработчиков антенных систем и специалистов в области антенн стоит задача при разработке линзовых структур широкоугольного сканирования не столкнуться с проблемами аббераций и комы, а также избежать ухудшения направленных свойств антенны при смещении облучателя перпендикулярно фокальной оси линзы. Чтобы предотвратить это, разработчики и специалисты обычно используют линзы особой конфигурации, которые по большей части не подвержены появлению аббераций и комы при смещении облучателя, а также практически не искажают направленные свойства антенн. Такие линзы называются апланатическими. Апланатические линзы – это линзы, которые удовлетворяют условию Аббе и позволяют обеспечить возможность неискажённого широкоугольного сканирования при их использовании в антенных системах [1]. Сохранение направленных свойств антенны, недопустимость уменьшения коэффициента направленного действия и недо-

пустимость увеличения уровня боковых лепестков важны во многих сферах в области антенн.

Обычно сами по себе линзы в антеннах не используются автономно и обособленно, а являются составной частью какой-либо структуры. Как минимум, требуется наличие излучателя. В статье [2] плоская апланатическая линза находится между металлических пластин с системой щелей, образующих плоскопараллельный волновод. Антенная система обладает линейной поляризацией с коэффициентом усиления 20–24 дБ и однокоординатным сканированием диаграммы направленности в полосе частот 24–24,25 ГГц. Линза состоит из диэлектрика с показателем преломления 1,6. При этом система имеет уровень боковых лепестков диаграммы направленности (–15...–20) дБ в секторе сканирования до ±30°. Недостатком такой системы является то, что она обладает только одной поляризацией. В работе [3] приводится многолепестковая антенна в виде волновода, линза находится прямо перед раскрытом рупора волновода. Материалом для реализации апланатической линзы был выбран полистирол с показателем преломления 2,56. Для одного из портов на частоте 1,7 ГГц КСВН

(коэффициент стоячей волны по напряжению) равен 11, к тому же в области пониженных частот согласование является довольно неудовлетворительным, но с повышением частоты, примерно начиная от 2 ГГц и выше согласование становится значительно лучше и значение КСВН антенной системы усреднённо стремится к значению 2. Коэффициент усиления в направлении главного лепестка диаграммы направленности на частоте 3 ГГц равен 12,9 дБ для одного из портов. Но на частотах выше можно видеть улучшение направленных свойств антенны, при том, как на частотах ниже характеристики антенны становятся хуже. Происходит это падение характеристик апланатической линзы на более пониженных частотах из-за дифракционных искажений, появляющихся из-за меньшего, относительно длины волны, фокального расстояния линзы. Значимое воздействие электрического расстояния на рабочие параметры линзы обуславливается использованием принципов оптической оптики во время её реализации. Антенна в указанной работе также располагает только одной поляризацией.

### Конструкция антенной системы

Далее будет представлен следующий этап развития антенны, указанной в предыдущей работе. В данной статье будет рассмотрена разработанная антенная решетка на основе патч-элементов с возможностью работы с двумя линейными поляризациями. Также в настоящей работе антенна обладает большей величиной коэффициента усиления относительно предыдущего варианта конструкции. В составе описываемой системы также используется диаграммообразующая схема (ДОС) на основе апланатической линзы. Конструкция антенны подразумевает три плоские металлические пластины, формирующие непосредственно два плоскопараллельных волновода, между пластинами располагаются две апланатические линзы, сделанные из полистирола с показателем преломления 2,56. На выходе системы располагается антенная решетка из патч-излучателей. Суть использования апланатической линзы заключается в том, что на выходе у неё происходит выравнивание фазового и амплитудного фронта волны. Преимущество использования в системе апланатической линзы заключается в том, что у неё почти нет потерь (так как тангенс угла диэлектрических потерь полистирола крайне мал и составляет величину приблизительно 0,0002), а средой распростра-

нения волн фактически является диэлектрически заполненный волновод. Приведённая антенная система подразумевает коммутационное сканирование в азимутальной плоскости. Имеется возможность сформировать антенную решётку в вертикальной плоскости из таких же используемых подрешёток, и, далее, последующее управление формируемым лучом производить также в угло-местной плоскости.

Выигрыш именно такой используемой конфигурации антенной системы на основе двух апланатических линз заключается в особом свойстве волн на выходе данной системы – волны поляризованы одновременно в двух ортогональных плоскостях. Верхний плоскопараллельный волновод предназначен для формирования вертикальной поляризации, нижний – для горизонтальной.

В системе питание подается в порт и далее на патч-излучатель, находящийся за линзой. Далее волна со сферическим фронтом проходит по волноводу и встречает на своём пути апланатическую линзу. После линзы фронт волны выравнивается и становится плоским. Далее по ходу волны располагается устройство возбуждения антенного элемента, состоящее из патч-элементов, волноводов и печатной дорожки. После устройства возбуждения по ходу волны располагается антенный элемент в виде патча, который уже излучает волну в открытое пространство. Завершающий патч элемент имеет соединение с двумя патч элементами устройства возбуждения, расположенными каждый в верхнем и нижнем плоскопараллельном волноводе.

Размещение дополнительной решётки из патчей реализовано в целях экономии расчётных ресурсов. Результаты расчётов с наличием дополнительной решётки показывают отсутствие искажений при случае, если бы компьютерное моделирование проводилось одновременно для двух таких антенных систем.

На рис. 1 приведён внешний вид разрабатываемой антенны, на рис. 2 показаны внутренние слои полистирола вместе с запитываемыми патч-элементами.

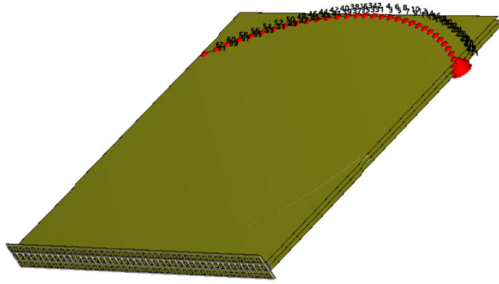


Рис. 1. Внешний вид разработанной антенны

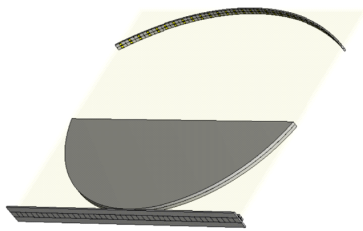


Рис. 2. Внутренние слои полистирола вместе с запитываемыми патч-элементами

### Характеристики разработанной антенной системы

Было проведено компьютерное моделирование разработанной антенной решетки в программе CST Studio. На рис. 3 приведены S-параметры, полученные в результате компьютерного моделирования антенной системы – возвратные потери для центрально расположенных портов 1 и 2. S<sub>1,1</sub> параметр на рисунке обозначен сплошной линией, а S<sub>2,2</sub> параметр обозначен пунктирной линией.

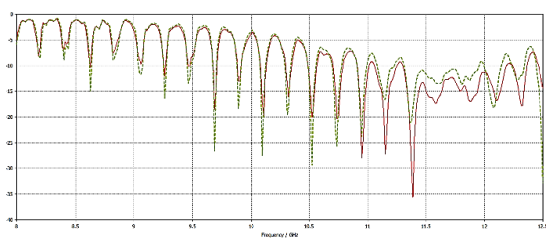


Рис. 3. S<sub>1,1</sub> и S<sub>2,2</sub> параметры

График S<sub>1,1</sub> и S<sub>2,2</sub> параметров неравномерен ввиду использования апланатической линзы и, как следствие, наличия резонансов из-за особенностей диаграммообразующего устройства.

На рис. 4 располагается диаграмма направленности на частоте 12 ГГц для центрального порта 1. КНД антенны при таком случае соответствует величине 20,49 изотропных дБ. Уровень боковых лепестков соответствует величине -10,5 дБ.

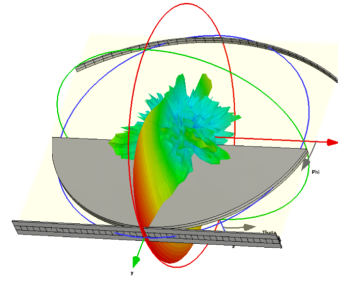


Рис. 4. ДН на частоте 12 ГГц для порта 1

На рис. 5 располагается картина электрического поля на частоте 11,6 ГГц для порта 2. Из рисунка можно наблюдать, как происходит выравнивание сферического фронта волны после апланатической линзы.

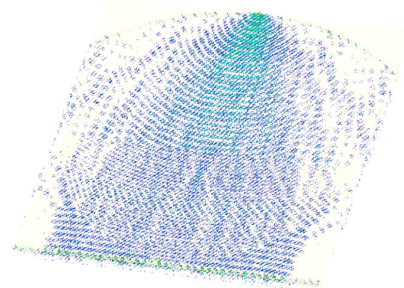


Рис. 5. Электрическое поле для центрального порта 2 на частоте 11,6 ГГц

### Заключение

В данной работе была рассмотрена и исследована конструкция разработанной антенной решетки на основе патч-элементов с возможностью работы с двумя линейными поляризациями. В составе системы использовались две апланатические линзы. На частоте 12 ГГц для центрального порта КНД составил 20,49 изотропных дБ. Уровень боковых лепестков соответствует величине -10,5 дБ. Выигрыш используемой конфигурации позволил на выходе системы получить волну, поляризованную в двух ортогональных плоскостях, и дал возможность плавно и практически без искажений управлять формируемым лучом при широкоугольном сканировании.

### Литература

1. Чистюхин В.В. Антенно-фидерные устройства: учеб. пособие. М.: МИЭТ, 2010. 114 с.
2. Белозерцев Ю.В., Галуза М.А., Климов А.И. Плоские сканирующие антенные решетки СВЧ с диаграммообразующей системой на основе апланатической линзы. Вестник Воронежского института МВД России. 2022. № 3. С. 115-123.

3. Использование метода виртуальных лучей для анализа сверхширокополосной многолучевой антенной решетки с апланатической линзой / А.С. Авдюшин,

А.В. Ашихмин, Ю.Г. Пастернак, С.М. Федоров // Вестник Воронежского государственного технического университета, № 9 (6-1), 2013. С. 56-58.

Поступила 05.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

#### Информация об авторах

**Баранников 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, 84), e-mail: pasternakyg@mail.ru

**Проскурин 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, 29 б), e-mail: fedorov\_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

### ANTENNA ARRAY BASED ON PATCH ELEMENTS WITH THE CAPABILITY OF WORKING WITH TWO LINEAR POLARIZATIONS

I.A. Barannikov<sup>1</sup>, E.A. Ishchenko<sup>1</sup>, Yu.G. Pasternak<sup>1</sup>, D.K. Proskurin<sup>1</sup>, S.M. Fedorov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

<sup>2</sup>International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

**Abstract:** here we considered a developed antenna array based on patch elements with the ability to operate with two linear polarizations. The antenna system is based on the use of an aplanatic lens. We considered the design of the antenna system, and performed computer modeling to obtain the characteristics of the antenna system. The antenna design involves three flat metal plates that form two plane-parallel waveguides, between the plates there are two aplanatic lenses made of polystyrene with a refractive index of 2.56. An antenna array of patch radiators is located at the output of the system. The advantage of using an aplanatic lens in the system is that it has almost no losses (since the dielectric loss tangent of polystyrene is extremely small and is approximately 0.0002), and the wave propagation medium is actually a dielectrically filled waveguide. During the computer modeling, we obtained the S<sub>1,1</sub> and S<sub>2,2</sub> parameters, the radiation pattern at a frequency of 12 GHz and the electric field pattern at a frequency of 11.6 GHz. At 12 GHz, a directivity gain of 20.49 dB was achieved for the central feed port. The sidelobe level corresponds to -10.5 dB. The antenna system shown assumes switching scanning in the azimuthal plane

**Key words:** aplanatic lens, patch emitter, orthogonal 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. Chistyukhin V.V. "Antenna-feeder devices" ("Antenno-fidernye ustroystva"), Moscow: MIET, 2010, 116 p.
2. Belozertsev Yu.V., Galuza M.A., Klimov A.I. "Strip antenna arrays with multibeam beamforming systems based on flat lenses", *Bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii)*, 2022, no. 3, pp. 115-123.
3. Avdyushin A.S., Ashikhmin A.V., Pasternak Yu.G., Fedorov S.M. "Using the virtual ray method to analyze an ultra-wideband multibeam antenna array with an aplanatic lens", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, no. 9 (6-1), pp. 56-58

Submitted 05.09.2025; revised 11.11.2025

#### Information about the authors

**Илья А. Баранников**, 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>

**Евгений А. Ищенко**, 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>

**Юрий Г. Пастернак**, D. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

**Дмитрий К. Проскурин**, 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

**Сергей М. Федоров**, 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>