

Несимметричная вибраторная антенна на основе фазокорректирующей диэлектрической линзы

Д.С. Алиев¹, А.В. Иванов¹, Ю.Г. Пастернак², В.А. Пендюрин³, Е.С. Чесноков¹

¹ ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»
394064, Россия, г. Воронеж,
ул. Старых Большевиков, 54а

² Воронежский государственный технический университет
394006, Россия, г. Воронеж,
ул. 20-летия Октября, 84

³ АО НПП «Автоматизированные системы связи»
394062, Россия, г. Воронеж,
ул. Пеше-Стрелецкая, 108

Аннотация – **Проблема.** Современные мобильные роботизированные комплексы все шире применяются в различных сферах деятельности человека. Все более жесткие требования предъявляются к ним по обеспечению высокой пропускной способности, широкополосности и надежности каналов передачи данных и управления при максимальной удаленности от пункта управления. И, что хотелось бы отметить отдельно, это требование по максимальному снижению себестоимости таких комплексов. Поэтому разработка технологичных, экономически целесообразных антенных систем, обеспечивающих повышение энергетического потенциала радиоканала на интервале роботизированный комплекс – пункт управления является одним из путей решения данной проблемы. **Постановка задачи.** Требуется разработать механически прочную, технологичную антенну, построенную на базе линзовых структур различной конфигурации из современных диэлектрических материалов, характеризующуюся уменьшенными массогабаритными характеристиками и себестоимостью, которая позволит повысить уровень излучаемой электромагнитной энергии в широкой полосе частот. **Цель статьи.** Представить разработанную модель несимметричной вибраторной антенны и результаты численного эксперимента. **Результат.** Конструкция антенны выполнена на металлизированной круглой подложке и представляет собой цилиндр из полистирола с воронкообразным отверстием, внутри которого расположено плечо несимметричного вибратора конической формы. Результаты расчетов показали, что в полосе частот, которая используется для организации прямых широкополосных каналов радиосвязи с роботизированными комплексами, коэффициент усиления изменяется в пределах 5,5–9 дБ, что превосходит по данному параметру часто применяемые штыревые антенны. Рассчитанный коэффициент стоячей волны подтверждает работоспособность разработанной модели антенны в широкой полосе частот. Импедансная характеристика и диаграмма Вольперта – Смита показали предварительный расчетный разброс входного сопротивления антенны от 30 до 95 Ом. **Практическая значимость.** Предложенная модель антенны обеспечивает технологичность, механическую прочность, низкую себестоимость. Полноазимутальный режим излучения и повышенный коэффициент усиления позволяют спрогнозировать возможность применения данной антенны в составе оборудования канала передачи данных и управления роботизированных комплексов типа беспилотных летательных аппаратов.

Ключевые слова – несимметричная вибраторная антенна; диэлектрическая линза; диаграмма направленности; диаграмма Вольперта – Смита; коэффициент стоячей волны.

Введение

Для повышения устойчивости и надежности радиосвязи в широкой полосе частот для управления и обмена информацией между специальными малогабаритными роботизированными комплексами (например, беспилотными летательными аппаратами) и пунктом управления необходимо изыскивать возможности повышения энергетического потенциала на интервале роботизированное устройство – пункт управления. Вариантом технического решения увеличения уровня сигнала на интервале могут являться разработка и внедрение малогабаритных, экономичных антенных устройств с повышенным уровнем излучаемой электромагнитной энергии [1; 2], построенных на базе линзовых структур различной конфигурации,

исполненных из современных диэлектрических материалов. В частности, для повышения энергетического потенциала полноазимутальных антенн используются линзы различного типа [3–7].

1. Вариант полноазимутальной антенны

В статье предложен вариант полноазимутальной антенны, конструкция которой основана на фазокорректирующем свойстве диэлектрической цилиндрической линзы [8].

Антенна представляет собой цилиндр из полистирола с воронкообразным (гиперболическим) отверстием, плечо несимметричного вибратора конической формы (ориентированное вертикально по оси симметрии в отверстии цилиндра), которые закреплены на металлизированной круглой

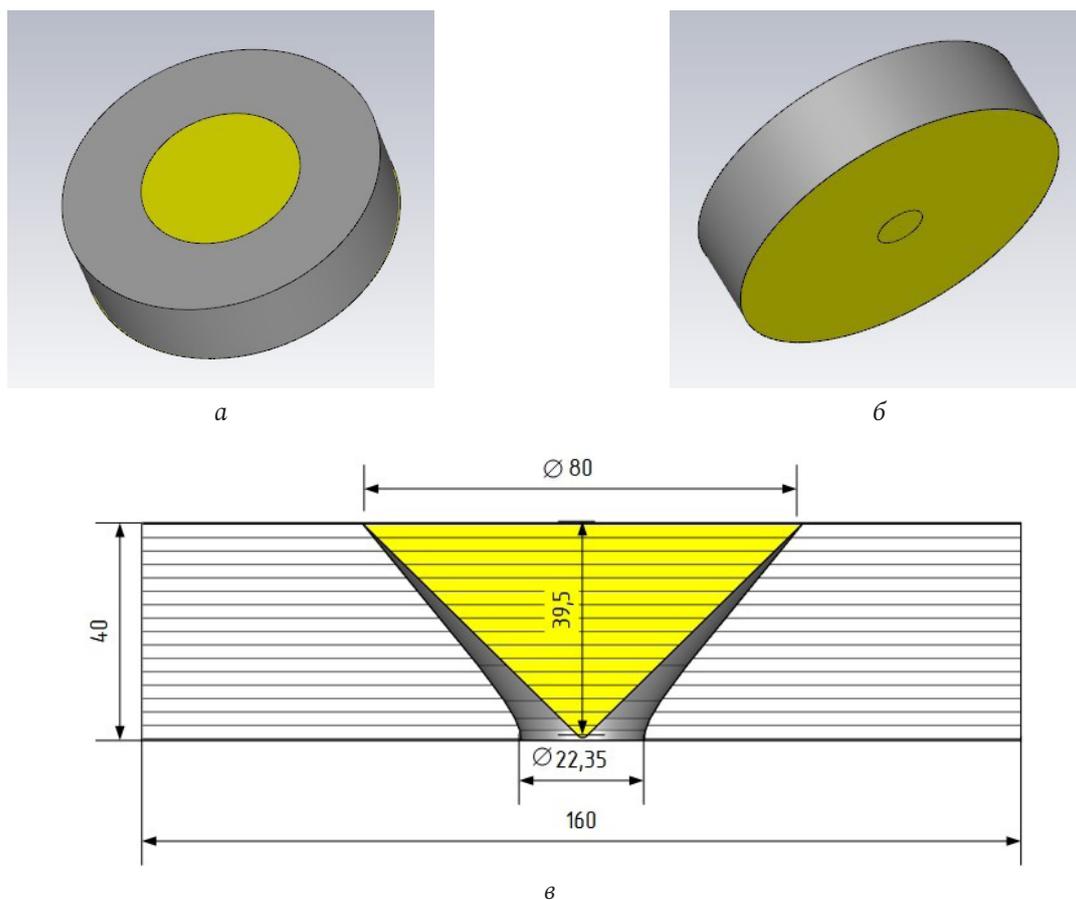


Рис. 1. Вид антенны: *a* – сверху; *b* – снизу; *в* – в разрезе
Fig. 1. Antenna view: *a* – from above; *b* – from below; *c* – in section

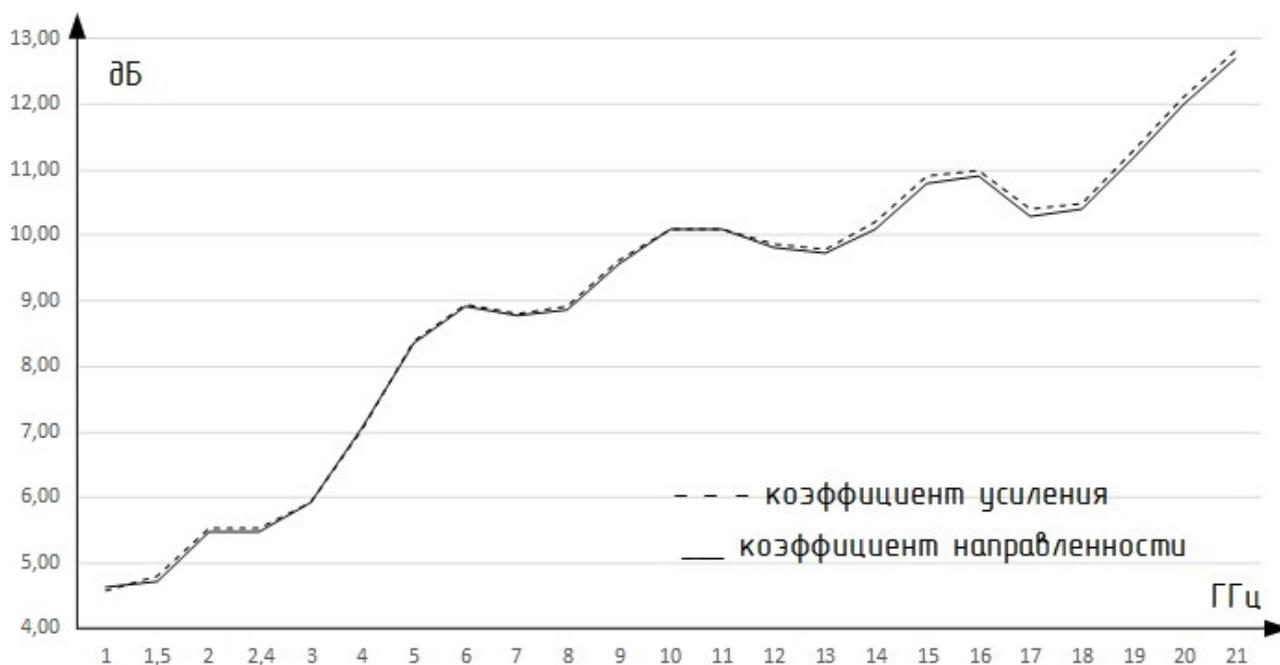


Рис. 2. Зависимость коэффициента направленности и коэффициента усиления антенны от частоты
Fig. 2. The dependence of the directivity and antenna gain on frequency

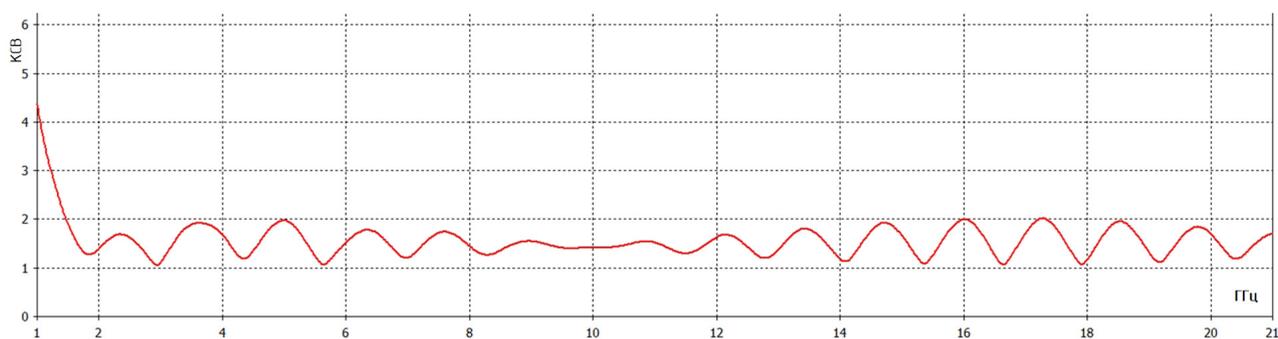
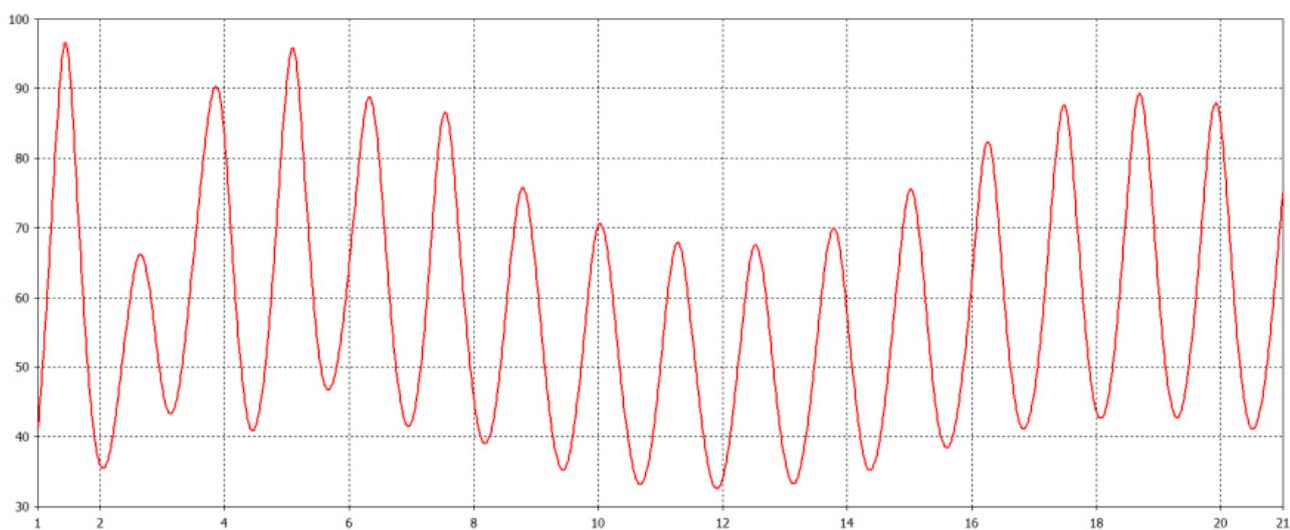
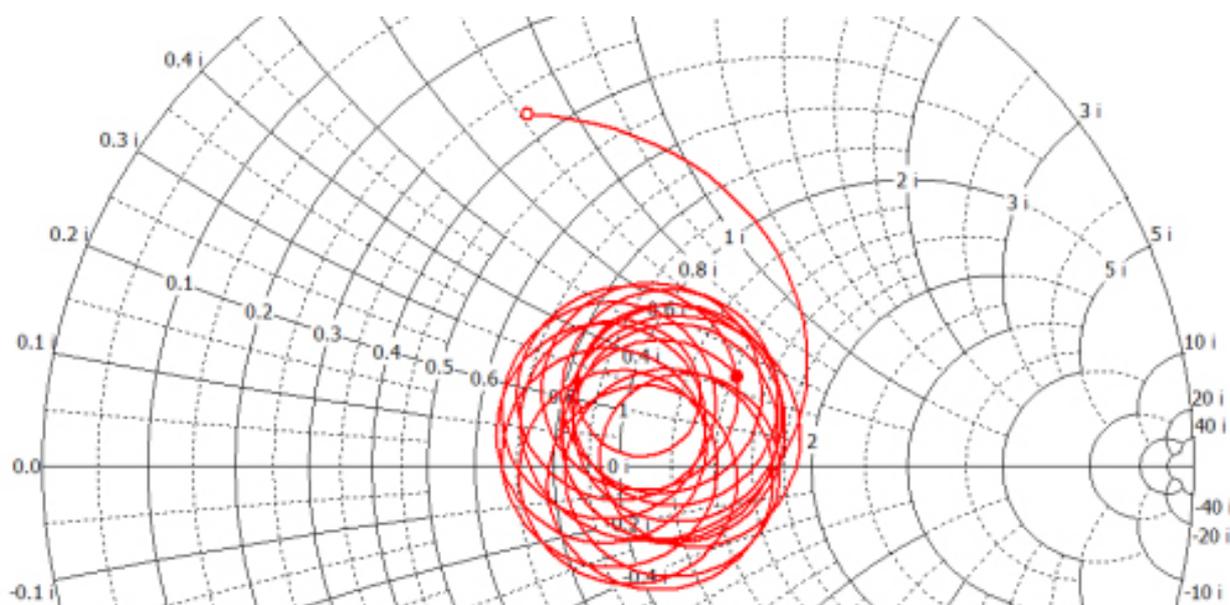


Рис. 3. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты
Fig. 3. Standing wave ratio versus frequency



a



б

Рис. 4. Результаты численного моделирования: *a* – комплексное сопротивление (Z , Ом) в исследуемой полосе частот; *б* – диаграмма Вольперта – Смита
Fig. 4. Numerical simulation results: *a* – complex impedance (Z , Ohm) in the investigated frequency band; *b* – Wolpert–Smith diagram

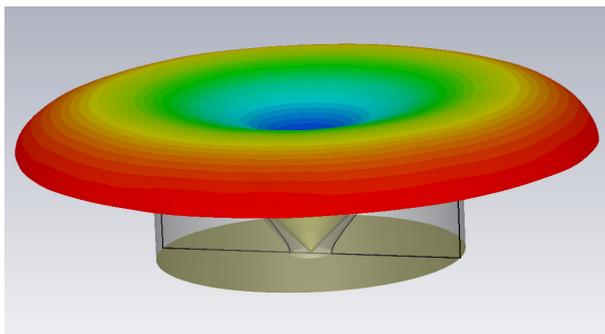


Рис. 5. Расчетный вид диаграммы направленности на рабочей частоте 5,6 ГГц
 Fig. 5. Calculated view of the radiation pattern at the operating frequency of 5,6 GHz

Табл. Диаграммы направленности по углу места
 Table. Diagrams of directivity by elevation angle

Частота, ГГц	Вид диаграммы направленности	Частота, ГГц	Вид диаграммы направленности
1		10	
1,5		11	
2		12	
2,5		13	
3		14	

Окончание Табл.
End of the Table

Частота, ГГц	Вид диаграммы направленности	Частота, ГГц	Вид диаграммы направленности
4		16	
5		17	
6		18	
7		19	
8		20	
9		21	



Рис. 6. Действующий макет антенны
Fig. 6. Active antenna layout

подложке, выступающей в роли основания конструкции и области нулевого потенциала для вибраторной антенны. Общий вид и геометрические размеры представлены на рис. 1.

Круглая металлическая подложка диаметром, равным диаметру цилиндра линзы, выполнена из тонколистовой меди.

Питание антенны организуется подключением фидерной линии с волновым сопротивлением 50 Ом (центральная жила коммутируется к вершине конуса, оплетка – к поверхности медной подложки).

Тело линзы антенны возможно исполнить при помощи FDM-технологии, при промышленном производстве – методом литья под давлением.

2. Результаты численного эксперимента

На рис. 2–5 приведены результаты численного анализа характеристик антенны, произведенного в полосе частот от 1 ГГц до 21 ГГц.

Расчетные значения коэффициента усиления в указанном диапазоне варьируются от 4 до 13 дБ. Причем на частотах диапазона 2,4–5,6 ГГц (который в настоящий момент используют для организации прямых широкополосных каналов радиосвязи с роботизированными комплексами) коэффициент усиления изменяется в пределах 5,5–9 дБ, что в 2–3 раза превосходит по данному параметру часто применяемые штыревые антенны.

Коэффициент стоячей волны почти во всем исследуемом диапазоне в целом находится в пределах от 1 до 2, что подтверждает работоспособность разработанной модели антенны в широкой полосе частот.

Импедансная характеристика и диаграмма Вольперта – Смита показали предварительный расчетный разброс входного сопротивления антенны от 30 до 95 Ом, что скажется на согласовании антенны с пятидесятиомным фидерным трактом. Данный разброс, как вариант, возможно компенсировать подключением согласующего трансформатора.

Использование подстилающей металлизированной подложки в сочетании с фазокорректирующей линзой позволили получить предварительную расчетную диаграмму направленности квазитороидальной формы, усеченной в горизонтальной плоскости (рис. 5). Диаграммы направленности в угломестной плоскости для всех рассмотренных рабочих частот приведены в таблице.

Для оценки габаритно-массовых показателей на основе разработанной модели антенны с использованием технологии FDM был исполнен действующий макет, изображенный на рис. 6. Масса антенного устройства составила 126,22 г.

Заключение

1. Полученные габаритно-массовые параметры предоставляют возможность разместить разработанную антенну на роботизированном устройстве среднего класса без ощутимого влияния на общие габариты и массу конструкции.

2. По расчетным значениям коэффициента усиления, импедансной характеристике, значениям коэффициента стоячей волны представленная модель антенны способна конкурировать со штыревыми антеннами, применяемыми в известных образцах роботизированной техники [9], хотя несколько проигрывает в массе (что, естественно, диктуется наличием линзы).

3. Полученная диаграмма направленности позволяет спрогнозировать возможность применения данной антенны в составе оборудования канала передачи данных роботизированных комплексов, так как реализуется режим полного излучения с относительно высоким уровнем.

Перспективу работы с данной моделью антенны авторы видят в уменьшении габаритно-массовых параметров линзового устройства и улучшении условий согласования за счет внесения структурных изменений на поверхностях линзы.

Список литературы

1. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны. М.: Советское радио, 1974. 280 с.
2. Кашин С.В. Расчет линз из однородного диэлектрика // Радиотехника. 1990. № 1. С. 87–88.
3. Патент 2019112696 (2713034 Российская Федерация). Многослойная диэлектрическая тороидальная антенна / Алиев Д.С., Беляев М.П., Войтенко С.Р., Иванов А.В., Иванов А.В., Пастернак Ю.Г.; приоритет от 25.04.2019. 10 с.
4. Патент 2005121890/09 (2297698 Российская Федерация). Тороидальная линзовая антенна с электрическим сканированием в полном телесном угле / Медведев Ю.В., Скородумов А.И., Харланов Ю.Я.; приоритет от 11.07.2005. 9 с.
5. Патент 2019133029 (195549 Российская Федерация). Интегральная плоская диэлектрическая линзовая антенна миллиметрового диапазона длин волн / Минин И.В., Минин О.В.; приоритет от 16.10.2019. 8 с.
6. Патент 2002124008/09 (2236073 Российская Федерация). Тороидальная линзовая антенна с электронным сканированием в двух плоскостях / Захаров Е.В., Ильинский А.С., Медведев Ю.В., Скворчевская Е.И., Харланов Ю.Я.; приоритет от 11.09.2002. 9 с.
7. Патент 98109732/09 (2147150 Российская Федерация). Сканирующая тороидальная линзовая антенна / Левченко С.Н., Харланов Ю.Я.; приоритет от 26.05.1998. 9 с.
8. Полноазимутальная антенна наземного пункта управления / Д.С. Алиев [и др.] // Перспективы развития комплексов с БПЛА, систем и средств технической эксплуатации: сб. ст. по материалам I Всероссийской НПК «Беспилотная авиация: состояние и перспективы развития» (5–6 марта 2019 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. 256 с. С. 118–123.
9. Cobham Antenna Systems // Antennas & accessories. Cobham 2021. URL: <https://www.european-antennas.co.uk/products> (дата обращения: 10.03.2021).

References

1. Zelkin E.G., Petrova R.A. *Lens Antennas*. Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 280 p. (In Russ.)
2. Kashin S.V. Calculation of lenses from a homogeneous dielectric. *Radiotekhnika*, 1990, no. 1, pp. 87–88. (In Russ.)
3. Patent 2019112696 (2713034 Russian Federation). Multilayer dielectric toroidal antenna / Aliev D.S., Belyaev M.P., Voitenko S.R., Ivanov A.V., Ivanov A.V., Pasternak Yu.G.; priority from 25.04.2019, 10 p.
4. Patent 2005121890/09 (2297698 Russian Federation). Toroidal lens antenna with electrical scanning in full solid angle / Medvedev Yu.V., Skorodumov A.I., Harlanov Yu.Ya.; priority from 11.07.2005, 9 p.
5. Patent 2019133029 (195549 Russian Federation). Integrated flat dielectric lens antenna of millimeter wavelength range / Minin I.V., Minin O.V.; priority from 16.10.2019, 8 p.
6. Patent 2002124008/09 (2236073 Russian Federation). Toroidal lens antenna with electronic scanning in two planes / Zakharov E.V., Ilinsky A.S., Medvedev Yu.V., Skvorchevskaya E.I., Harlanov Yu.Ya.; priority from 11.09.2002, 9 p.
7. Patent 98109732/09 (2147150 Russian Federation). Scanning toroidal lens antenna / Levchenko S.N., Harlanov Yu.Ya.; priority from 26.05.1998, 9 p.
8. Aliev D.S. et al. Full azimuth ground control antenna. *Perspektivy razvitiya kompleksov s BPLA, sistem i sredstv tehnichej ekspluatatsii: sb. st. po materialam I Vserossijskoj NPK «Bespilotnaja aviatsija: sostojanie i perspektivy razvitiya»* (5–6 marta 2019 g.). Voronezh: VUNTs VVS «VVA», 2019, pp. 118–123. (In Russ.)
9. Cobham Antenna Systems. Antennas & accessories. Cobham 2021. URL: <https://www.european-antennas.co.uk/products> (accessed: 10.03.2021).

Physics of Wave Processes and Radio Systems 2021, vol. 24, no. 3, pp. 92–99

DOI 10.18469/1810-3189.2021.24.3.92-99

Received 8 April 2021
Accepted 31 May 2021

Asymmetrical dipole antenna based on a phase-correcting dielectric lens

Dmitry S. Aliev¹, Alexander V. Ivanov¹, Yuri G. Pasternak²,
Vladimir A. Pendyurin³, Egor S. Chesnokov¹

¹ MERC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy»
54a, Staryh Bolshevikov Street,
Voronezh, 394064, Russia

² Voronezh State Technical University
84, 20-letiya Oktyabrya Street,
Voronezh, 394006, Russia

³ JSC RPE «Automated communication systems»
108, Peshe-Streletskaia Street,
Voronezh, 394062, Russia

Abstract – Problem. Modern mobile robotic systems are increasingly used in various fields of human activity. More and more stringent requirements are imposed on them to ensure high throughput, broadband and reliability of data transmission and control channels at the maximum distance from the control center. And what I would like to note separately is the requirement to reduce the cost of such complexes as much as possible. Therefore, the development of technologically advanced, economically feasible antenna systems that provide an increase in the energy potential of the radio channel in the interval of the robotic complex - control point is one of the ways to solve this problem. **Formulation of the problem.** It is required to develop a mechanically strong, technological antenna, built on the basis of lens structures of various configurations, made of modern dielectric materials, characterized by reduced weight and size characteristics and cost price, which will increase the level of radiated electromagnetic energy in a wide frequency band. **Purpose of the article.** Present the developed model of an asymmetric dipole antenna and the results of a numerical experiment. **Result.** The antenna design is made on a metallized round substrate and is a polystyrene cylinder with a funnel-shaped hole, inside which there is an asymmetrical conical vibrator arm. The results of calculations showed that in the frequency band, which is used to organize direct broadband radio communication channels with robotic complexes, the gain varies within 5.5-9 dB, which is superior in this parameter to the commonly used whip antennas. The calculated standing wave ratio confirms the performance of the developed antenna model in a wide frequency band. The impedance response and the Smith-Smith diagram showed a preliminary calculated spread of the input impedance of the antenna from 30 to 95 ohms. **Practical significance.** The proposed antenna model ensures manufacturability, mechanical strength, and low cost. The full-azimuth radiation mode and increased gain make it possible to predict the possibility of using this antenna as part of the equipment for the data transmission channel and control of robotic complexes such as unmanned aerial vehicles.

Keywords – asymmetrical dipole antenna; dielectric lens; directional pattern; Smith diagram; standing wave ratio.

Информация об авторах

Алиев Дмитрий Сергеевич, 1969 г. р., научный сотрудник научно-исследовательского отдела ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: электродинамика, техника СВЧ.
E-mail: for_registr_only@mail.ru

Иванов Александр Владимирович, 1969 г. р., кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: электродинамика, техника СВЧ.
E-mail: ivanovalexandr7070@mail.ru

Пастернак Юрий Геннадиевич, 1966 г. р., доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных устройств и систем Воронежского государственного технического университета, г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: электродинамика, физика полупроводников, техника СВЧ.
E-mail: pasternakyg@mail.ru

Пендюрин Владимир Андреевич, 1960 г. р., генеральный директор АО НПП «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: техника СВЧ.
E-mail: pva@acc-npp.com

Чесноков Егор Сергеевич, 2002 г. р., курсант ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия.

Область научных интересов: электродинамика, радиотехнические системы
E-mail: vaiu@mil.ru

Information about the Authors

Dmitry S. Aliev was born in 1969, researcher of the Research Department, MERC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics, microwave technology.
E-mail: for_registr_only@mail.ru

Alexander V. Ivanov was born in 1969, Candidate of Technical Sciences, associate professor, senior researcher of the Research Department, MERC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics, microwave technology.
E-mail: ivanovalexandr7070@mail.ru

Yuri G. Pasternak was born in 1966, Doctor of Technical Sciences, professor of the Department of Radioelectronic Devices and Systems, Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia.

Research interests: electrodynamics, semiconductor physics, microwave technology.
E-mail: pasternakyg@mail.ru

Vladimir A. Pendyurin was born in 1960, CEO of JSC RPE «Automated communication systems», Voronezh, Russia.

Research interests: microwave technology.
E-mail: pva@acc-npp.com

Egor S. Chesnokov was born in 2002, cadet of MERC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Voronezh, Russia.

Research interests: applied electrodynamics, radio systems.
E-mail: vaiu@mil.ru