

Научная статья

УДК 621.396.67

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-78-86>

EDN:NYNYEJ



Анализ вариантов синтеза малоэлементной антенной решетки для использования в качестве бортовой антенной системы БПЛА

Павел Александрович Межевов , mezhevov.pa@sut.ru

Константин Олегович Коровин, korovin.ko@sut.ru

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

Аннотация

Беспилотные летательные аппараты активно развиваются в настоящее время. Их радиотехническое оборудование также совершенствуется и ставит новые задачи перед разработчиками. Со стороны антенной техники простым решением для обеспечения связи является применение ненаправленных антенных систем, что позволяет организовывать канал связи с БПЛА с любого направления, однако такие системы обладают ограниченной дальностью связи. **Актуальной задачей** является увеличение дальности работы линий связи с использованием беспилотных летательных аппаратов с сохранением возможности организации канала с любого направления. В первую очередь увеличение дальности может быть достигнуто путем использования направленных антенных систем, однако оно ограничено особенностями применения беспилотных летательных аппаратов. Несмотря на то, что во многих исследованиях рассматривается создание антенных решеток с широким диапазоном углов сканирования, такие системы требуют сложных диаграммообразующих схем, что усложняет их реализацию на готовых продуктах, в связи дополнительной весовой нагрузкой на беспилотные летательные аппараты.

Цель работы. Разработка переключаемой антенной системы на беспилотных летательных аппаратах с возможностью выбора направления излучения / приема в любом направлении азимутальной плоскости для повышения дальности связи относительно ненаправленных бортовых антенных систем. В рамках исследования разработана модель излучателя и переключаемой кольцевой антенной системы и цилиндрической антенной системы в пакете электромагнитного моделирования Ansys HFSS, основанной на **методе** конечных элементов для расчета электромагнитных полей.

Результаты. Показаны характеристики направленности кольцевой антенной системы из 8 и 6 элементов, в частности приводятся значения коэффициента направленного действия и азимутальные плоскости диаграммы направленности, а также аналогичные характеристики и параметры для цилиндрической антенной системы из 6×2 элементов.

Научная новизна. Разработанные модели увеличивают бюджет канала связи с БПЛА на 4,4-7,2 дБ, относительно ненаправленных систем, что соразмерно изменяет в большую сторону и дальность линии связи. Особый акцент сделан на форме огибающей диаграммы направленности при переключении на соседний элемент антенной системы, а также на возможность построения не только кольцевых, но и цилиндрических геометрий решения.

Практическая значимость. В результате данного исследования предложены конструктивные решения для использования на БПЛА с возможностью работы с любого направления азимутальной плоскости, а также с наклоном в угломестной плоскости для цилиндрической антенной системы.

Ключевые слова: БПЛА, антенная решетка, ретрансляция, кольцевая антенная решетка, цилиндрическая антенная решетка

Ссылка для цитирования: Межевов П.А., Коровин К.О. Анализ вариантов синтеза малоэлементной антенной решетки для использования в качестве бортовой антенной системы БПЛА // Труды учебных заведений связи. 2025. Т. 11. № 4. С. 78–86. DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-78-86. EDN:NYNYEJ

Original research

<https://doi.org/10.31854/1813-324X-2025-11-4-78-86>

EDN:NYNYEJ

Analysis of Synthesizing Options for a Low-Element Antenna Array for Use as UAV Onboard Antenna System

 Pavel A. Mezhevov✉, mezhevov.pa@sut.ru

 Konstantin O. Korovin, korovin.ko@sut.ru

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

Annotation

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) are currently undergoing active development. Their radio equipment is also advancing, presenting new challenges for designers. From the antenna perspective, a straightforward solution for ensuring communication is the use of omnidirectional antenna systems, which allow establishing a communication link with the UAV from any direction. However, such systems have a limited communication range. A relevant task is to increase the operational range of communication links for unmanned aerial vehicles while maintaining the capability to establish a link from any direction. Primarily, increasing the range can be achieved by employing directional antenna systems; however, this is limited by the specific operational features of UAVs. Although numerous studies focus on creating antenna arrays with a wide scanning angle range, such systems require complex beamforming networks, which complicates their implementation on commercial products due to the additional weight burden on the UAV.

Aim. *Development a switchable antenna system for unmanned aerial vehicles with the capability to select the radiation / reception direction in any azimuth plane direction to enhance the communication range compared to omnidirectional onboard antenna systems.*

Materials and methods. *As part of this research, models of a radiating element, a switchable circular antenna array, and a cylindrical antenna array were developed using the Ansys HFSS electromagnetic simulation package, which is based on the finite element method for calculating electromagnetic fields.*

Results. *The radiation patterns of an 8-element and a 6-element circular antenna array are presented, specifically the values of the directivity coefficient and azimuthal plane radiation patterns. Similar characteristics and parameters for a 6×2 element cylindrical antenna array are also provided.*

Scientific novelty. *The developed models increase the communication link budget of the UAV by 4.4–7.2 dB compared to omnidirectional systems, which proportionally extends the range of the communication link. Particular emphasis is placed on the shape of the radiation pattern envelope when switching to an adjacent element of the antenna system, as well as on the feasibility of implementing not only circular but also cylindrical array geometries.*

Practical significance. *This research proposes design solutions for use on UAVs, enabling operation from any direction in the azimuth plane, as well as with an inclination in the elevation plane for the cylindrical antenna system.*

Keywords: UAV, antenna array, relay, ring antenna array, cylindrical antenna array

For citation: Mezhevov P.A., Korovin K.O. Analysis of Synthesizing Options for a Low-Element Antenna Array for Use as UAV Onboard Antenna System. *Proceedings of Telecommunication Universities*. 2025;11(4):78–86. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2025-11-4-78-86. EDN:NYNYEJ

Введение

Современные БПЛА стремительно развиваются и для них находится все большее количество областей применения [1, 2]. Радиотехнические решения постепенно расширяют полосу пропускания, позволяют использовать сети, построенные на основе БПЛА, применять последние в качестве ретрансля-

тора и т. п. Основным достоинством БПЛА является его мобильность, что также приводит к некоторым особенностям радиотехнического оснащения, в частности – бортовой антенной системы. Как правило, бортовая антенна является слабонаправленной, что уменьшает максимальную дальность связи с БПЛА.

В настоящей работе рассматривается использование секторной переключаемой кольцевой антенной системы в качестве бортовой антенны с возможностью управляемого переключения нужного сектора. В качестве излучателя был выбран микрополосковый элемент, в связи с малыми массогабаритными параметрами и простотой изготовления.

Текущее состояние антенных систем на БПЛА

В современных БПЛА используются всенаправленные бортовые антенные системы [3, 4], антенны со строгой направленностью, что соответствует ограниченной области применения таких БПЛА [5], и переключаемые антенные системы [6].

В [7] рассматривалась кольцевая антенная решетка из 8 и 16 элементов, с возможностью использования 3 и 5 соседних элементов, которая также способна обеспечивать возможность работы во всей азимутальной плоскости, однако она нуждается в диаграммообразующем устройстве, что значительно влияет на массогабаритные параметры, сложность и стоимость антенной системы.

Из представленных вариантов переключаемые антенные системы представляются наиболее перспективным решением, т. к. всенаправленные антенные решетки обеспечивают изотропную диаграмму направленности (ДН) в азимутальной плоскости, что позволяет обеспечивать связь с БПЛА с любого направления, однако обладают малым коэффициентом усиления (КУ). Направленные антенны, в свою очередь, обладают противоположными качествами – большим КУ и ограниченным углом использования БПЛА.

Переключаемые антенные решетки, в свою очередь, обладают преимуществами и направленных и ненаправленных систем, а именно: способны обеспечивать высокий КУ и изотропную огибающую ДН в азимутальной плоскости.

Параметры бортовой антенной системы

Бортовые антенные системы на БПЛА в большинстве систем должны обеспечивать возможность работы канала связи с наземной станцией с любого направления в азимутальной плоскости, а также обладать минимально возможными массогабаритными параметрами. Усложнение антенной системы неизбежно приводит к повышению массы, однако использование кольцевых антенных решеток позволяет добиться большей направленности [7].

Исходя из озвученных требований, можно сделать вывод о необходимости использования ненаправленных излучателей, однако задача обеспечения возможности работы в любом азимутальном направлении может быть решена с применением кольцевых антенных решеток.

В настоящей работе рассматривается упрощенное решение задачи с использованием направленных излучателей, расположенных в форме кольцевой антенной решетки, но с единственным активным элементом в каждый момент времени, с возможностью переключения активного сектора. Такое решение при правильном управлении позволяет получить приближенную к круговой огибающую ДН, что удовлетворяет требованию по обеспечению возможности работы с любого направления. В отличие от всенаправленных антенн, рассматриваемое решение позволяет добиться большего коэффициента направленного действия (КНД), что положительно влияет на максимальную дальность связи при равных мощности передатчиков и чувствительности приемников.

Разработка излучателя для переключаемой антенной системы

Общая масса и размеры итоговой антенной системы напрямую зависят как от аналогичных параметров излучателя, так и от количества излучателей.

Количество излучателей для перекрытия всей азимутальной плоскости стоит выбирать из ширины ДН одного элемента по выражению:

$$N = \frac{360}{2\theta_{0,5}}, \quad (1)$$

где $2\theta_{0,5}$ – ширина ДН одиночного излучателя по уровню половинной мощности.

Таким образом, количество элементов может быть определено, исходя из максимальной допустимой массы антенной системы на БПЛА. В таком случае излучатель должен быть выбран, опираясь на минимизацию массы и обеспечение выполнения требуемой ширины ДН по выражению (1).

В данной работе рассматриваются варианты антенных систем из 6 и 8 излучателей, поэтому излучатель должен обладать шириной ДН не менее 60° . Такая ширина свойственна микрополосковому излучателю, который, помимо подходящей ширины ДН, обладает рядом преимуществ, а именно – малыми массогабаритными параметрами и простотой изготовления и интеграции [8].

Разработанный излучатель представлен на рисунке 1, а его ДН и частотные параметры – на рисунке 2. Выбран диапазон частот $5,8$ ГГц, часто использующийся в беспилотной технике с возможностью передачи видеосигнала [9].

Материалы и геометрические параметры разработанного излучателя сведены в таблицу 1.

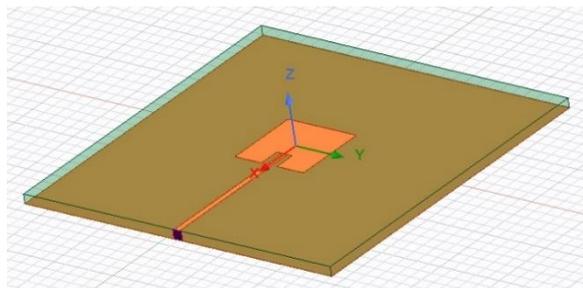


Рис. 1. Одиночный микрополосковый элемент

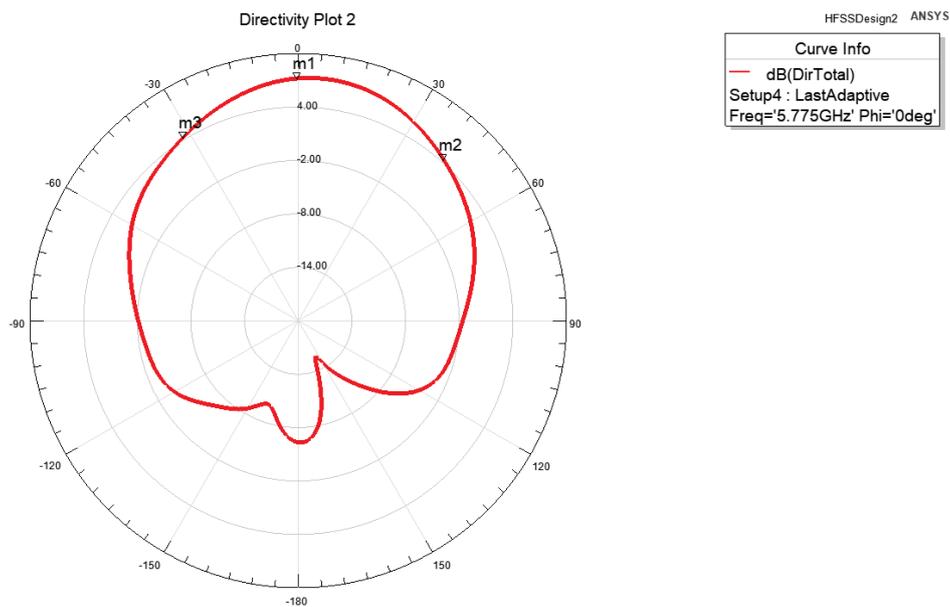
Fig. 1. Single Microstrip Element

ТАБЛИЦА 1. Параметры излучателя

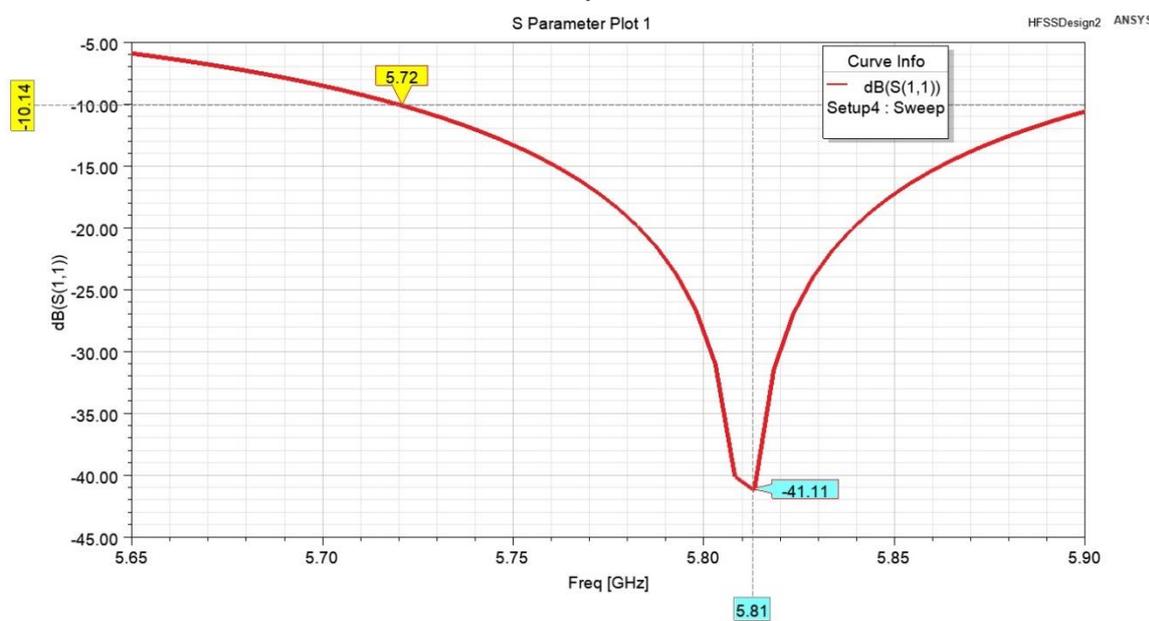
TABLE 1. Radiator Parameters

Материал проводящей части	Медь
Диэлектрическая подложка	Стеклотекстолит FR-4
Размер подложки, мм	52×52×1,5
Размер патча, мм	11,6×11,6

Name	Theta	Ang	Mag
m1	0.0000	0.0000	7.2164
m2	42.0000	42.0000	4.3088
m3	-32.0000	-32.0000	4.2711



a)



b)

Рис. 2. Диаграмма направленности (a) и коэффициент отражения (S11) (b) одиночного элемента

Fig. 2. Directional Pattern (a) and S11 (b) of a Single Element

Проектирование переключаемой антенной системы

В ходе работы создано несколько моделей переключаемых антенных систем. Для упрощения систематизации и оценки полученных моделей введен следующий набор критериев:

К₁ – количество элементов в антенной системе, позволяющей оценить соотношение массы полученного радиотехнического решения;

К₂ – радиус системы, позволяющий оценить габариты полученной антенной системы и область применения на конкретных БПЛА, мм;

К₃ – максимальный КНД, численно значимый для оценки дальности связи, при использовании соответствующей антенной системы, дБ;

К₄ – минимальный КНД, соответствующий точке переключения соседних элементов и показывающий значение КНД в наиболее неблагоприятном варианте пространственного расположения БПЛА, дБ;

К₅ – неравномерность огибающей ДН, численно рассчитанной как разница К₃ и К₄, дБ.

Первая итерация состоит из 8 элементов, при наиболее близком расположении элементов образует кольцо с радиусом 75,5 мм (рисунок 3). Вследствие взаимного влияния элементов наблюдается рассогласование активного антенного излучателя, что приводит к смещению зависимости соответствующего S параметра от частоты (рисунок 4).

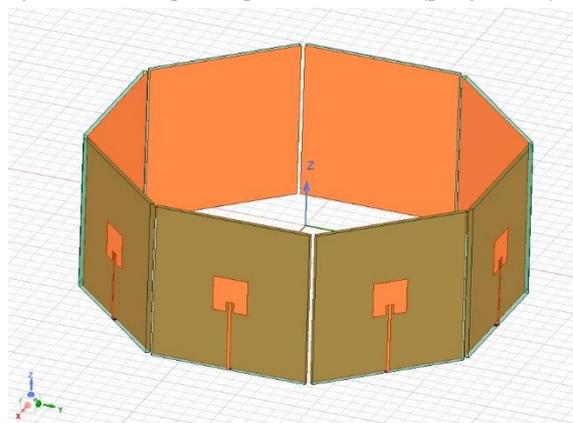


Рис. 3. Кольцевая переключаемая антенная система из 8 элементов

Fig. 3. 8-Element Ring Switchable Antenna System

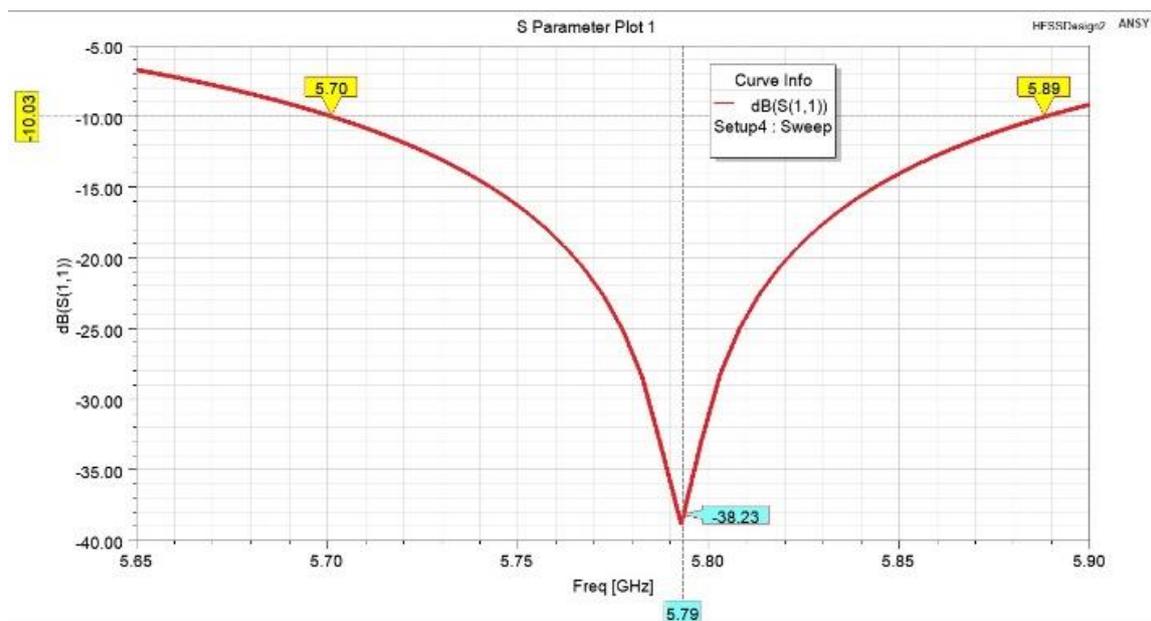


Рис. 4. Рассогласование S параметра при использовании 8 элементной переключаемой системы

Fig. 4. S-Parameter Mismatch When Using 8-Element Switched System

На рисунке 5а представлены ДН при использовании соседних элементов. Маркер *maxdir* показывает максимальный КНД антенной системы, а маркер *swardir* – минимальный КНД (точку переключения активного элемента). Таким образом, максимальный КНД системы равен 6,5 дБ, уровень огибающей ДН не снижается ниже 6,1 дБ, а неравномерность огибающей составляет 0,4 дБ.

Последующий вариант модели предполагает снижение огибающей ДН до уровня –3 дБ относительно максимума и содержит 6 элементов с радиусом системы 43,5 мм (рисунок 5б). После уменьшения числа элементов получены следующие параметры: максимальный КНД системы – 7,4 дБ, минимальный – 5,7 дБ, а неравномерность огибающей 2,7 дБ. Повышение КНД объясняется снижением взаимного влияния элементов.

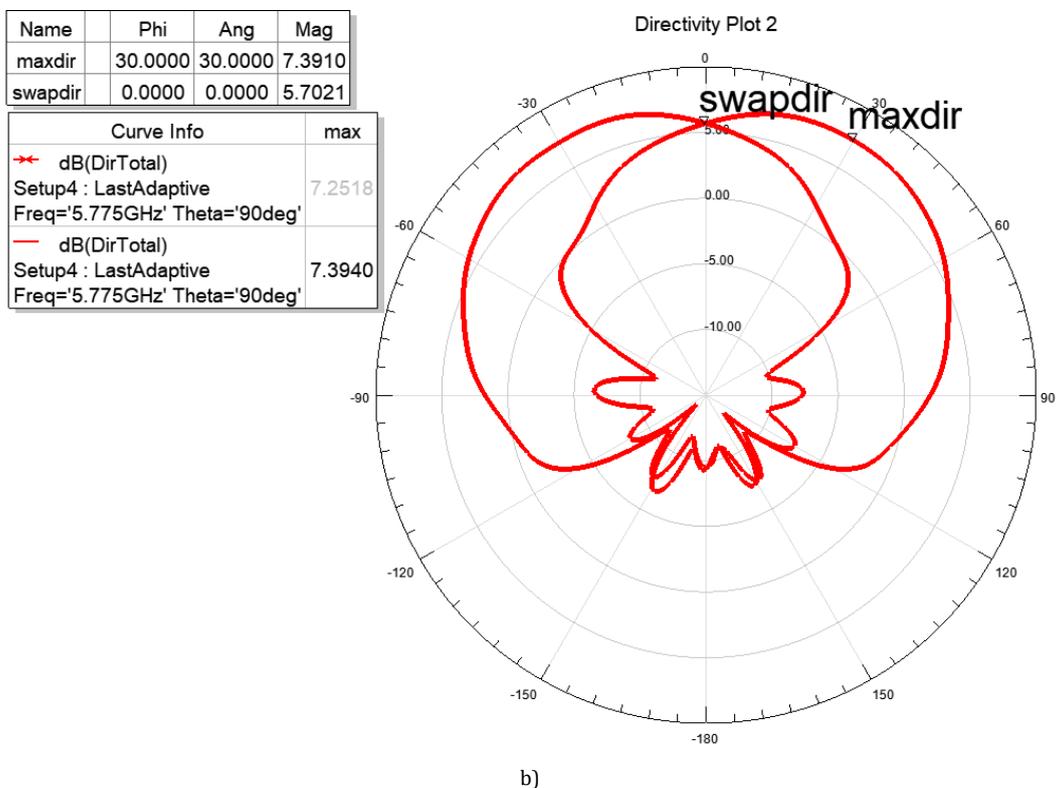
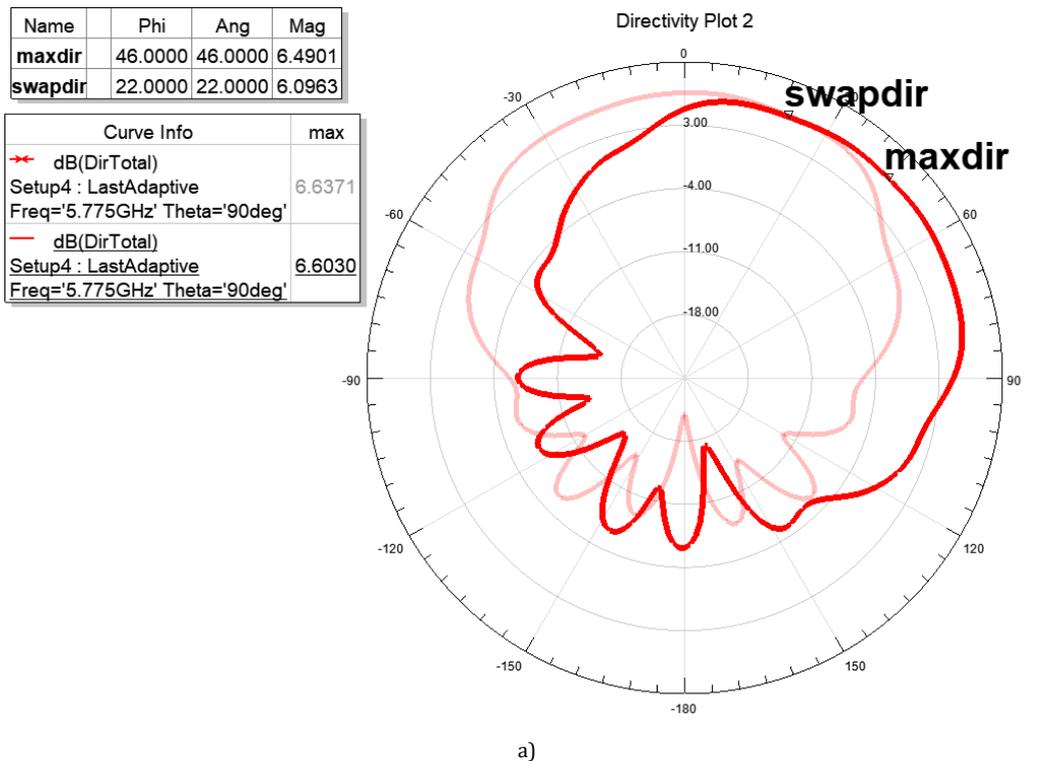


Рис. 5. ДН переключаемой антенной системы из 8 (а) и 6 (б) элементов при переключении на соседний элемент
 Fig. 5. Directional Pattern of Switchable Antenna System of 8 (a) and 6 (b) Elements When Switching to an Adjacent Element

Стоит заметить, что связь с БПЛА осуществляется между точками с разными координатами высот, в зависимости от высоты полета БПЛА. Из чего можно установить дополнительное требование к бортовой антенной системе – широкую ДН в угломестной плоскости, либо возможность ее наклона. Кольцевое расположение излучателей не позволяет управлять наклоном главного лепестка ДН, поэтому последующий вариант исполнения антенной системы предполагает использование цилиндрического расположения (рисунок 6).

Такое решение позволяет добиться большего КНД в направлении главного максимума, за счет одновременного использования 2 элементов, а также наклонить главный лепесток ДН с помощью внесения фазового сдвига между излучателями. Максимальный наклон ДН такой геометрии антенной системы достигает 30° при потерях КНД до 3 дБ относительно синфазно запитанных элементов. В результате получены ДН с максимальной уровнем 10,2 дБ, минимальным уровнем 8,8 дБ (рисунок 7), неравномерностью огибающей ДН 2,4 дБ и возможностью наклона ДН в угломестной плоскости (рисунок 8).

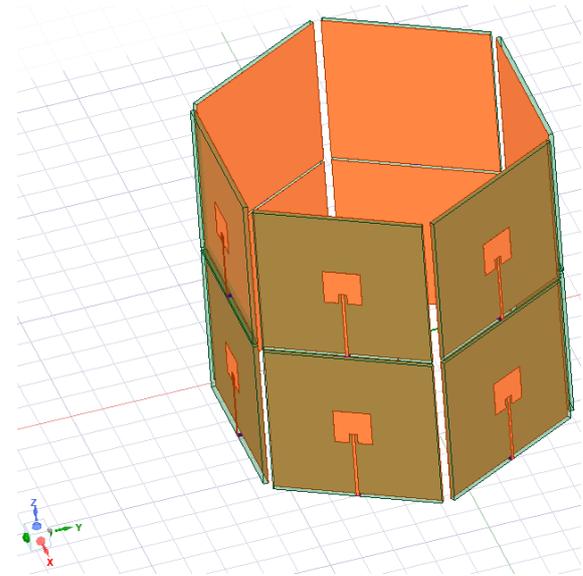


Рис. 6. Цилиндрическая переключаемая антенная система из 6×2 элементов

Fig. 6. 6×2-Elements Cylindrical Switchable Antenna System

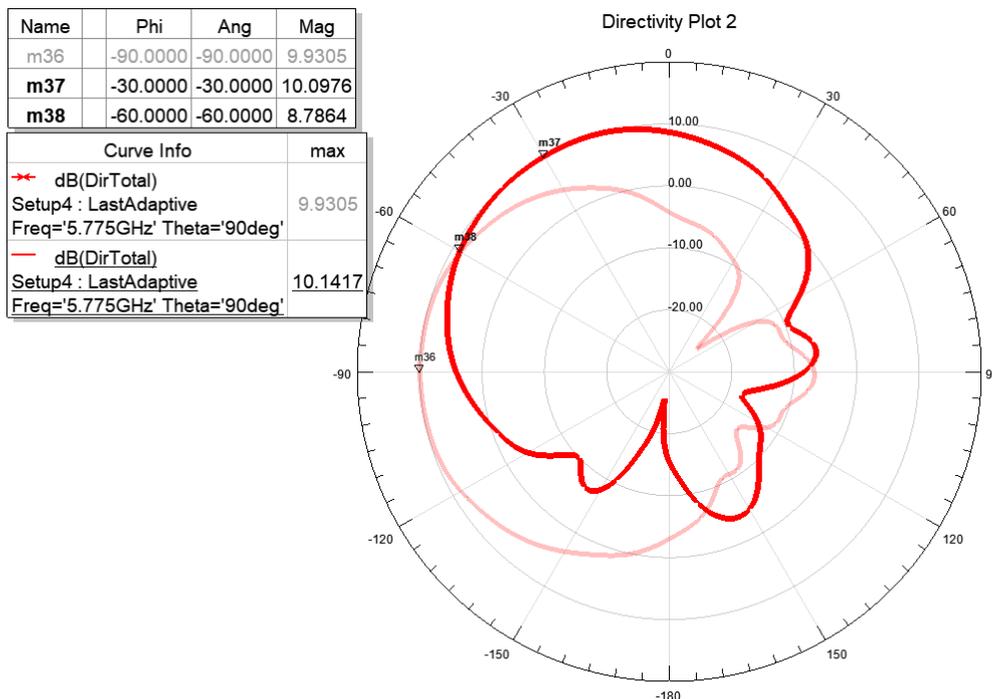


Рис. 7. ДН переключаемой антенной системы из 6×2 элементов при переключении на соседний элемент

Fig. 7. Directional Pattern of a Switchable Antenna System of 6×2-Elements When Switching to an Adjacent Element

Систематизация по введенным выше критериям сведена в таблицу 2. По сравнительным результатам можно сделать выводы по каждой модели. Вариант из 8 элементов может применяться в системах с необходимостью обеспечения максимальной ровной огибающей ДН, т. е. в БПЛА, летающих в

различных направлениях от центрального пункта связи. Модель из 6 элементов обладает минимальными массогабаритными параметрами, а цилиндрическая система способна обеспечить максимальную дальность связи.

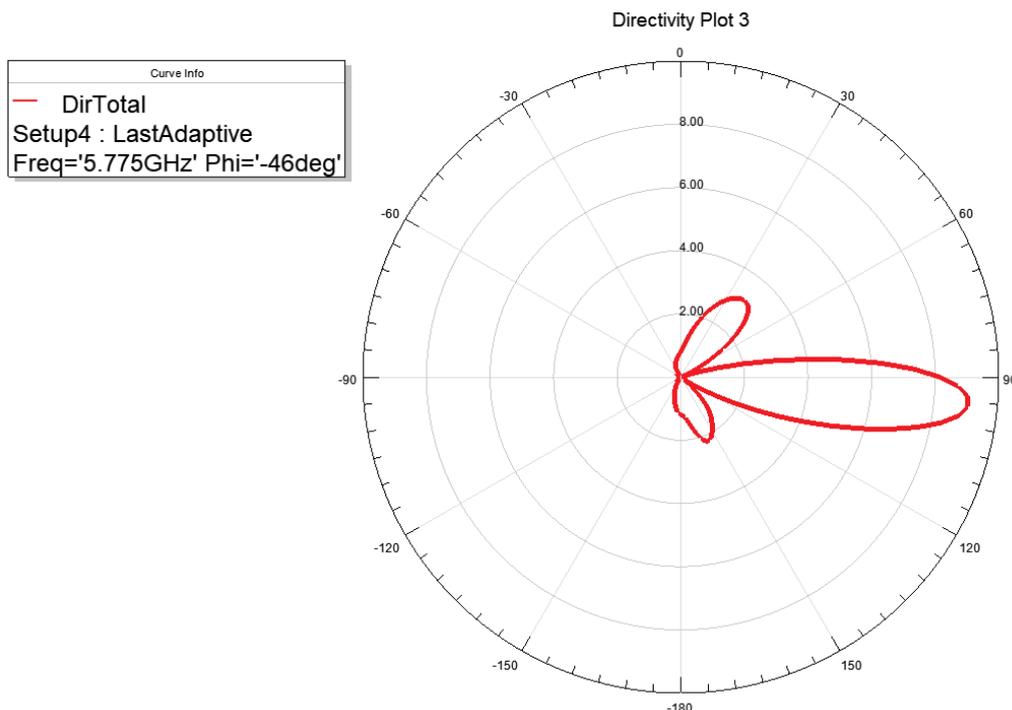


Рис. 8. ДН антенной системы в угломестной плоскости
 Fig. 8. Antenna System Directional Pattern in the Elevation Plane

ТАБЛИЦА 2. Результаты моделирования

TABLE 2. Simulation Results

Модель	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5
Кольцевая 8-элементная система	8	75,5	6,5	6,1	0,4
Кольцевая 6-элементная система	6	43,5	7,4	5,7	2,7
Цилиндрическая 6×2-элементная система	12	43,5	10,2	8,8	2,4

Заключение

В данной работе представлены варианты реализации переключаемой антенной системы кольцевого типа из 8 и 6 элементов, а также вариант цилиндрического типа из двух колец по 6 элементов. Использование 8 элементов достаточно для обеспечения круговой огибающей ДН с расхождением КНД минимум–максимум не более 0,5 дБ.

Вариант реализации из 6 элементов обладает большим расхождением КНД (до 2 дБ), однако та-

кая система все еще обеспечивает круговую ДН, а также обладает сниженными массогабаритными параметрами.

Также в работе рассматривается вариант цилиндрической переключаемой антенной системы с использованием нескольких кольцевых структур. Такое решение увеличивает КНД в направлении максимума за счет уменьшения ширины лепестка ДН, позволяет изменить угол наклона в угломестной плоскости, но конструкция в два раза больше и тяжелее кольцевой.

В дальнейшем развитии темы переключаемых малогабаритных и малоэлементных антенных систем предполагается развитие быстрых переключателей, подробный анализ влияния корпуса БПЛА и выбор места расположения таких антенных систем.

Отдельная оптимизация излучателя по критерию совпадения с требуемой шириной в азимутальной плоскости также приведет к повышению направленности всей системы.

Список источников

1. Федосеева Н.А., Загвоздкин М.В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов // Научный журнал. 2017. № 9(22). С. 26–29. EDN:ZSUMLX
2. Хабарина Д.С., Тишанинов И.А. Анализ применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) различного типа в сельском хозяйстве // Наука без границ. 2021. № 4(56). С. 78–83. EDN:JYHKLW
3. Антонов А.С., Антонов Ю.Г., Балландович С.В., Сугак М.И. Низкопрофильная антенна для БПЛА // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 6. С. 3–7. EDN:QCKUUL
4. Андрущенко М.С., Голик А.М., Сахнов С.А., Терешин С.Н. Антенные системы беспилотных летательных аппаратов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2024. № 5. С. 230–236. DOI:10.24412/2071-6168-2024-5-230-231. EDN:GJODDY

5. Marques P., Martins M., Baptista A., Torres J.P.N. Communication Antenas for UAVs // *Journal of Engineering Science & Technology Review*. 2018. Vol. 11. Iss. 1. PP. 90–102. DOI:10.25103/jestr.111.11
6. Антонов Ю.Г., Балландович С.В., Костиков Г.А., Любина Л.М., Сугак М.И., Терентьева П.В. Линейка антенн для беспилотных летательных аппаратов // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016, Севастополь, Российская Федерация, 04–10 сентября 2016 г.). Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2016. С. 1086–1092. EDN:YOOYIZ
7. Межевов П.А., Коровин К.О., Ликонцев А.Н. Создание кольцевой антенной решетки на основе излучателей Вивальди для широкополосного канала связи с ретрансляцией // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2023. Т. 26. № 3. С. 58–66. DOI:10.32603/1993-8985-2023-26-3-58-66. EDN:VCWALX
8. Панченко Б.А., Нефёдов Е.И. Микрополосковые антенны. М.: Радио и Связь, 1986.
9. Бондарев А.Н., Киричек Р.В. Обзор беспилотных летательных аппаратов общего пользования и регулирования воздушного движения БПЛА в разных странах // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2016. Т. 4. № 4. С. 13–23. EDN:YLNEPH

References

1. Fedoseeva N.A., Zagvozdin M.V. Promising application areas of unmanned aerial vehicles. *Nauchnyi Zhurnal*. 2017;9(22): 26–29. (in Russ.) EDN:ZSUMLX
2. Habarina D.S., Tishaninov I.A. Analysis of the use of various types of unmanned aerial vehicles (UAVs) in agriculture. *Nauka bez granic*. 2021;4(56):78–83. (in Russ.) EDN:JYHKLW
3. Antonov A.S., Antonov Y.G., Ballandovich S.V., Sugak M.I. Low-profile antenna intended for the installation on UAV. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*. 2013;6:3–7. (in Russ.) EDN:QCKUUL
4. Andryushchenko M.S., Golik A.M., Sahnov S.A., Tereshin S.N. Antenna systems for unmanned aerial vehicles. *Izvestiya Tula State University*. 2024;5:230–236. (in Russ.) DOI:10.24412/2071-6168-2024-5-230-231. EDN:GJODDY
5. Marques P., Martins M., Baptista A., Torres J.P.N. Communication Antenas for UAVs. *Journal of Engineering Science & Technology Review*. 2018;11(1):90–102. DOI:10.25103/jestr.111.11
6. Antonov Yu.G., Ballandovich S.V., Kostikov G.A., Lubina L.M., Sugak M.I., Terenteva P.V. Unmanned aerial vehicle antenna range. *Proceedings of the 26th International Crimean Conference on Microwave Engineering and Telecommunication Technologies, 4–10 September 2016, Sevastopol, Russian Federation*. Sevastopol: Sevastopol State University Publ.; 2016. p.1086–1092. (in Russ.) EDN:YOOYIZ
7. 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;26(3):58–66. (in Russ.) DOI:10.32603/1993-8985-2023-26-3-58-66. EDN:VCWALX
8. Panchenko B.A., Nefedov E.I. *Microstrip antennas*. Moscow: Radio i Svyaz' Publ.; 1986. (in Russ.)
9. Bondarev A., Kirichek R. Overview of Unmanned Aerial Apparatus for General use and Regulation of Air UAV Movement in Different Countries. *Telecom IT*. 2016;4(4):13–23. (in Russ.) EDN:YLNEPH

Статья поступила в редакцию 24.06.2025; одобрена после рецензирования 20.07.2025; принята к публикации 26.08.2025.

The article was submitted 24.06.2025; approved after reviewing 20.07.2025; accepted for publication 26.08.2025.

Информация об авторах:

МЕЖЕВОВ
Павел Александрович

старший преподаватель кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-9797-2575>

КОРОВИН
Константин Олегович

кандидат физико-математических наук, заведующий кафедры радиотехники Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-7979-3725>

Авторы сообщают об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interests.