

Создание кольцевой антенной решетки на основе излучателей Вивальди для широкополосного канала связи с ретрансляцией

П. А. Межевов[✉], К. О. Коровин, А. Н. Ликонцев

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, Россия

[✉]mezhevov.pav@mail.ru

Аннотация

Введение. В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) находят все более широкое применение. Одной из задач развития БПЛА является создание активных антенных систем с возможностью установки узкого луча главного лепестка диаграммы направленности (ДН). Несмотря на то, что во многих исследованиях рассматривается создание специализированных антенных решеток с широким диапазоном углов сканирования, особенности расположения таких систем на БПЛА не изучались подробно. После разработки таких решеток для БПЛА возможно создание цепи ретрансляции с защищенным широкополосным каналом.

Цель работы. Разработка широкополосной антенной системы для БПЛА с возможностью установки главного лепестка ДН в любом направлении азимутальной плоскости для использования в задачах ретрансляции.

Материалы и методы. В рамках исследования разработана модель излучателя и кольцевой антенной решетки на его основе в пакете электромагнитного моделирования Ansys HFSS.

Результаты. Показаны частотные зависимости коэффициента направленного действия (КНД) и коэффициента усиления (КУ) для кольцевой антенной решетки, состоящей из 8 и 16 элементов, а также частотные зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению и ДН, удовлетворяющие условиям ретрансляции в широкой полосе частот с использованием БПЛА. Представлены рекомендации по количеству активных элементов кольцевой решетки для обеспечения максимума КУ (КНД).

Заключение. Предложены конструктивные решения для использования антенных систем на БПЛА. В дальнейшем система может быть улучшена за счет оптимизации элементов антенной решетки и использования цилиндрической или полусферической решетки.

Ключевые слова: БПЛА, кольцевая антенная решетка, антенна Вивальди, ретрансляция, широкополосный канал связи

Для цитирования: Межевов П. А., Коровин К. О., Ликонцев А. Н. Создание кольцевой антенной решетки на основе излучателей Вивальди для широкополосного канала связи с ретрансляцией // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 3. С. 58–66. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-58-66

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 17.03.2023; принята к публикации после рецензирования 11.05.2023; опубликована онлайн 29.06.2023



Creation of a Vivaldi-Based Circular Antenna Array for Broadband Relay Channels

Pavel A. Mezhevov[✉], Konstantin O. Korovin, Aleksey N. Likontsev

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University
of Telecommunications, St Petersburg, Russia

[✉]mezhevov.pav@mail.ru

Abstract

Introduction. Unmanned aerial vehicles (UAVs) are rapidly gaining in popularity. The UVA development requires active antenna systems capable of forming a narrow beam of the main lobe of the radiation pattern. Although numerous studies have considered specialized antenna arrays with a wide range of scanning angles, the location of such systems on UAVs remains under-investigated. The development of such arrays for UAVs will enable the creation of a secure relay broadband channel with a few repeaters.

Aim. Development of a broadband antenna array for UAVs with the possibility of setting the main lobe of the radiation pattern in any direction of the azimuthal plane, for use in relay tasks.

Materials and methods. An emitter model and a circular antenna array on its basis was developed in the Ansys HFSS electromagnetic modeling package.

Results. The dependence of the directional coefficient and the gain for an array consisting of 8 and 16 elements was shown. Voltage standing-wave ratio dependences and directivity patterns that satisfy the conditions of retransmission in a wide-frequency band using UAVs were obtained. Recommendations on the number of active elements in a circular antenna array that ensure the maximum gain (directivity) were formulated.

Conclusion. Technical solutions that can be used in the development of UAVs are proposed. The system can be further improved by optimizing the antenna array elements and using a cylindrical or hemispherical array.

Keywords: UAV, circular antenna array, Vivaldi antenna, relay, broadband communication channel

For citation: Mezhevov P. A., Korovin K. O., Likontsev A. N. Creation of a Vivaldi-Based Circular Antenna Array for Broadband Relay Channels. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 3, pp. 58–66. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-3-58-66

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 17.03.2023; accepted 11.05.2023; published online 29.06.2023

Введение. В настоящее время область беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) активно развивается, что требует создания каналов в связи с растущими возможностями. Ввиду роста возможностей оптики и телевизионных матриц требуется увеличение пропускной способности канала, а следовательно – и рабочей полосы системы. При этом системы малого радиуса действия могут работать в пределах прямой видимости, а для систем средней и большей дальности требуется использование спутникового канала либо ретранслятора. В настоящее время возможности использования спутников ограничены, в связи с чем особый интерес вызывает возможность ретрансляции сигнала.

В связи с особенностями распространения радиоволн существует ограничение на даль-

ность работы радиоканала, что делает неизбежным применение ретрансляторов для каналов большой дальности.

Исследования каналов на БПЛА с ретрансляцией описаны в [1–3], однако конкретные антенные системы для таких систем не рассматриваются.

Существующие антенны и антенные системы для БПЛА в основном являются ненаправленными и обладают малым коэффициентом усиления [4].

Исследования, посвященные кольцевой антенной решетке (КАР) для БПЛА, в основном нацелены на работу антенной системы в нескольких диапазонах частот при обеспечении круговой диаграммы направленности (ДН) [5].

Целью данной статьи является разработка широкополосной антенной системы для БПЛА с возможностью установки главного лепестка ДН в любом направлении азимутальной плоскости для использования в задачах ретрансляции. Для достижения данной цели в ходе исследования были поставлены задачи выбора антенной системы и ее дальнейшего проектирования с учетом использования в качестве бортовой антенной системы БПЛА.

Выбор бортовой антенной системы. На текущий момент все больше систем связи используют БПЛА в различных целях [6, 7]. Обеспечение необходимого уровня помехоустойчивости, а также создание легких и малогабаритных антенн становится актуальной задачей. БПЛА являются подвижными объектами с переменным во времени положением в пространстве, поэтому необходимо использовать либо ненаправленные антенны, либо антенны с возможностью изменения ДН вплоть до изменения направления главного лепестка на 180° в обе стороны. Ненаправленные антенны обладают низким коэффициентом усиления (КУ), что приводит к значительному уменьшению дальности связи с наземной станцией и сокращению зоны обслуживания БПЛА.

В отличие от ненаправленных антенн антенные системы, позволяющие изменять ДН, повышают помехоустойчивость канала за счет пространственной селекции помех, т. е. за счет установки нулей ДН антенной системы [8]. Помехоустойчивость канала также можно повысить, расширяя спектр сигнала, например с помощью системы псевдослучайной перестройки рабочей частоты. Однако для приме-

нения методов расширения спектра требуются широкополосные антенны.

В итоге для бортовой антенной системы можно установить следующие требования:

- возможность работы в любом направлении;
- возможность установки нулей в ДН;
- широкополосность.

Для указанных требований выбор бортовой системы очевиден – это антенная решетка (АР). Для изменения частоты работы бортовая антенная система должна состоять из широкополосных антенн либо из нескольких антенн разных диапазонов. Для бортовой системы предпочтительны широкополосные антенны, так как это позволяет уменьшить массогабаритные параметры антенной системы [9].

Геометрия и расположение АР на БПЛА могут различаться. Например, можно расположить несколько линейных АР в крыльях БПЛА (рис. 1, *а*). Это позволяет успешно синтезировать ДН с произвольным положением максимума вдоль направления движения БПЛА. Однако такое расположение излучателей обладает серьезным недостатком – невозможностью формирования ДН в направлении поперек движения БПЛА. Предпочтительным вариантом расположения антенной системы на БПЛА является использование КАР (рис. 1, *б*). В этом случае КУ будет меньше КУ линейной решетки с одинаковым количеством излучателей, при этом появляется возможность синтеза максимума ДН для произвольного угла азимутальной плоскости [10]. Такую антенную систему целесообразно устанавливать в нижней полусфере БПЛА, чтобы уменьшить влияние фюзеляжа на характеристики КАР [11].

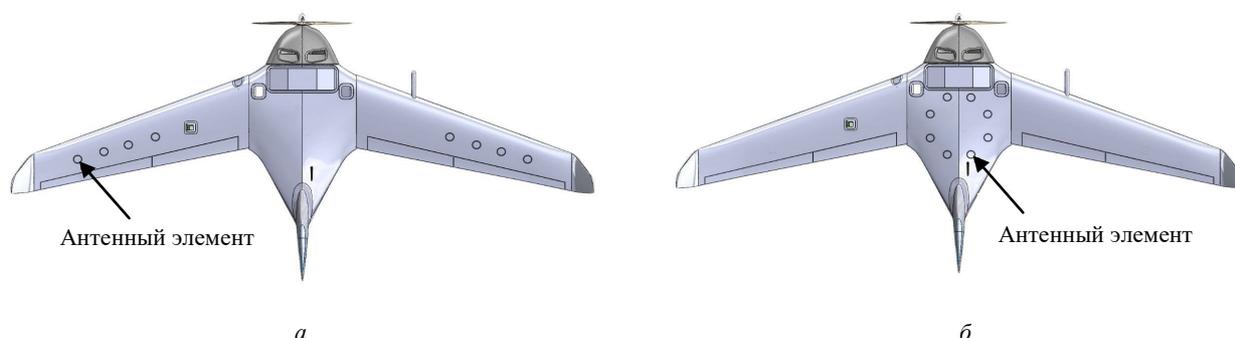


Рис. 1. Расположение излучателей АР на БПЛА: *а* – линейная АР в крыльях; *б* – КАР под корпусом

Fig. 1. Location of the AA emitters on the UAV: *a* – linear AA in the wings; *b* – circular AA under the body

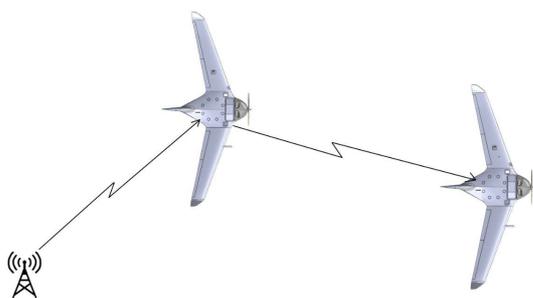


Рис. 2. Принцип ретрансляции сигнала с использованием КАР
Fig. 2. Principle of signal retransmission using a circular antenna array

В данной статье предлагается использовать КАР, что позволит устанавливать максимумы и нули ДН для произвольных углов азимутальной плоскости при решении задачи устранения и внесистемных помех. Одним из важных преимуществ КАР является возможность одновременного формирования максимумов ДН, разнесенных по азимуту на углы, большие 90° , что позволяет использовать БПЛА в качестве ретранслятора (рис. 2).

Выбор излучателя КАР. Основными требованиями, предъявляемыми к излучателю КАР, являются широкополосность, компактность и направленность. Для соблюдения требований к антенной системе БПЛА и повышения помехоустойчивости методами расширения спектра может быть выбрана антенна Вивальди, так как она обладает относительно небольшими размерами и является широкополосной, с возможностью расширения полосы до разряда сверхширокополосных [12].

КУ излучателя Вивальди обычно находится в диапазоне 5...10 дБ [13], ширина основного лепестка ДН – в пределах $30...50^\circ$. Это свидетельствует о пригодности антенны Вивальди для создания АР на ее основе.

Существуют различные формы раскрытия антенны Вивальди (рис. 3), которые непосредственно влияют на такие выходные параметры, как ДН и волновое сопротивление. В [14] описываются методы питания и приводятся выходные параметры для разных конструктивных вариантов антенны Вивальди, возбуждаемых с помощью интегрированного в подложку волновода.

В данной статье выбрана классическая антенна Вивальди с экспоненциальным раскры-

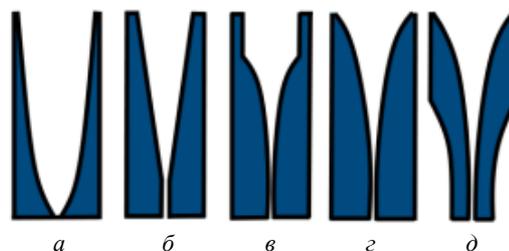


Рис. 3. Основные формы раскрытия антенны Вивальди:
а – параболический; б – линейный; в – Ферми;
г – экспоненциальный; д – двухэкспоненциальный
Fig. 3. The main forms of Vivaldi antenna aperture:
а – parabolic; б – linear; в – Fermi; г – exponential;
д – two-exponential

вом, так как такой раскрыв показывает наилучшие характеристики согласования с питающей линией, т. е. обладает наибольшей полосой рабочих частот.

Существует большое количество разнообразных способов питания антенн Вивальди. В [13] рассмотрены основные виды подключения микрополосковой линии (МППЛ). Для проектирования излучателя КАР было выбрано подключение с помощью прямоугольной МППЛ.

Проектирование излучателя и КАР. В качестве материала проводника излучателя и МППЛ была выбрана медь, а в качестве диэлектрика – стеклотекстолит FR4. Выбор материалов обусловлен широким использованием при создании различного радиотехнического оборудования [15].

При проектировании было решено отказаться от кольцевого резонатора в конструкции излучателя для уменьшения длины излучателя. При таком методе запитки излучающей щели антенна остается согласованной на меньший диапазон частот. В зависимости от требований к бортовой антенной системе в конструкцию можно вносить изменения для повышения рабочей полосы частот.

Разъемы SMA, используемые для питания всех элементов КАР, были вынесены вниз для дальнейшего размещения в нижней части корпуса антенной системы.

Излучатель, построенный в Ansys HFSS, представлен на рис. 4, а. Выходными параметрами для излучателя являются ДН (рис. 4, б) и допустимые частоты использования. На рис. 5 приводится полученная частотная зависимость коэффициента стоячей волны по напряжению

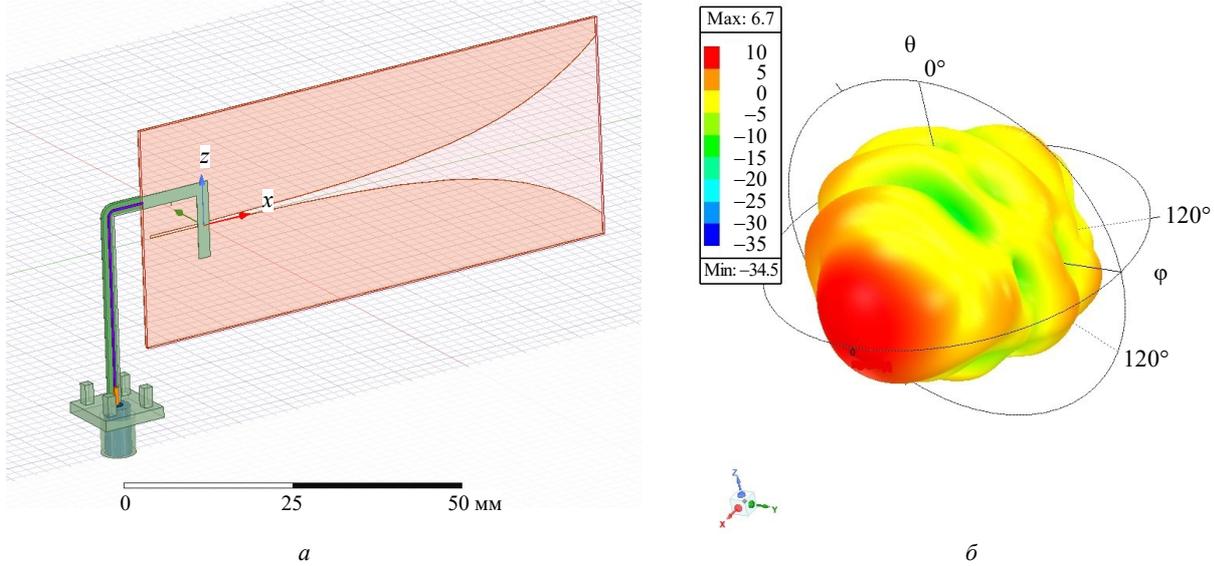


Рис. 4. Излучатель Вивальди: а – с питанием; б – его ДН

Fig. 4. Vivaldi emitter: a – with power supply; б – its radiation pattern

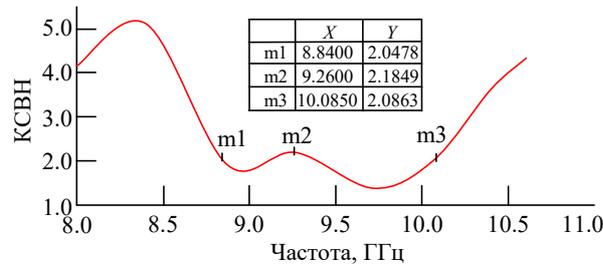


Рис. 5. КСВН излучателя Вивальди

Fig. 5. VSWR of the Vivaldi emitter

(КСВН). Маркерами m1, m3 обозначены границы полосы пропускания антенны; m2 – локальный максимум КСВН.

Для одиночного элемента Вивальди получены следующие результаты моделирования:

- ширина ДН в азимутальной плоскости – 44°;

- КУ в направлении максимума – 6.7 дБи;
- рабочая полоса частот – от 8.8 до 10.1 ГГц;
- уровень боковых лепестков – -7 дБ.

Итоговой задачей проектирования становится создание КАР из излучателей Вивальди с возможностью изменения частоты работы и ДН для получения главного лепестка излучения в любом азимутальном положении.

На основе данного излучателя были спроектированы КАР из 8 и 16 элементов. Для максимизации КУ АР было принято решение о частичной запитке излучателей. Для 8-элементной АР 3 соседних активных излучателя являются оптимальным выбором. При необходимости перестройки ДН необходимо изменять выбор трех соседних элементов, что сокращает требования к максимальному пово-

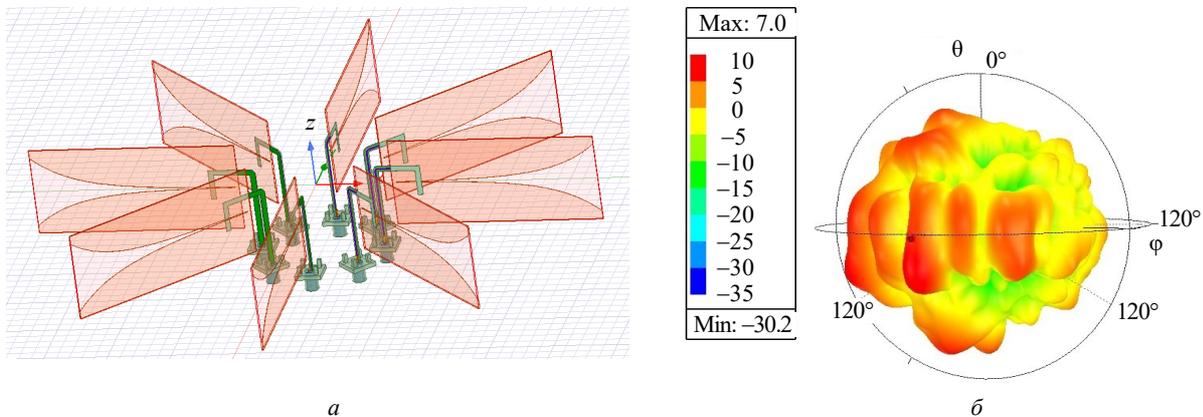


Рис. 6. КАР из 8 элементов (а) и ее ДН (б)

Fig. 6. Circular antenna array of 8 elements (a) and its radiation pattern (б)

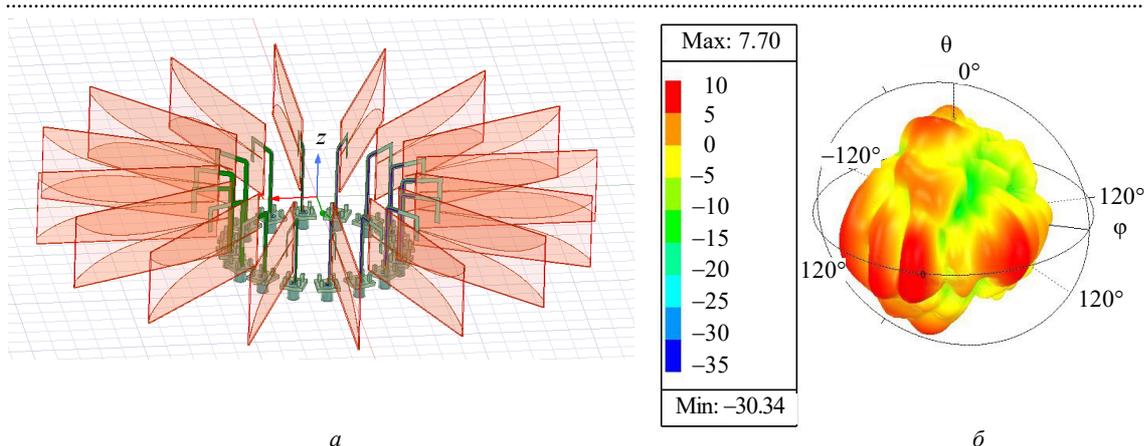


Рис. 7. КАР из 16 элементов (а) и ее ДН (б)

Fig. 7. Circular antenna array of 16 elements (a) and its radiation pattern (b)

роту главного лепестка ДН до 22.5° . При использовании 16 элементов оптимальным будет выбор четырех или пяти излучателей, а требования к повороту уменьшаются еще сильнее – до 12.25° . Внешний вид КАР из 8 и 16 элементов показан на рис. 6, а и 7, а соответственно, а их ДН на рис. 6, б и 7, б.

Было произведено моделирование ДН КАР при разном количестве активных элементов M (8 и 3 элемента для 8-элементной КАР; 16, 5 и 3 элемента для 16-элементной КАР). В ходе моделирования изменялся радиус кольца и определялся максимум КУ антенной системы. Результаты приведены в таблице. Они показывают, что наилучшие показатели направленности антенны приобретают при использовании трех активных соседних элементов, что обу-

словлено наибольшим вкладом в ДН решетки соседних элементов. Предложенный в данной статье способ питания элементов КАР не позволяет уменьшить радиус кольца ниже 0.83λ для 8-элементной решетки и 1.31λ для 16-элементной решетки.

Зависимости КСВН от частоты для 8- и 16-элементной КАР представлены на рис. 8, 9 соответственно. Маркеры m1–m4 показывают границы полосы пропускания и локальные максимумы КСВН.

Как видно из графиков КСВН, 16-элементная КАР обладает меньшей полосой вследствие взаимного влияния элементов, но при этом имеет больший КУ.

Сценарии ретрансляции с помощью БПЛА подразумевают ситуации, когда угол между

Параметры кольцевой антенной решетки из антенн Вивальди для колец из 8 и 16 элементов

Parameters of an circular array of Vivaldi antennas for rings of 8 and 16 elements

Количество элементов (N)	Радиус кольца (R), λ	Количество активных элементов (M)	Частота (F), ГГц	Параметры направленности в направлении главного максимума (КНД/КУ), дБ
8	0.83	8	10	7.00/4.60
8	0.83	3	10	9.10/6.60
8	1	8	10	8.61/5.98
8	1	3	10	9.70/7.00
8	1.16	8	10	7.63/5.02
8	1.16	3	10	8.70/6.20
16	1.31	16	10	8.50/6.00
16	1.31	5	10	9.40/6.90
16	1.31	3	10	10.38/7.70
16	1.48	16	10	7.20/4.90
16	1.48	5	10	9.03/6.54
16	1.48	3	10	10.07/8.10
16	1.65	16	10	6.58/4.21
16	1.65	5	10	8.80/6.30
16	1.65	3	10	10.10/7.40

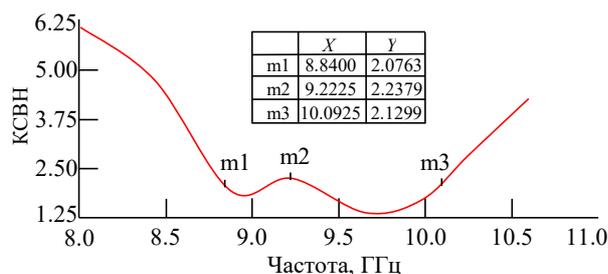


Рис. 8. КСВН КАР из 8 элементов Вивальди

Fig. 8. VSWR of circular antenna array of 8 Vivaldi elements

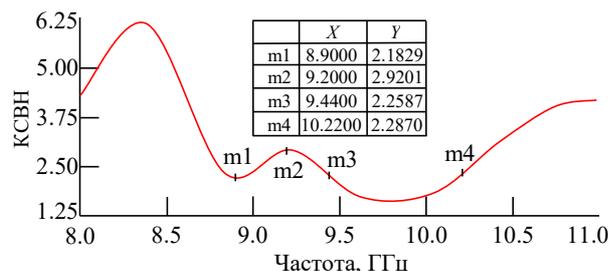


Рис. 9. КСВН КАР из 16 элементов Вивальди

Fig. 9. VSWR of circular antenna array of 16 Vivaldi elements

направлениями на источник и на корреспондента составляет 90° или больше (см. рис. 2), что позволяет использовать 3 элемента со стороны приема и 3 со стороны передачи, обеспечивая необходимую форму ДН. Для обеспечения ретрансляции в режиме полного дуплекса необходимо выставить 2 максимума ДН в направлении приема и ретрансляции. Использование КАР позволяет это сделать за счет большего количества активных элементов, но одновременно снижает КУ антенной системы на 3 дБ.

Использование системы обработки сигналов на борту БПЛА позволит обеспечить полудуплексный режим работы антенной системы, сохранив тем самым высокие показатели направленности.

Закключение. В статье приводится 2 варианта реализации бортовой антенной системы БПЛА – КАР с 8 и 16 элементами Вивальди. Использование КАР позволяет синтезировать ДН с необходимым направлением главного максимума излучения. Элемент Вивальди обеспечивает широкую рабочую полосу частот, что может быть использовано для повышения помехоустойчивости методами расширения спектра. В статье исследованы зависимости КУ и КНД от радиуса КАР, показано, что наилучшие показатели в настоящей работе достигаются при радиусе λ для 8-элементной системы и 1.31λ для 16-элементной системы. Также предложен вариант питания только 3–5 соседних излучателей для максимизации КУ в направлении главного максимума.

В дальнейшем может потребоваться доработка с точки зрения способа питания антенн для улучшения характеристик согласования с питающей линией и возможностью еще большего расширения рабочей полосы частот. Кроме того, следует учесть расположение АР на БПЛА и влияние борта на выходные параметры антенной системы. Также возможен вариант использования других разновидностей антенн Вивальди.

Для полноценной работы предложенной системы требуется создать диаграммообразующее устройство с возможностью реализации требуемого амплитудно-фазового распределения на любых трех соседних элементах.

Дальнейшим продолжением работы по созданию антенной системы с управляемым главным максимумом будет создание системы с возможностью управления лучом не только в азимутальной плоскости, но и в угломестной.

Список литературы

1. Channel modeling and performance analysis for UAV relay system / X. Chen, X. Hu, Q. Zhu, W. Zhong, B. Chen // China Communications. 2018. Vol. 15, № 12. P. 89–97. doi: 10.12676/j.cc.2018.12.007
2. Development and Testing of a Two-UAV Communication Relay System / B. Li, Y. Jiang, J. Sun, L. Cai, C.-Y. Wen // Sensors. 2016. Vol. 16, iss. 10. P. 1696. doi: 10.3390/s16101696
3. Outage Performance of Multi-Antenna Mobile UAV-Assisted NOMA Relay Systems Over Nakagami Fading Channels / T. M. Hoang, B. C. Nguyen,

- L. T. Dung, T. Kim // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 215033–215043. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041311
4. Low-Profile Conformal UWB Antenna for UAV Applications / L. I. Balderas, A. Reyna, M. A. Panduro, C. Del Rio, A. R. Gutiérrez // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 127486–127494. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939511
5. Dudarev S. V., Voytovich N. I., Dudarev A. V. Annular antenna array with a circular radiation pattern in the plane of vector E // American Institute of Physics. Conf. Ser. 2022. Vol. 2467, № 1. doi: 10.1063/5.0092572

6. Использование беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Ю. Н. Зубарев, Д. С. Фомин, А. Н. Чащин, М. В. Заболотнова // Вестн. Пермского федерального исследовательского центра. 2019. № 2. С. 47–51. doi: 10.7242/2658-705X/2019.2.5

7. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review // Applied Geomatics. 2014. № 6. P. 1–15. doi: 10.1007/s12518-013-0120-x

8. Нечаев Ю. Б., Зотов С. А., Макаров Е. С. Сверхразрешающие алгоритмы в задаче азимутальной радиопеленгации с использованием кольцевых антенных решеток // Антенны. 2007. № 7. С. 29–34.

9. Коровин К. О., Кузьмин С. В. Реализация канала связи с БПЛА с использованием широкополосных малоэлементных антенных решеток в качестве бортовых антенных систем // Тр. учебных заведений связи. 2020. Т. 6, № 2. С. 39–44. doi: 10.31854/1813-324X-2020-6-2-39-44

10. Uniform circular arrays for phased array antenna / N. H. Noordn, V. Zuniga, A. O. El-Rayis, N. Haridas, A. T. Erdogan, T. Arslan // Loughborough Antennas & Propagation Conf. Loughborough, UK, 14–15 Nov. 2011. Piscataway: IEEE, 2011. P. 1–4. doi: 10.1109/LAPC.2011.6114031

11. Низкопрофильная антенна для БПЛА / А. С. Антонов, Ю. Г. Антонов, С. В. Балландович, М. И. Сугак // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2013. № 6. С. 3–7.

12. Борзов А. Б., Лиходеенко К. П., Серегин Г. М. Принципы построения сверхширокополосной антенны Вивальди для импульсных приемопередающих модулей систем ближней радиолокации и радиосвязи // Спецтехника и связь. 2013. № 6. С. 54–57.

13. Compact UWB Vivaldi Tapered Slot Antenna / S. Saleh, W. Ismail, I. S. Z. Abidin, M. H. Jamaluddin, M. H. Bataineh, A. S. Alzoubi // Alexandria Engineering J. 2022. Vol. 61, № 6. P. 4977–4994. doi: 10.1016/j.aej.2021.09.055

14. Демшевский В. В., Цитович А. А., Папёнышев М. В. Антенна Вивальди на основе интегрированного в подложку волновода для сверхширокополосных автомобильных локаторов К-диапазона частот // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2019. Т. 1, № 1. С. 151–155.

15. The microwave and RF characteristics of FR4 substrates / J. R. Aguilar, M. Beadle, P. T. Thompson, M. W. Shelley // IEE Colloquium on Low Cost Antenna Technology. London, UK: IEEE, 1998. P. 2/1–2/6. doi: 10.1049/ic:19980078

Информация об авторах

Межевов Павел Александрович – аспирант и ассистент кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор четырех научных работ. Сфера научных интересов – антенны; СВЧ-устройства. Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22/1, Санкт-Петербург, 193232, Россия. E-mail: mezhevov.pav@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-9797-2575>

Коровин Константин Олегович – кандидат физико-математических наук (2009), доцент (2020), заведующий кафедрой радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор более 30 научных работ. Сфера научных интересов – антенны, антенные решетки; СВЧ-устройства. Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22/1, Санкт-Петербург, 193232, Россия. E-mail: konstkor@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7979-3725>

Ликонцев Алексей Николаевич – кандидат физико-математических наук (1990), доцент кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича. Автор 60 научных работ. Сфера научных интересов – спутниковые и радиорелейные системы; спутниковое и кабельное телевидение. Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, пр. Большевиков, д. 22/1, Санкт-Петербург, 193232, Россия. E-mail: likontsev-rts@mail.ru. <https://orcid.org/0009-0009-5562-2142>

References

1. Chen X., Hu X., Zhu Q., Zhong W., Chen B. Channel Modeling and Performance Analysis for UAV Relay System. China Communications. 2018, vol. 15, no. 12, pp. 89–97. doi: 10.12676/j.cc.2018.12.007

2. Li B., Jiang Y., Sun J., Cai L., Wen C.-Y. Development and Testing of a Two-UAV Communication

Relay System. Sensors. 2016, vol. 16, iss. 10, p. 1696. doi: 10.3390/s16101696

3. Hoang T. M., Nguyen B. C., Dung L. T., Kim T. Outage Performance of Multi-Antenna Mobile UAV-Assisted NOMA Relay Systems Over Nakagami Fading Channels. IEEE Access. 2020, vol. 8, pp. 215033–

Создание кольцевой антенной решетки на основе излучателей Вивальди

для широкополосного канала связи с ретрансляцией

Creation of a Vivaldi-Based Circular Antenna Array for Broadband Relay Channels

215043. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3041311

4. Balderas L. I., Reyna A., Panduro M. A., Del Rio C., Gutiérrez A. R. Low-Profile Conformal UWB Antenna for UAV Applications. IEEE Access. 2019, vol. 7, pp. 127486–127494. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2939511

5. Dudarev S. V., Voytovich, N. I., Dudarev, A. V. Annular Antenna Array with a Circular Radiation Pattern in the Plane of Vector E. American Institute of Physics. Conf. Ser. 2022, vol. 2467, no. 1. doi: 10.1063/5.0092572

6. Zubarev Yu. N., Fomin D. S., Chashchin A. N., Zabolotnova M. V. Use of Uncleaned Aircraft in Agriculture. Perm Federal Research Center J. 2019, no. 2, pp. 47–51. doi: 10.7242/2658-705X/2019.2.5 (In Russ.)

7. Nex F., Remondino F. UAV for 3D Mapping Applications: A Review. Applied Geomatics. 2014, no. 6, pp. 1–15. doi: 10.1007/s12518-013-0120-x

8. Nechaev Yu. B., Zotov S. A., Makarov E. S. Super-Resolution Algorithms in the Problem of Azimuthal Radio Bearing with Using Ring Antenna Arrays. *Antenny [Antennas]*. 2007, no. 7, pp. 29–34. (In Russ.)

9. Korovin K. O., Kuzmin S. V. Implementation of UAV Communication Channel Using Airborne Wide-Band Low-Element Antenna Arrays. Proc. of Telecommunication Universities. 2020, vol. 6, no. 2, pp. 39–44. doi: 10.31854/1813-324X-2020-6-2-39-44 (In Russ.)

10. Noordin N. H., Zuniga V., El-Rayis A. O., Haridas N., Erdogan A. T., Arslan T. Uniform Circular

Arrays for Phased Array Antenna. Loughborough Antennas & Propagation Conf. Loughborough, UK, 14–15 Nov. 2011. Piscataway, IEEE, 2011, pp. 1–4. doi: 10.1109/LAPC.2011.6114031

11. Antonov A. S., Antonov Yu. G., Ballandovich S. V., Sugak M. I. Low-Profile Antenna Intended for the Installation on UAV. Proc. of Saint Petersburg Electrotechnical University. 2013, no. 6, pp. 3–7. (In Russ.)

12. Borzov A. B., Lihodenko K. P., Seregin G. M. Principles of Construction of Ultra-Wideband Vivaldi Antenna for Pulsed Transmitter and Transmitter Modules of Near Radar and Radio Communication Systems. *Spectehnika i svjaz'*. 2013, no. 6, pp. 54–57. (In Russ.)

13. Saleh S., Ismail W., Abidin I. S. Z., Jamaluddin M. H., Bataineh M. H., Alzoubi A. S. Compact UWB Vivaldi Tapered Slot Antenna. Alexandria Engineering J. 2022, vol. 61, no. 6, pp. 4977–4994. doi: 10.1016/j.aej.2021.09.055

14. Demshevskii V. V., Tsitovich A. A., Papjonyshv M. V. Vivaldi Antenna Based on a Waveguide Integrated into the Substrate for Ultra-Wideband Automotive K-band Locators. Electronics and Microelectronics Microwave. 2019, vol. 1, no. 1, pp. 151–155. (In Russ.)

15. Aguilar J. R., Beadle M., Thompson P. T., Shelley M. W. The Microwave and RF Characteristics of FR4 Substrates. IEE Colloquium on Low Cost Antenna Technology. London, UK, IEEE, 1998, pp. 2/1–2/6. doi: 10.1049/ic:19980078

Information about the author

Pavel A. Mezhevov, Postgraduate Student and Assistant of the Department of Radio Systems and Signal Processing of The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of 4 scientific publications. Area of expertise: antennas; microwave devices.

Address: The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22/1, Bolshevikov Pr., St Petersburg 193232, Russia

E-mail: mezhevov.pav@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-9797-2575>

Konstantin O. Korovin, Cand. Sci. (Eng.) (2009), Docent (2020), Head of the Department of Radio Systems and Signal Processing of The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of more than 30 scientific publications. Area of expertise: antenna arrays; microwave devices.

Address: The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22/1, Bolshevikov Pr., St Petersburg 193232, Russia

E-mail: konstkor@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-7979-3725>

Aleksey N. Likontsev, Cand. Sci. (Eng.) (1990), Associate Professor of the Department of Radio Systems and Signal Processing of The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications. The author of 60 scientific publications. Area of expertise: satellite and radio relay systems; satellite and cable television.

Address: The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications, 22/1, Bolshevikov Pr., St Petersburg 193232, Russia

E-mail: likontsev-rts@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0009-5562-2142>