

АНТЕННА ДЛЯ МАЛОГО БЫСТРО РАЗВЕРТЫВАЕМОГО ПЕРЕНОСНОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

Д. Г. Король

Рассмотрены постановка задачи и результаты численного моделирования для антенны быстро развертываемого переносного комплекса управления беспилотным летательным аппаратом. Обеспечив широкополосность, можно использовать антенну для передачи на нескольких частотах по разным каналам связи и использовать более широкую рабочую полосу канала. Для работы была выбрана логопериодическая антенна, перекрывающая основные стандартные рабочие частоты диапазона 800 МГц – 5,8 ГГц. Полученные результаты продемонстрировали хорошую степень согласования (во всем диапазоне коэффициент стоячей волны ниже 2) и коэффициент усиления порядка 8,1 дБи. По полученной модели предложены варианты конструкторской реализации самой антенны и корпуса для удобного размещения в полевых условиях. При сравнении со стандартной штыревой антенной, получено двукратное преимущество в дальности связи логопериодической антенны.

Ключевые слова: логопериодическая антенна, станция управления беспилотными летательными аппаратами, широкополосная антенна, CST Microwave Studio.

Введение

Важной задачей сопровождения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является обеспечение надежной связи с его наземным комплексом. Перспективным направлением для решения указанной задачи является быстро развертываемые переносные наземные системы. Возможен подход с использованием системы с целью обнаружения беспилотного летательного аппарата при его попадании в радиус действия [1, 2].

Если есть заранее определенная частота передачи/приема сигнала и не требуется обеспечение широкой полосы сигнала, то можно применять узкополосные антенны. В [3] для системы наземного наведения предлагается двухдиапазонная антенна в виде диполей, выполненных на печатной плате. В [4] предложена антенна Уда – Яги для передачи сигнала беспилотнику.

В переносном небольшом комплексе быстрого развертывания в полевых условиях мы ограничены размерами антенны, а, следовательно, не можем использовать апертурные антенны с большим коэффициентом усиления. Обычно системы быстрого развертывания состоят из 1 – 3 антенн и, в некоторых случаях, оснащены приводом, позволяющим вести сопровождение БПЛА [5 – 6]. Для реализации такого сопровождения в комплексе должна присутствовать антенна, которая следит за направлением на БПЛА. В [7] для слежения используют моноимпульсную зеркальную антенну с излучателем в виде набора антенн Уда – Яги.

У БПЛА есть целый набор рабочих частот, перекрывающих отличные друг от друга диапазоны. Поэтому для минимизации количества антенн в переносном комплексе хорошим решением может стать применение широкополосных антенн [8] таких как логопериодическая, рупорная антенна Вивальди или спиральная антенна [9]. В [10] предложена гибридная конформная антенна с круговой поляризацией в виде спирали Архимеда для поддержания связи с БПЛА.

Целью работы является рассмотрение концепции в возможной реализации антенного наземного комплекса быстрого развертывания для управления БПЛА при размещении в полевых условиях и проработка антенны для такого комплекса, перекрывающей несколько частотных диапазонов.

Обзор существующих наземных станций управления

БПЛА в основном поддерживает связь через спутниковые системы [11 – 13] или напрямую с помощью наземной станции управления (НСУ). НСУ можно дополнительно разделить на относительно крупные, с командным пунктом для нескольких операторов, и малые, с одним оператором.

Среди крупных станций можно выделить НСУ для Bayraktar TB2 (рис. 1) [14]. Это быстро развертываемая станция, перевозимая на грузовом транспортном средстве. Она позволяет проводить управление БПЛА непосредственно на передовой, вдали от центральных командных центров. В эту систему входят несколько антенн, которые позволяют работать в трех диапазонах частот и поддерживать автоматическое направление на БПЛА. За счет того, что система довольно крупная, в ней используют антенны с большой подаваемой мощностью, что расширяет дальность возможной передачи информации.

Электронный источник питания, который питает бортовые системы, поддерживается тройными генераторами переменного тока и сбалансированными интеллектуальными литий-ионными аккумуляторами. В хвостовой части платформы размещен прочный блок камеры для наблюдения за полетом, а все данные полезной нагрузки и телеметрии записываются на бортовой регистратор данных. Алгоритмы слияния датчиков, включая инерциальную навигационную систему, обеспечивают навигацию и автоматическую посадку даже с потерей сигналов глобального позиционирования.

В таких станциях используются антенны быстрого развертывания. Обычно применяют несколько типов антенн как всенаправленного, так и направленного типа.

Если мы говорим о малых БПЛА, то для них выгодно применять традиционные передатчики типа «двойная ручка». В таких системах используют модифицированный передатчик в сочетании с сенсорным экраном. За экраном находится внутренний компьютер, на котором запущено программное обеспечение НСУ вместе с каналами передачи видео и данных. Также доступны более крупные блоки НСУ, которые обычно помещаются в кейсы. Кроме того установлены большие одиночные или двойные экраны, которые могут быть повышенной яркости или иметь антибликовое покрытие для улучшения видимости при ярком солнечном свете. Их можно разместить на земле, на переносном столе или со встроенными складными ножками. Командная станция Nightjar [15], представленная на рис. 2, для связи использует встроенные в кейс всенаправленные дипольные антенны.

Более сложные системы, которые требуют увеличения дальности связи с БПЛА, используют дополнительные отдельно выведенные направленные антенны. Ряд компаний [16, 17] комплектует наземные станции дополнительными направленными антеннами (рис. 3 – 4) для обеспечения прямой связи наземной станции и БПЛА.

Распределение частот некоторых типов беспилотных летательных аппаратов

Для целей разведки и контроля местности на малых дистанциях (до 20 км) обычно применяют квадрокоптеры или БПЛА самолетного типа (табл. 1). Наибольшую долю на мировом рынке квадрокоптеров занимает китайская фирма DJI. Наиболее популярным продуктом данной компании является квадрокоптер Mavic.

Французская компания Parrot является крупнейшим производителем квадрокоптеров в Европе. Компания получает заказы как для решения гражданских задач, так и для военных задач. Наиболее распространенным продуктом является квадрокоптер ANAFI USA.

Бельгийский производитель Sky-Hero поставляет модели тактических дронов Loki MkII, разработанные специально для спецподразделений быстрого реагирования США. Построен исключительно на компонентах натовского производства.

Американская фирма AeroVironment занимается производством беспилотников самолетного типа. Наиболее известные RQ-11 Raven, RQ-20 Puma, WASP.

Еще одной китайской фирмой по производству беспилотников является компания Walkera. Наиболее популярный на рынке продукт – квадрокоптер Voyager.

Таблица 1

Производители беспилотных летательных аппаратов и используемые частоты

| № | Фирма-производитель | Наименование беспилотного летательного аппарата | Тип беспилотного летательного аппарата | Рабочие частоты |
|---|---------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|
| 1 | DJI | Mavic | Квадрокоптер | 2,4; 5,8 ГГц |
| 2 | Parrot | ANAFI USA | Квадрокоптер | 2,4; 5,8 ГГц |
| 3 | Sky-Hero | Loki MkII | Квадрокоптер | 868/915 МГц; 2,4;5,8 ГГц |
| 4 | AeroVironment | RQ-11 Raven; RQ-20 Puma; WASP | Самолетный тип | 1,8 ГГц |
| 5 | Walkera | Voyager | Квадрокоптер | 1,4; 2,4 ГГц |



Рис. 1. Наземная станция управления Bayraktar TB2



Рис. 2. Командная станция Nightjar



Рис. 3. Переносные антенны Veronte для GCS



Рис. 4. Станция G-Case Duo UAS с применением зеркальной антенны

Логопериодическая антенна

В БПЛА для управления и передачи данных используются несколько общепригодных частот, таких как 868/915 МГц, 1,2 ГГц, 1,8 ГГц, 2,4 ГГц, 5,8 ГГц [18 – 21]. Выгодным решением считается использование логопериодических антенн (ЛПА). По конструкции схожи с антенной волновой канал, но их директоры переменной длины, изменяющиеся по логарифмическому закону. Они обладают широким частотным диапазоном и коэффициентом усиления порядка 6 – 14 дБ. Также плюсом будет являться возможность получения более широкой полосы пропускания канала, что позволяет повысить скорость передачи информации.

Общая методика расчета ЛПА представлена в [22 – 23]. Одним из плюсов ЛПА является слабая частотная зависимость коэффициента усиления. Данную антенну возможно выполнить в печатном исполнении, вырезать из цельного листового металла или собрать на металлическом профиле в виде прикручиваемых (сварных) штырей.

Наилучшим вариантом будет, когда одна антенна может применяться для передачи на нескольких частотах по разным каналам связи. ЛПА должна перекрывать диапазон 800 МГц – 5,8 ГГц. После предварительного расчета была создана модель в CST Microwave Studio. Размеры антенны и ее внешний вид представлены на рис. 5. Она изготавливается путем нарезки металлического листа и имеет коаксиальную запитку.

По результатам моделирования логопериодической антенны значение коэффициента стоячей волны (КСВ) в требуемом рабочем диапазоне не превышает 2, как показано на рис. 6.

На рис. 7 представлены характеристики направленности логопериодической антенны в двух плоскостях для ряда используемых частот 0,8; 1,2; 1,8; 2,4; 5,8 ГГц. Изменение коэффициента усиления на указанных частотах не превышает 10%, а средний уровень равен 8,1 дБмВт. Ширина главного лепестка в плоскости $\varphi = 90^\circ$ практически постоянна и его средняя величина равна 62 град. В плоскости $\theta = 90^\circ$ ширина изменяется в больших пределах. Полученные результаты моделирования представлены в табл. 2.

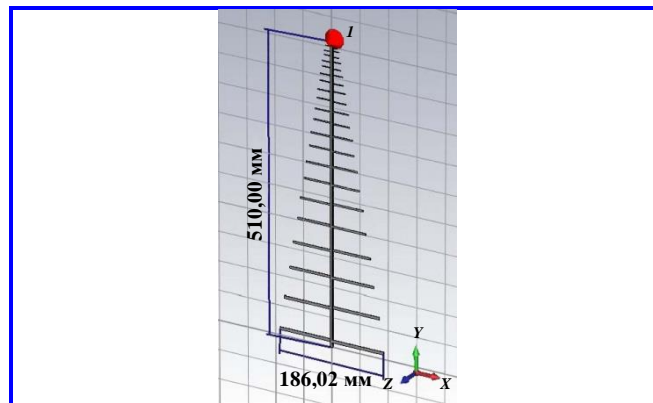


Рис. 5. Внешний вид логопериодической антенны

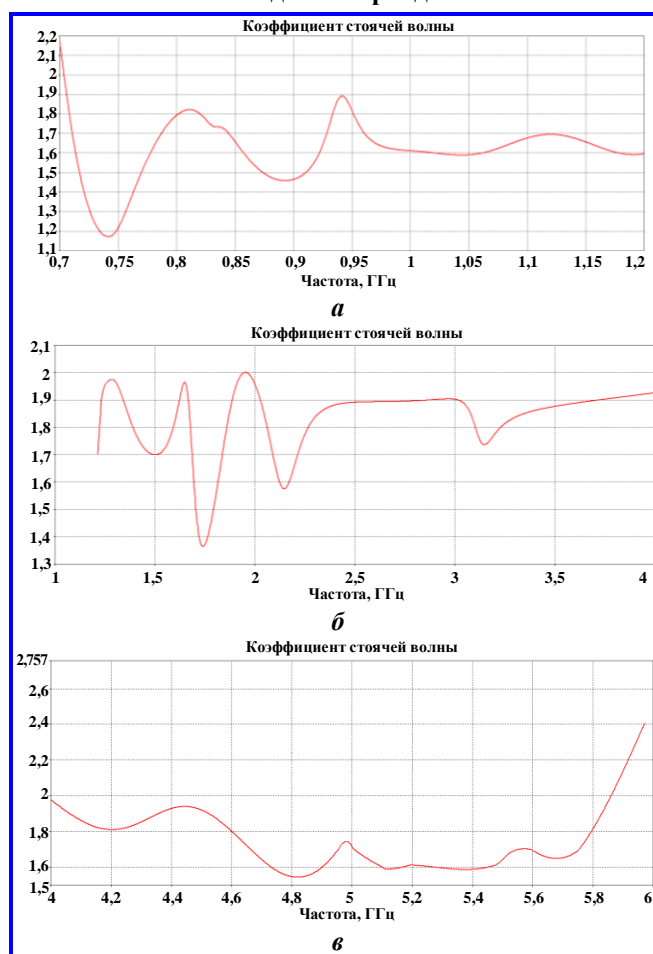


Рис. 6. Зависимость коэффициента стоячей волны логопериодической антенны: 0,7 – 1,2 ГГц (а); 1,2 – 4 ГГц (б); 4 – 6 ГГц (в)

Таблица 2

Результат моделирования характеристик направленности

| Частота, ГГц | Коэффициент усиления, дБи | Ширина главного луча в плоскости $\varphi = 90^\circ$, град. | Ширина главного луча в плоскости $\theta = 90^\circ$, град. |
|--------------|---------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 0,8 | 8,4 | 89 | 62 |
| 1,2 | 8,9 | 96 | 64 |
| 1,8 | 7,4 | 88,7 | 59,3 |
| 2,4 | 8,35 | 101 | 65 |
| 5,8 | 7,8 | 130 | 59 |

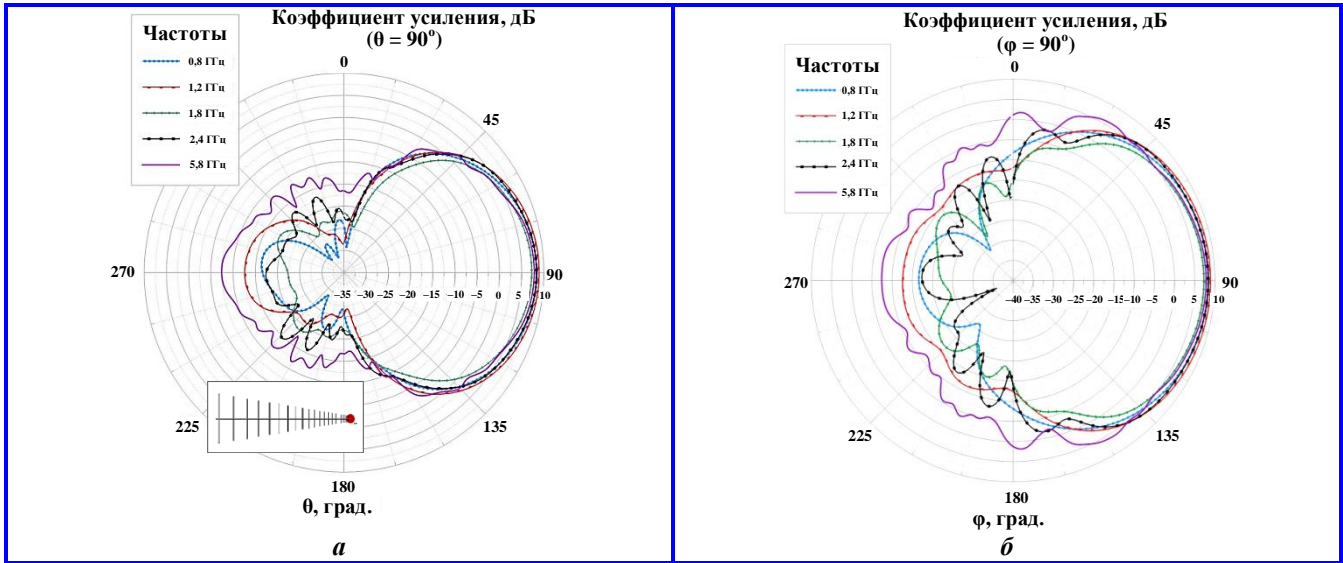


Рис. 7. Диаграмма направленности логопериодической антенны для $\theta = 90^\circ$ (а) и $\phi = 90^\circ$ (б)

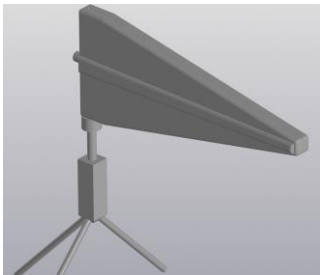


Рис. 8. Внешний вид антенны в корпусе на диэлектрическом штативе

Данная антенна может использоваться с корпусом, выполненным из диэлектрика. Конечное изделие должно быть закреплено и иметь возможность для настройки угла облучения, поэтому в корпусе создаются резьбовые отверстия, кроме того необходимо использовать диэлектрический штатив. Он позволит с высокой точностью поворачивать антенну на требуемый угол и позволит устанавливать антенну на заданной поверхности. Отметим, что конструкция корпуса и диэлектрический штатив должны вносить минимальные искажения в характеристики излучения и качество согласования антенны, поэтому измеренные данные для модели будут

точными как для модели антенны в корпусе, так и на штативе. Одна из конструкций антенны со штативом представлена на рис. 8.

Для передачи сигнала от компьютера предполагается использовать коаксиальный кабель с SMA-разъемом или разъемом N-типа. Данная антенная система должна стать дополнением к наземной станции, состоящей из оптимального выбора компьютера, усилителей и аккумуляторов. Такая антенна позволит увеличить дальность возможной связи с БПЛА небольших размеров по сравнению с дальностью при использовании стандартной штыревой антенны.

Чтобы наглядно показать насколько возможно увеличить дальность связи с БПЛА по сравнению с полуволновым диполем, представим зависимость дальности связи от мощности, подведенной к антенне для идеальных условий окружающей среды (рис. 9). Для квадрокоптеров чувствительность приемника находится в пределах минус 80 – 95 дБмВт. Для более дорогостоящих БПЛА самолетного типа указанный показатель выше. Для расчетов примем чувствительность приемной системы беспилотника равной –90 дБмВт.

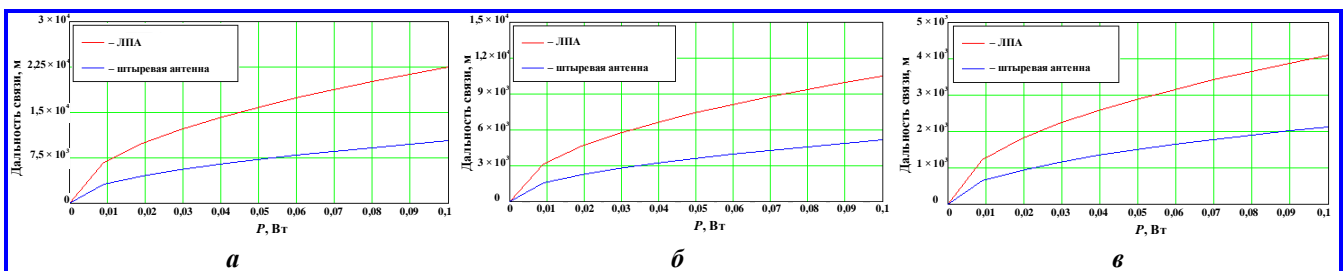


Рис. 9. Зависимость дальности связи от мощности подведенной к антенне для частоты: а – 1,2 ГГц; б – 2,4 ГГц; в – 5,8 ГГц

Для частоты 1,2 ГГц при подведении 100 мВт для полуволнового диполя дальность связи равна 10 км (соответствует данным многих производителей квадрокоптеров), а для ЛПА – 22,5 км. Для частоты 2,4 ГГц дальность связи при использовании полуволнового диполя равна 5,1 км, а для ЛПА – 10,1 км. Для частоты 5,8 ГГц дальность связи при использовании полуволнового диполя равна 2,1 км, а для ЛПА – 4 км. Дальность связи повышается практически в 2 раза.

Заключение

В работе рассмотрены характеристики наземных станций управления БПЛА. При этом в указанных комплексах управления БПЛА можно выделить электронный блок, включающий антенную систему. Для малых расстояний от наземных станций до БПЛА можно использовать ненаправленные штыревые антенны, но если требуется увеличение дальности связи, то используются направленные антенны (зеркальные, волновой канал).

Для быстро развертываемого переносного комплекса управления БПЛА, обеспечивающего заданные характеристики, предложено использовать логопериодическую антенну, обеспечивающую передачу данных на нескольких частотах по разным каналам связи. На основе метода конечных разностей во временной области проведено численное моделирование логопериодической антенны, перекрывающей диапазон 800 МГц – 5,8 ГГц. КСВ на всей полосе рабочих частот ниже 2. Для характерных частот 0,8; 1,2; 1,8; 2,4; 5,8 ГГц получили коэффициент усиления, меняющийся не более чем на 10% и средний уровень которого равен 8,1 дБи. Ширина главного лепестка в плоскости $\varphi = 90^\circ$ практически постоянна и ее средняя величина равна 62 град. В плоскости $\theta = 90^\circ$ ширина меняется в больших пределах от 88 до 130 град., в зависимости от рассчитываемой частоты. На основе рассчитанной модели предложены варианты конструкции антенны, включая корпус, в котором будет находиться антенна. Его размеры позволяют при переносе транспортировать его в компактном чемодане. При развертывании корпус будет закрепляться на диэлектрическом штативе, который позволяет настраивать точное направление на цель. Использование данной антенны позволит повысить дальность связи приблизительно в 2 раза по сравнению с системой на основе полуволнового диполя.

Литература

1. Метод перехвата малоразмерных и малозаметных беспилотных летательных аппаратов / А. А. Сенцов, В. Б. Поляков, С. А. Иванов [и др.] // Труды МАИ. – 2023. – № 129. – DOI : 10.34759/trd-2023-129-21.
2. Кондратьева С. Г. Обзор прикладных проблем систем беспилотных летательных аппаратов / С. Г. Кондратьева, П. А. Шмачилин, Э. В. Гаджиев // Гагаринские чтения 2017: Тезисы докладов, Москва, 05–19 апреля 2017 года. – Москва : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017. – С. 628–629. – EDN : ZIRWDJ.
3. A Low-Profile Dual-Band Directional Antenna for Unmanned Aerial Vehicle Applications / Hui Jin, Chong-Zhi Han, Yanzhi Fu [et. al.] // International Journal of Antennas and Propagation. – 2022. – Vol. 2022. – Article ID 4765008. – 7 p. – DOI : 10.1155/2022/4765008.
4. Musselman R. L. Antenna Design for Small UAV Locator Applications / R. L. Musselman, S. E. Watkins // Proceedings of the ASEE Annual Conference and Exposition (2017, Columbus, OH) ; American Society for Engineering Education (ASEE). – 2017. – 12 p.
5. The Recent Advancement in Unmanned Aerial Vehicle Tracking Antenna: A Review / A. H. Kelech, M. H. Alsharif, D. A. Oluwole [et. al.] // Sensors. – 2021. – № 21 (16), 5662. – DOI : org/10.3390/s21165662.
6. Chen G. ANACONDA. Antenna with autonomous, continuous, data transfer. Conceptual Design Document / G. Chen, T. Clayton, K. Donati-Leach ; Aerospace Senior Projects ASEN 4018 . – 2014. – 16 p.
7. A portable monopulse tracking antenna for UAV communications / J. Stewart, G. Jonas, H. Fredrik [et. al.]. – 2007. – URL : https://www.researchgate.net/publication/22900-3689_A_portable_monopulse_tracking_antenna_for_UAV_communications.
8. Титов К. Д. Принципы построения сверхширокополосного канала связи на беспилотном летательном аппарате вертолетного типа легкого класса / К. Д. Титов // Труды МАИ. – 2022. – № 122. – DOI : 10.34759/trd-2022-122-1.
9. Электромагнитное моделирование, сравнительный анализ и изготовление объемной однозаходной спиральной антенны / Д. А. Литовский, М. С. Манахова, Г. М. Алимурзоев [и др.] // Антенны. – 2022. – № 1. – С. 72–81. – DOI : org/10.18127/j03209601-202201-05.
10. Conformal Design of a High-Performance Antenna for Energy-Autonomous UWB Communication / S. Agarwal, D. Masotti, S. Nikolaou [et. al.] // Sensors. – 2021. – № 21 (17) : 5939. – DOI : org/10.3390/s21175939.
11. Генералов А. Г. К вопросу о построении остронаправленной перенацеливаемой бортовой антенны космических аппаратов / А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2018. – Т. 164. – № 3. – С. 26–31. – EDN : FHYTCW.
12. Application of spiral antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Gadzhiev, A. Generalov, A. Zhukov [et. al.] // Proceedings – 5th International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT-MIPT 2018 : 5, Moscow, 15–16 ноября 2018 года. – Moscow,

2018. – P. 91–93. – DOI : 10.1109/EnT-MIPT.2018.00027. – EDN : CSWHQU.
13. Application of horn antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Ovchinnikova, N. D. To, S. Kondrat'eva [et. al.] // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T 2020, Dolgoprudny, 25–26 ноября 2020 года. – Dolgoprudny, 2020. – P. 9431308. – DOI : 10.1109/EnT50437.2020.9431308. – EDN : IUBWZS.
14. Bayraktar TB2 [website]. – Istanbul, 2015 – 2024. – URL : <https://baykartech.com/en/uav/bayraktar-tb2>.
15. Nightjar. Dual Screen Command & Control Station [website]. – Halton, Lancaster, Great Britain, 2023. – URL : <https://www.worthingtonsharpe.com/wing-command-station>.
16. Veronte PCS [website]. – Alicante, Spain, 2024. – URL : <https://www.embention.com/product/veronte-pcs>.
17. Ground Control Station. Easy to carry and deploy [website]. – 2024. – URL : <https://alphaunmannedsystems.com/product/ground-control-station>.
18. Слюсар В. Радиолнии связи с БПЛА. Примеры реализации / В. Слюсар // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2010. – № 5. – С. 56–60.
19. Король Д. Г. Исследование цилиндрической конформной антенной решетки с печатным излучателем для БПЛА / Д. Г. Король, В. С. Темченко // Труды МАИ. – 2023. – № 129. – DOI : 10.34759/trd-2023-129-14.
20. Лихтциндер Б. Я. Сенсорные сети – распределенные информационно-измерительные и информационно-управляющие системы / Б. Я. Лихтциндер // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2020. – Т. 28. – № 4. – P. 77–87.
21. Фалилеев В. Ю. Анализ существующих автоматизированных комплексов защиты от дронов / В. Ю. Фалилеев, Р. Р. Шатовкин // Воздушно-космические силы. Теория и практика. – 2020. – № 14. – С. 130–140.
22. Сверхширокополосные антенны : [сборник статей] / пер. с англ. С. В. Попова и В. А. Журавлева ; под ред., с предисл. Л. С. Бененсона. – Москва : Мир. – 416 с.
23. Петров Б. М. Логопериодические вибраторные антенны / Б. М. Петров, Г. И. Костромитин, Е. В. Горемыкин. – 2-е изд., дополн. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2012. – 239 с. : ил.

Поступила в редакцию 12.12.2023

Данил Геннадиевич Король, аспирант кафедры, т. +7 (968) 594-32-48, e-mail: Dan0932@yandex.ru. (Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)).

ANTENNA FOR SMALL RAPID DEPLOYABLE MOBILE SYSTEM FOR UNMANNED AERIAL VEHICLE CONTROL

D. G. Korol

Goal setting and the results of numerical simulation for antenna of rapid deployable mobile system for unmanned aerial vehicle control are considered. Providing the bandwidth it is possible to use the antenna for transmission at several frequencies via different communication channels and use more wide operating channel bandwidth. The log-periodic antenna covering the primary operating frequencies of the 800 MHz – 5,8 GHz range was selected for operation. The obtained results demonstrated good agreement degree (throughout the entire range the standing wave ratio is below 2) and gain ration about 8.1 dBi. Based on the resulting model options for the design implementation of the antenna itself and the housing are proposed for convenient placement in field conditions. The two-fold advantage in communication range of log-periodic antenna has been achieved In comparison with the standard rod antenna.

Key words: Log-periodic antenna, unmanned aerial vehicle control station, wideband antenna, CST Microwave Studio.

References

1. Method for intercepting small and stealthy unmanned aerial vehicles / A. A. Sentsov, V. B. Polyakov, S. A. Ivanov [and others] // MAI proceedings. – 2023. – No. 129. – DOI: 10.34759/trd-2023-129-21.
2. Kondratieva S. G. Review of application problems of unmanned aerial vehicle systems / S. G. Kondratieva, P. A. ShaChilin, E. V. Gadjeiev // Gagarin readings 2017: abstract of conference papers, Moscow, 05 – 19 April 2017. – Moscow Aviation Institute (National Research University), 2017. – P. 628–629. – EDN : ZIRWDJ.
3. A Low-Profile Dual-Band Directional Antenna for Unmanned Aerial Vehicle Applications / Hui Jin, Chong-Zhi Han, Yanzhi Fu [et. al.] // International Journal of Antennas and Propagation. – 2022. – Vol. 2022. – Article ID 4765008. – 7 p. – DOI : 10.1155/2022/4765008.
4. Musselman R. L. Antenna Design for Small UAV Locator Applications / R. L. Musselman, S. E. Watkins // Proceedings of the ASEE Annual Conference and Exposition (2017, Columbus, OH) ; American Society for Engineering Education (ASEE). – 2017. – 12 p.
5. The Recent Advancement in Unmanned Aerial Vehicle Tracking Antenna: A Review / A. H. Kelechi, M. H. Alsharif, D. A. Oluwole [et. al.] // Sensors. – 2021. – № 21 (16), 5662. – DOI : org/10.3390/s21165662.
6. Chen G. ANACONDA. Antenna with autonomous, continuous, data transfer. Conceptual Design Document / G. Chen, T. Clayton, K. Donati-Leach ; Aerospace Senior Projects ASEN 4018 . – 2014. – 16 p.

7. A portable monopulse tracking antenna for UAV communications / J. Stewart, G. Jonas, H. Fredrik [et. al.]. – 2007. – URL : https://www.researchgate.net/publication/22900-3689_A_portable_monopulse_tracking_antenna_for_UAV_communications.
8. Titov K. D. Design concept of ultra-wideband communication channel on the helicopter type unmanned aerial vehicle of light class / K. D. Titov // MAI proceedings – 2022. – No. 122 – DOI: 10.34759/trd-2022-122-1.
9. Electromagnetic simulation, comparative analysis and manufacturing of cavity monopillar helix antenna / D. A. Litovskiy, M. S. Manakhova, G. M. Almirzoev [and others] // Antennas – 2022 – No. 1 – P. 72–81. – DOI : [org/10.18127/j03209601-202201-05](https://doi.org/10.18127/j03209601-202201-05).
10. Conformal Design of a High-Performance Antenna for Energy-Autonomous UWB Communication / S. Agarwal, D. Masotti, S. Nikolaou [et. al.] // Sensors. – 2021. – № 21 (17) : 5939. – DOI : [org/10.3390/s21175939](https://doi.org/10.3390/s21175939).
11. Generalov A. G. On the issue of construction of highly directional retargetable on-board antenna for spacecraft / A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Matters of Electromechanics. VNIIEEM proceedings. – 2018. – Vol.164. – No. 3 – P. 26–31. – EDN : FHYTCW.
12. Application of spiral antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Gadzhiev, A. Generalov, A. Zhukov [et. al.] // Proceedings – 5th International Conference on Engineering and Telecommunication, EnT-MIPT 2018 : 5, Moscow, 15–16 ноября 2018 года. – Moscow, 2018. – P. 91–93. – DOI : [10.1109/EnT-MIPT.2018.00027](https://doi.org/10.1109/EnT-MIPT.2018.00027). – EDN : CSWHQU.
13. Application of horn antennas for perspective vehicle-board systems and complexes / E. Ovchinnikova, N. D. To, S. Kondrat'eva [et. al.] // 2020 International Conference Engineering and Telecommunication, En and T 2020, Dolgoprudny, 25–26 November 2020. – Dolgoprudny, 2020. – P. 9431308. – DOI : [10.1109/EnT50437.2020.9431308](https://doi.org/10.1109/EnT50437.2020.9431308). – EDN : IUBWZS.
14. Bayraktar TB2 [website]. – Istanbul, 2015 – 2024. – URL : <https://baykartech.com/en/uav/bayraktar-tb2>.
15. Nightjar. Dual Screen Command & Control Station [website]. – Halton, Lancaster, Great Britain, 2023. – URL : <https://www.worthingtonsharpe.com/wing-command-station>.
16. Veronte PCS [website]. – Alicante, Spain, 2024. – URL : <https://www.embention.com/product/veronte-pcs>.
17. Ground Control Station. Easy to carry and deploy [website]. – 2024. – URL : <https://alphaunmannedsystems.com/product/ground-control-station>.
18. Korol D. G. Radio lines of communication with UAV. Examples of implementation. / V. Slusar // Electronics: Science, Technology, Business. – 2010. – No. 5 – P. 56–60.
19. Korol D. G. Research of cylindrical conformal antenna array with a printed emitter for UAVs / D. G. Korol, V. S. Temchenko // MAI studies. – 2023. – No. 129 – DOI : 10.34759/trd-2023-129-14.
20. Lihtcinder B. Ya Sensor networks – distributed information-measuring and information-control systems / B. Ya. Lihtcinder // Vestnik of Samara State Technical University. Technical sciences. – 2020. – V. 28. – No 4. – P. 77–87.
21. Falileev V. Yu. Analysis of the existing automatic protection system against drones / V. Yu falileev, R. R. Shatovkin // Air and space forces: theory and practice. – 2020 – No. 14 – P. 130–140.
22. Ultra wide-band antennas: [Collection of proceedings] / translated from the English by S. V. Popova and V. A. Zhuravleva; edited by, with a preface L. S. Benenson – Moscow: Mir. – 416 p.
23. Petrov B. M. Log-periodic vibrator antennas / B. M. Petrov, G. I. Kostromitin, E. V. Goremikin. – 2nd edition, add. – Moscow: Goryachya line – Telecom. 2012 – 239 p. : Illustrated.

Danil Gennadievich Korol, graduate student, t. +7 (968) 594-32-48, e-mail: Dan0932@yandex.ru.
(Moscow Aviation Institute (National Research University)).