

Реализация канала связи с БПЛА с использованием широкополосных малоэлементных антенных решеток в качестве бортовых антенных систем

К.О. Коровин¹, С.В. Кузьмин^{1*}

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: konstkor@mail.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 18.05.2020

Принята к публикации 11.06.2020

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

Аннотация: В данной работе рассматривается возможность построения канала связи большой дальности с использованием широкополосной малоэлементной цилиндрической антенной решетки на основе антенн Вивальди для диапазона 10 ГГц. Проводится сравнительный анализ выбора излучателей, оптимизация системы по соотношению числа элементов и коэффициента усиления и оценка габаритных характеристик. Показано, что использование малоэлементной цилиндрической решетки позволяет получить компактную антенную систему с коэффициентом усиления 13–16 дБ, что позволяет построить канал связи большой дальности.

Ключевые слова: БПЛА, канал связи, бортовые антенные системы.

Введение

Обеспечение надежного использования БПЛА при сложной помеховой обстановке и тяжелых внешних воздействующих факторах является актуальной задачей в связи с растущим применением подобных систем в гражданских областях и специальной технике. Для построения канала связи большой дальности необходимо использование антенн со средним или высоким коэффициентом усиления (КУ). Применение бортовых антенн с большим КУ затруднительно вследствие массогабаритных ограничений [1].

Возможность автономной работы БПЛА ограничена, поэтому требования к стабильности работы линии связи повышаются, усложняя конструкцию бортовых антенно-фидерных систем. При этом система связи рассматривается как вспомогательная по отношению к многочисленным полезным нагрузкам, что приводит к ужесточению требований к размеру и массе антенн при сохранении функциональных возможностей.

На текущем этапе развития возможности традиционных, отработанных решений, таких как штыревые или щелевые антенны, в сочетании с

объемными резонаторами имеют существенные ограничения. Для достижения современных функциональных требований необходимо использование антенных решеток в различных конфигурациях, чему способствует развитие элементной базы, которое позволяет применение цифровых диаграммообразующих схем. Развитие численных методов позволило применить численное моделирование антенн, не поддающихся аналитическому расчету.

В данной работе построение нескольких вариантов бортовой антенной системы на основе антенных решеток рассматривается с учетом характеристик наземного сегмента радиолинии. Даются рекомендации по конфигурации наземной фазированной антенной решетки.

Оценка характеристик антенной системы БПЛА

Требования к антенной системе БПЛА задаются, исходя из требований дальности радиосвязи, чувствительности приемника, мощности передатчиков наземного пункта управления (НПУ) и БПЛА и отношения сигнал-шум. Антенная система является частью канала связи НПУ и БПЛА. Под «кана-

лом» связи в БПЛА понимаются передающие и приемные устройства (передатчики и приемники) с отдельно выделенными антенными устройствами и среда распространения радиоволн.

В настоящее время в большинстве случаев для связи с БПЛА применяется диапазон 2,4 ГГц. Для увеличения рабочей полосы, а также для совмещения функционала оборудования на борту БПЛА актуальным является рассмотрение других диапазонов, например, частотного диапазона «Х», соответствующего частотам 8...12 ГГц. В данном диапазоне радиосвязь возможна, как правило, только в условиях прямой видимости [2]. В нашей работе рассмотрен случай дальности связи при максимальной высоте полета (5000 м) – 300 км, в случае применения ретранслятора – 600 км, высоты размещения антенн – от 5 до 30 м. Верхняя граница определяется конструктивными соображениями, нижняя граница может быть определена из дальности прямой видимости.

Будем полагать, что слабонаправленная антенна БПЛА будет использоваться на коротких расстояниях от НПУ и/или для передачи служебных команд и телеметрической информации с низкой скоростью передачи (60 Кбит/с), которая меньше информационной скорости (20 Мбит/с) в 333 раза или на 25 дБ, что больше, чем разница коэффициентов усиления направленной и слабонаправленной антенн БПЛА. Поэтому минимально необходимая мощность передатчика будет определяться прежде всего КУ направленной антенны БПЛА $G_{a2} = 21...23$ дБ и КУ антенны НПУ $G_{a1} = 27...30$ дБ.

Искомую требуемую мощность передатчика (в дБм) определим по формуле:

$$P_{\text{прд.тр}}[\text{дБм}] = B_{\text{рл}}[\text{дБ}] - G_{a1}[\text{дБ}] - G_{a2}[\text{дБ}] + P_{\text{рч}}[\text{дБм}].$$

Подставляя ранее найденные значения:

$$\begin{aligned} B_{\text{рл}} &= 187 \text{ дБ}; G_{a2} = 21...23 \text{ дБ}; \\ G_{a1} &= 27...30 \text{ дБ}; P_{\text{рч}} = -89 \text{ дБм}, \end{aligned}$$

получим: $P_{\text{прд.тр}} = 45...50$ дБм, что соответствует 15...20 дБ или 30...100 Вт. В данную мощность заложен запас на замирания (12 дБ) и на слабую чувствительность из-за большого коэффициента шума ($n_{\text{ш}} = 10$).

При использовании на БПЛА ненаправленной антенны бюджет радиосвязи сократится на 15...16 дБ (23–8...21–5 дБ). При той же мощности передатчика (30...100 Вт) и той же информационной скорости передачи (20 Мбит/с) это приведет к сокращению дальности связи с 300 до 150 км, что достаточно только для ближней зоны НПУ. При передаче служебных команд и телеметрической информации отмеченный ранее энергетический выигрыш за счет снижения скорости (25 дБ) намного превышает указанное сокращение энергетики (15...16 дБ) за счет замены направленной антенны на ненаправленную, поэтому нормальная связь с заданным ка-

чеством в этом режиме сохранится и на максимальном расстоянии (300 км).

Предпочтительной для НПУ является узкая диаграмма направленности (ДН) в азимутальной плоскости с возможностью электронного сканирования лучом, причем при максимальной дальности ширина луча задается, исходя из максимума КУ антенны, а на малых дальностях возможно искусственное уширение луча для обеспечения надежного сопровождения БПЛА. В угломестной плоскости целесообразно применение косекансной ДН, так как именно подобная ДН обеспечивает наиболее равномерную зону по дальности для всех высот без существенных провалов.

Выбор излучателей обусловлен необходимой полосой канала связи (в нашем случае более 10 %), поляризацией излучения и достаточным КУ единичного элемента ($KU = 6...8$ дБ) и будет рассмотрен ниже.

Наземный сегмент антенно-фидерных систем

Для НПУ рассматривалось использование фазированной антенной решетки из 16×8 излучателей с расстоянием между излучателями $0,5\lambda$, косинусными ДН излучателей, квазикосекансной ДН в угломестной плоскости и игольчатой ДН в азимутальной плоскости. При этом коэффициент направленного действия (КНД) антенны будет составлять 25–27 дБ. Зона действия и ДН антенны приведены на рисунке 1 и 2, соответственно.

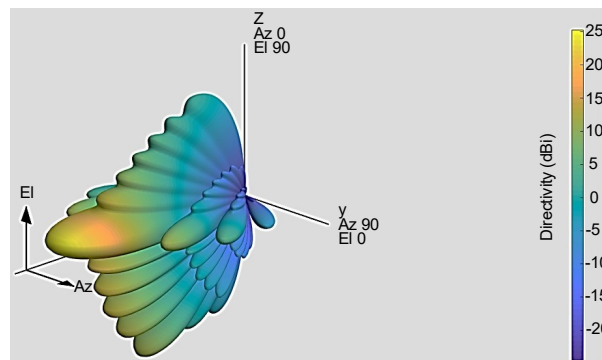


Рис. 1. Трехмерная ДН антенной решетки 16×8

Fig. 1. 3D Radiation Pattern of 16×8 Antenna Array

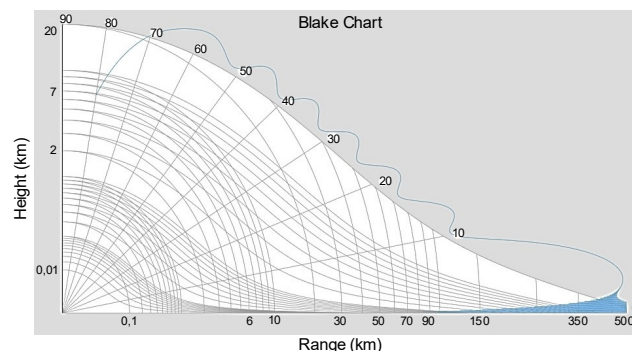


Рис. 2. Зона действия радиосвязи, угол наклона ДН 5°

Fig. 2. Range of Communication Link, Antenna Array Tilt Angle 5°

Запас по высоте используется для компенсации изрезанности ДН бортовой антенны, установленной на носителе.

Бортовой сегмент антенно-фидерных систем

В качестве бортовой слабонаправленной антенны может быть использован монополь с ДН всенаправленной в азимутальной плоскости и КНД $\sim 3,5$ дБ. Такая антенна, как правило, устанавливается на малых БПЛА под днищем. В других местах установки борт может затенять вибратор или влиять на ДН, создавая глубокие провалы в диаграмме. Конкретное конструктивное исполнение монополя зависит от частотного диапазона, ширины полосы частот и места установки.

При помощи группы из четырех монополей (в том или ином конструктивном исполнении) можно создать кольцевую концентрическую антенную решетку. Используя цифровые приемопередатчики с управляемой фазой, можно осуществлять сканирование в азимутальной плоскости. КНД подобной антенны 9–10 дБ в максимуме, как показано на рисунках. При малых углах КНД может падать до 5–7 дБ, что зависит от размера экрана: чем больше экран, тем больше КНД вдоль экрана. Диаграмма направленности приведена на рисунке 3.

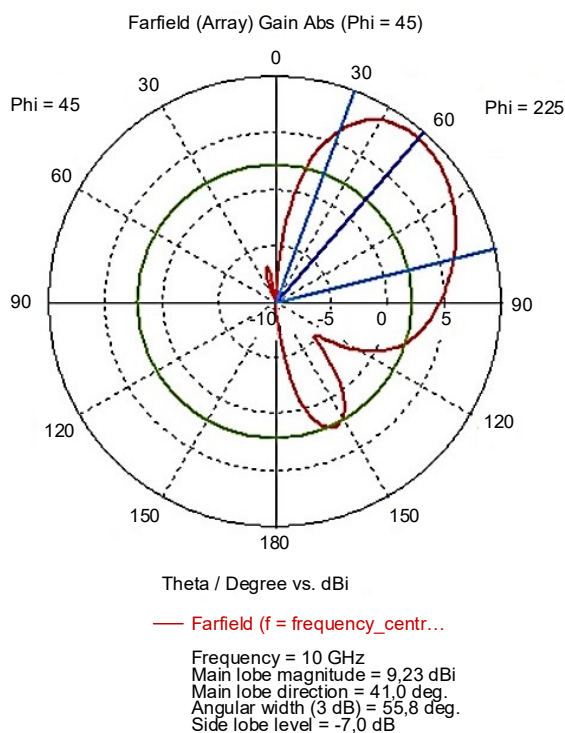


Рис. 3. ДН кольцевой концентрической ФАР в угломестной плоскости

Рис. 3. Array Pattern of Concentric Antenna Array in Elevation Plane

Кольцевые концентрические антенны с числом элементов больше четырех не только повышают энергетику и уменьшают влияние борта на ДН, но и позволяют формировать глубокие нули в направлении помехи [3].

Альтернативой кольцевым концентрическим антенным решеткам является цилиндрическая антенная решетка, построенная из сверхширокополостных излучающих направленных элементов. Например, из антенн Вивальди или спиральных антенн. Выбор между этими антеннами обусловлен свойствами распространения, связанными с поляризацией излучения. Очевидно, что для случая дальней связи, когда пространственная ориентация БПЛА существенно не изменяется, предпочтительной является антенна линейной поляризации, т. е. Вивальди. В настоящее время разработано большое число вариантов конструкции антенн типа Вивальди [4–5], мы возьмем за основу для расчета базовый вариант на основе печатной платы, оптимизированный для частоты 10 ГГц. Диаграмма направленности антенны приведена на рисунке 4.

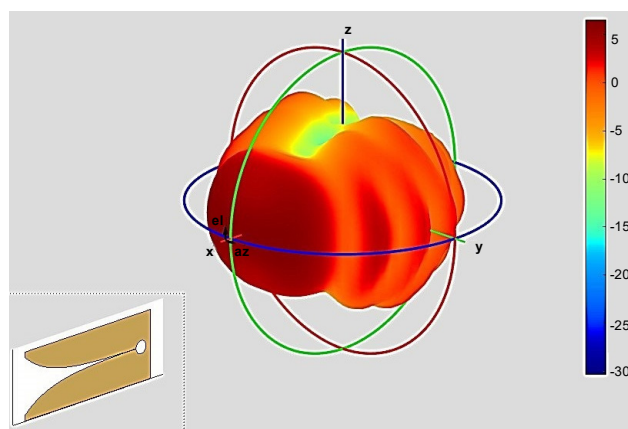


Рис. 4. ДН антенны Вивальди. КНД = 6,54 дБ, НРВW 76° и 60°, в азимутальной и угломестных плоскостях, соответственно

Fig. 4. Vivaldi Antenna Pattern Directivity 6,54 dBi, HRPBW 76° and 60°, in Azimuthal and Elevation Planes, Respectively

Был проведен расчет ДН цилиндрической антенной решетки для различного количества излучателей ($N = 8, 10, 12, 16$) в кольце и $NR = 2$ колец в цилиндре. Использование цилиндрической $NR = 2$ вместо кольцевой антенной решетки ($NR = 1$) позволяет увеличить КНД при сохранении компактности системы и отклонять максимум ДН в угломестной плоскости в направлении НПУ для уменьшения влияния борта и увеличения уровня сигнала. Пример диаграммы направленности решетки, построенной из элементов Вивальди, приведен на рисунках 5 и 6, соответственно (максимум ДН отклонен на -5° в угломестной плоскости).

В ходе расчетов варьировался радиус кольца R ($0,7 \dots 1,05 \lambda$) с целью для нахождения R_{opt} для каждого N , расстояние между кольцами R_s ($0,65 \dots 1,0 \lambda$), и угол отклонения в угломестной плоскости ($0,5^\circ$). Параметры оптимизировались для увеличения КНД и минимизации уровня боковых и задних лепестков. Результаты расчета приведены в таблице 1, где: G – число элементов в кольце N ; H – число колец NR ; R_{opt} – оптимальный радиус кольца; R_s – расстояние между кольцами; f – частота.

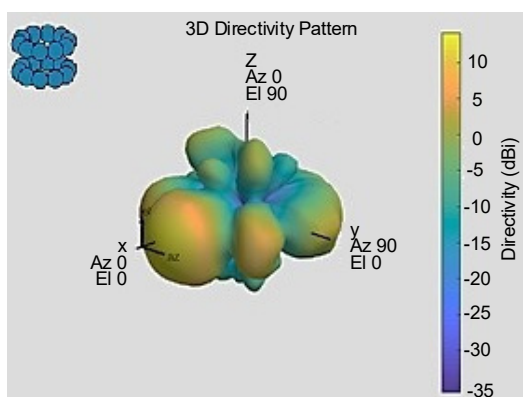


Рис. 5. Пример трехмерной ДН

Fig. 5. 3D Array Pattern

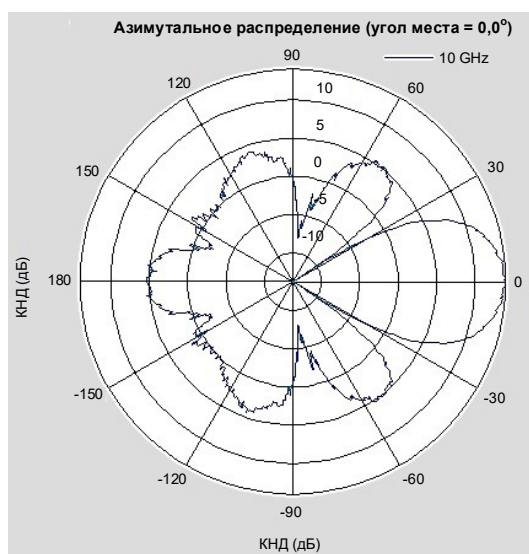


Рис. 6. ДН в азимутальной плоскости антенной решетки из антенн Вивальди

Fig. 6. Radiation Pattern in Azimuthal Plane of Antenna Array of Vivaldi Antennas

Результаты расчета показывают, что оптимальным является $N = 8 - 10$, так как при переходе к 12–16-элементной схеме не происходит существенного роста КНД, при значительном увеличении числа элементов. Оптимальным является $R_s = 0,75 - 0,85\lambda$, что позволяет достичь высокого КНД, сохранении низкого уровня боковых лепестков при отклонении луча в угломерной плоскости.

При данном выборе параметров для решетки с $N = 10$, $NR = 2$, $R_{opt} = 0,71$ расстоянием между кольцами $R_s = 0,85\lambda$, удается получить КНД = 14,5 дБ.

Данное решение позволяет достичь существенно большего коэффициента усиления по сравнению с вариантом из 4 монополей. При этом габариты антенной системы остаются компактными – для указанной системы они составляют около $0,08 \times 0,23 \times 0,23$ м, что позволяет размещать антенну на крыльях либо внизу на фюзеляже.

При установке антенны на борт воздушного судна необходимо будет решить задачи, связанные с выбором и подготовкой места размещения,

и в ряде специальных случаев приводящие к уменьшению обратного рассеяния.

ТАБЛИЦА 1 Параметры и характеристики цилиндрической антенной решетки из антенн Вивальди для $NR = 2$; $N = 8..16$ TABLE 1 Parameters and Specifications of Cylindrical Antenna Array of Vivaldi Elements for $NR = 2$; $N = 8..16$

G	H	R_{opt}, λ	R_s, λ	$f, \text{ГГц}$	КНД(0/-5°), дБ	УБЛ (0/-5°), дБ
8	2	0,7	0,7	10	12,94/12,76	5,97/6,15
10	2	0,71	0,7	10	14,02/13,93	5,41/5,45
12	2	0,77	0,7	10	14,36/14,34	5,84/5,83
14	2	0,95	0,7	10	14,78/14,7	6,74/6,81
16	2	1,0	0,7	10	15,38/15,24	5,92/6,1
8	2	0,7	0,75	10	13,12/12,93	6,15/6,21
10	2	0,71	0,75	10	14,22/14,11	5,67 /5,59
12	2	0,77	0,75	10	14,52/14,51	6,02/6,00
14	2	0,95	0,75	10	14,97/14,87	6,98/7,00
16	2	1,0	0,75	10	15,56/15,41	6,21/6,25
8	2	0,7	0,8	10	13,28/13,08	6,26/6,46
10	2	0,71	0,8	10	14,38/14,26	5,74/5,78
12	2	0,77	0,8	10	14,67/14,65	6,17/6,15
14	2	0,95	0,8	10	15,13/15,03	7,15/7,17
16	2	1,0	0,8	10	15,71/15,55	6,36/6,73
8	2	0,7	0,85	10	13,4/13,19	6,43/6,51
10	2	0,71	0,85	10	14,5/14,37	5,94/5,98
12	2	0,77	0,85	10	14,79/14,76	6,27/6,25
14	2	0,95	0,85	10	15,26/15,14	7,28/7,29
16	2	1,0	0,85	10	15,83/15,66	6,71/6,84

Выбор конкретного местоположения бортовой антенны производится с целью уменьшения искажений ДН в результате дифракции на элементах конструкции борта [6].

В [7] утверждается, со ссылкой на многочисленные эксперименты, что поле рассеяния в основном определяется отражением от антенн, кабины пилота, воздухозаборников, кромок крыльев и хвостового оперения. Достаточно большое количество антенн вынужденно располагается с той же стороны, с которой работает радар. Планер, как правило, покрывается широкополосным радиопоглощающим материалом, а наличие вырезов под антенны сводит на нет принятые меры.

Для уменьшения влияния борта на ДН и уменьшения обратного рассеяния конструкция антенны может усложниться. Учет указанных эффектов выходит за рамки данной работы.

Заключение

В работе проведен анализ канала связи большой дальности, оценка параметров и характеристик антенной системы НПУ и варианты реализации бортовой системы для частоты 10 ГГц. Пока-

зано, что в данной конфигурации можно реализовать связь на дальности до 300 км.

В качестве варианта реализации бортовой системы рассмотрено несколько вариантов антенн, в том числе цилиндрическая двухкольцевая малоэлементная антенная решетка с $N = 8 - 16$ антенн Вивальди в кольце. Показано, что оптимальной по соотношению числа элементов и коэффициента усиления является система с $N = 8 - 10$, что позволяет достичь КНД = 13,4 – 14,5 дБ.

В дальнейшем, при известной конфигурации носителя, необходим выбор местоположения антенны и доработка ее конструкции для минимизации влияния борта на характеристики антенны. При необходимости уменьшения обратного рассеяния также может потребоваться введение в конструкцию антенны дополнительных элементов и специальных материалов.

В результате учета влияния борта ДН бортовой антенны становится изрезанной, с наличием интерференционных минимумов, которые приведут к уменьшению зоны действия, что может быть восполнено запасом по высоте, обеспечиваемым НПУ.

Также, в дальнейшем, возможно рассмотрение варианта создания ММО-канала [8] при использовании нескольких антенн и увеличение дальности за счет ретрансляции через антенны второго UAV [9]. Многие другие особенности построения линий передачи и их оптимизации описаны в работе [10]. При этом наземная часть линии связи, помимо варианта, рассмотренного в данной работе, может быть реализована на основе антенных решеток других конструкций [11] или широкополосных линзовых антенн [12].

Список используемых источников

1. Шатраков Ю.Г., Ривкин М.И., Цымбаев Б.Г. Самолетные антенные системы. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.
2. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности. М.: Наука, 1999. 495 с.
3. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.
4. Воскресенский Д.И., Котов Ю.В., Овчинникова Е.В. Тенденции развития широкополосных фазированных антенных решеток (обзор работ) // Антенны. 2005. № 11(102). С. 7–21.
5. Рязанов И.Г., Бякин А.А., Белоусов О.А. Анализ и синтез широкополосной планарной щелевой антенны с экспоненциальным изменением ширины щели для систем широкополосного доступа // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2013. № 2(46). С. 297–306.
6. Masnamara T. Introduction to Antenna Placement and Installation. New York: John Wiley & Sons, 2010.
7. Красюк В., Оводенко А., Бестугин А. Радиолокационная заметность антенн летательных аппаратов. Методы уменьшения ЭПР. Рига: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. 460 с.
8. Rankin G., Tirkel A., Leukhin, A. Millimeter wave array for UAV imaging MIMO radar // Proceedings of the 16th International Radar Symposium (IRS, Dresden, Germany, 24–26 June 2015). IEEE, 2015. PP.499–504. DOI:10.1109/IRS.2015.7226217
9. Li S., He C., Liu M., Gu Y., Xie J., et al. Design and implementation of aerial communication using directional antennas: learning control in unknown communication environments // IET Control Theory & Applications. 2019. Vol. 13. Iss. 17. PP. 2906–2916. DOI:10.1049/iet-cta.2018.6252
10. Ямпольский В.Г., Фролов О.П. Оптимизация антенных систем линий связи. М.: Радио и связь, 1991. 270 с.
11. Hansen R.C Phased Array Antennas. New York: John Wiley & Sons, 2009. 571 p.
12. Александрин А.М., Рязанцев Р.О., Саломатов Ю.П., Сурак М.И. Широкополосные линзовые антенны из искусственного неоднородного диэлектрика. СПб: ЛЭТИ, 2018. 181 с.

* * *

Implementation of UAV Communication Channel Using Airborne Wide-Band Low-Element Antenna Arrays

K. Korovin¹ , S. Kuzmin¹ 

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-39-44

Received 18th May 2020

Accepted 11th June 2020

For citation: Korovin K., Kuzmin S. Implementation of UAV Communication Channel Using Airborne Wide-Band Low-Element Antenna Arrays. *Proc. of Telecom. Universities*. 2020;6(2):39–44. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2020-6-2-39-44

Abstract: *In this paper, we consider the possibility of constructing a long-range communication link using a broadband low-element cylindrical antenna array based on Vivaldi antennas in 10 GHz band. A comparative analysis of the choice of emitters, optimization of the system according to the ratio of the number of elements and gain, and the assessment of overall characteristics are carried out. It is shown that the use of low-element cylindrical array allows one to obtain a compact antenna system with a gain of 13–16 dB, which allows one to construct a long-range communication channel.*

Keywords: *UAV, communication channel, airborne antenna systems.*

References

1. Shatrakov Yu.G., Rivkin M.I., Tsymbaev B.G. *Aircraft Antenna Systems*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1979. 184 p. (in Russ.)
2. Feinberg E.L. *Propagation of Radio Waves Along the Earth's Surface*. Moscow: Nauka Publ.; 1999. 495 p. (in Russ.)
3. Voskresensky D.I. *Microwave Devices and Antennas. Design of Phased Array Antennas*. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2012. 744 p. (in Russ.)
4. Voskresensky D.I., Kotov Yu.V., Ovchinnikova E.V. Trends in the Development of Broadband Phased Antenna Arrays (Review of Works). *Antennas*. 2005;11(102):7–21. (in Russ.)
5. Ryazanov I.G., Byakin A.A., Belousov O.A. Analysis and Synthesis of a Broadband Planar Slot Antenna with an Exponential Change in the Width of the Slit for Broadband Access Systems. *Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University*. 2013;2:297–306. (in Russ.)
6. Macnamara T. *Introduction to Antenna Placement and Installation*. New York: John Wiley & Sons; 2010.
7. Krasnyuk V., Ovodenko A., Bestugin A. *Radar Visibility of the Aircraft Antennas. Radar Cross-Section Reduction Methods*. Riga: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2011. 460 p. (in Russ.)
8. Rankin G., Tirkel A., Leukhin, A. Millimeter wave array for UAV imaging MIMO radar. *Proceedings of the 16th International Radar Symposium, IRS, 24–26 June 2015, Dresden, Germany*. IEEE; 2015. p.499–504. DOI:10.1109/IRS.2015.7226217
9. Li S., He C., Liu M., Gu Y., Xie J., et al. Design and implementation of aerial communication using directional antennas: learning control in unknown communication environments. *IET Control Theory & Applications*. 2019;13(17):2906–2916. DOI:10.1049/iet-cta.2018.6252
10. Yampolsky V.G., Frolov O.P. *Optimization of Antenna Systems of Communication Lines*. Moscow: Radio i svyaz Publ.; 1991. 270 p. (in Russ.)
11. Hansen R.C. *Phased Array Antennas*. New York: John Wiley & Sons; 2009. 571 p.
12. Alexandrin A.M., Ryazantsev R.O., Salomatov Yu.P., Sugak M.I. *Broadband lens antennas from an Artificial Inhomogeneous Dielectric*. St. Petersburg: Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI" Publ.; 2018. 181 p.

Сведения об авторах:

КОРОВИН
Константин Олегович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, konstkor@mail.ru
 <https://orcid.org/0000-0001-7979-3725>

КУЗЬМИН
Сергей Викторович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного университета им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, sergey-v-kuzmin@yandex.ru
 <https://orcid.org/0000-0002-5496-2702>