

[2022_abstracts.pdf \(mai.ru\)](#)

Труды МАИ. 2023. № 129

Trudy MAI, 2023, no. 129

Научная статья

УДК 621.396.6

DOI: [10.34759/trd-2023-129-14](#)

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КОНФОРМНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ПЕЧАТНЫМ ИЗЛУЧАТЕЛЕМ ДЛЯ БПЛА

Данил Геннадиевич Король^{1✉}, Владимир Степанович Темченко²

^{1,2}Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Москва, Россия

¹Dan0932@yandex.ru✉

²Vstemchenko@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрены постановка задачи и результаты численного моделирования для конформной цилиндрической антенной решетки с прямоугольным печатным излучателем линейной поляризации, рассчитанным на частоту 2,4 ГГц, которая размещается на БПЛА. Такой подход справедлив применяя аппроксимацию отдельных участков летательного аппарата простыми геометрическими фигурами. Рассмотрена задача сканирования лучом в секторе $\varphi_{\text{ск}}=225^\circ$ $\theta_{\text{ск}}=30^\circ$.

Ключевые слова: печатная антенна, конформные антенны, моделирование антенн, CST Microwave Studio

Для цитирования: Король Д.Г., Темченко В.С. Исследование цилиндрической конформной антенной решетки с печатным излучателем для БПЛА // Труды МАИ. 2023. № 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-14)

Original article

STUDY OF A CYLINDRICAL CONFORMAL ANTENNA ARRAY WITH A PATCH EMITTER FOR UAV

Danil G. Korol¹, **Vladimir S. Temchenko²**

^{1,2}Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,
Moscow, Russia

¹Dan0932@yandex.ru

²Vstemchenko@gmail.com

Abstract. The article proposes an approach that makes it possible to place a scanning antenna array with a patch emitter on an unmanned aerial vehicle without reducing its aerodynamic characteristics.

The purpose of this work is to research the characteristics of conformal antennas on a cylindrical surface, which allow wide-angle scanning at the required frequency and polarization for further use in unmanned aerial vehicles.

The object of research is antenna arrays modeled in the CST Microwave Studio program, placed on a cylindrical surface.

The result of the work is to obtain the necessary phase distribution and the excitation sector of the antenna array elements to achieve the required field of view during scanning.

The approximation of individual sections of the aircraft by simple geometric figures such as a cylinder, a ball and a cone was adopted. They decided to place the antenna array on the fuselage, which was presented as a cylinder.

The phase distribution is found using the geometrical optics approximation to focus the beam in a given direction. Azimuth scanning takes into account the shape of the cylindrical surface.

To reduce the level of spurious radiation without using the amplitude distribution, we have selected the optimal excitation sector of the antenna array elements.

The simulation results confirmed the possibility of scanning the antenna array in a given sector of angles in azimuth and elevation.

The proposed approach for creating an antenna array can be built into an unmanned aerial vehicle, after the design has been finalized, already taking into account the real device. It will also be necessary to design the feeding system with phase shifters, power splitters and antenna switches.

Keywords: patch antenna, conformal antennas, antenna modeling, CST Microwave Studio

For citation: Korol D.G., Temchenko V.S. Study of a cylindrical conformal antenna array with a patch emitter for UAV. *Trudy MAI*, 2023, no. 129. DOI: [10.34759/trd-2023-129-14](https://doi.org/10.34759/trd-2023-129-14)

Введение

Последнее десятилетие особую важность приобретает разработка конформных фазированных антенных решеток. Такие антенны используют в радиолокации, системах РЭБ, в телекоммуникационных системах, спутниковой связи [1] и летательных аппаратах. Важным преимуществом таких антенн является возможность формирования узкого луча и широкоугольного сканирования с сектором до 360 градусов. В конформных АР излучатели размещаются на неплоских поверхностях – цилиндрической [2,3,4], конической [5,6], сферической [7,8] и их комбинированных [9].

Для БПЛА нужно обеспечить высокую скорость передачи информации, скрытность работы, устойчивость к внешним помехам, уменьшение массогабаритных характеристик, снижение негативного влияния других источников сигналов и т.д. [10]. Внедрение конформных антенн позволяет обеспечить требуемые массогабаритные показатели целевых нагрузок беспилотных летательных аппаратов [11]. Возможно размещение печатной конформной антенной решетки на крыле БПЛА [12]. В целом возможно применение малогабаритных плоских фазированных антенных решеток [13], размещенных в носовой части аппарата [14] или на фюзеляже [15]. Однако теоретический сектор обзора такой системы не может превышать $\pm 90^\circ$ градусов. Также отклонение луча в широком секторе сканирования для плоских антенных решеток приводит к увеличению УБЛ и снижению КУ и обычно реальный диапазон сканирования ограничен $\pm 60^\circ$. Использование конформных антенн, при избыточном количестве излучателей и

геометрической симметрии расположения излучателей, позволяет сканировать без искажений характеристик направленности.

Для бортовых систем можно реализовать антенную систему с низким уровнем бокового излучения на основе печатных излучателей [16]. Возможен подход по размещению АР с печатным излучателем на поверхности БПЛА [17]. В [18] представлена широкоугольная сканирующая конформная фазированная антенная решетка с печатным излучателем для платформы беспилотного летательного аппарата (БПЛА) размещенная на переднем крыле с сектором сканирования $\pm 70^\circ$. Если необходимо, то возможно уменьшения количества элементов с сохранением характеристик направленности, но требуется оптимизация расположения элементов [19].

Целью работы является исследование характеристик конформных антенн на цилиндрической поверхности, позволяющих обеспечить широкоугольное сканирование на требуемой частоте и поляризации для дальнейшего использования в БПЛА.

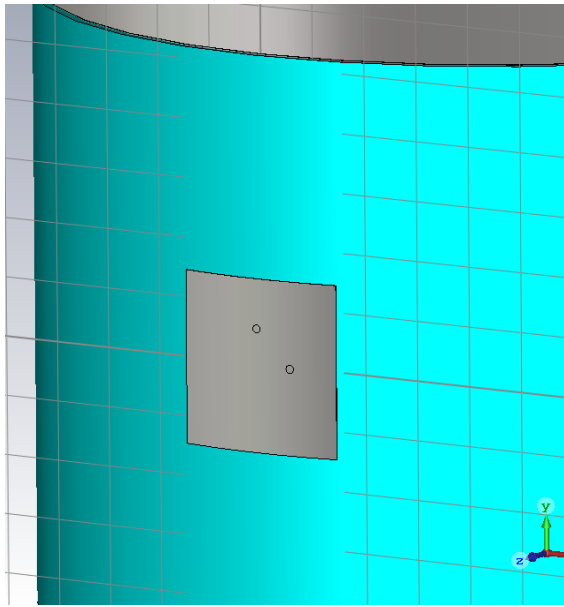
Одиночный прямоугольный печатный излучатель

Для начала представим себе средний БПЛА имеющий фюзеляж, который на отдельных участках можно аппроксимировать геометрическими поверхностями, такими как цилиндр, конус и полусфера. Максимальный радиус фюзеляжа будет составлять 16 см. Он будет изготовлен из композитного материала, с внутренней

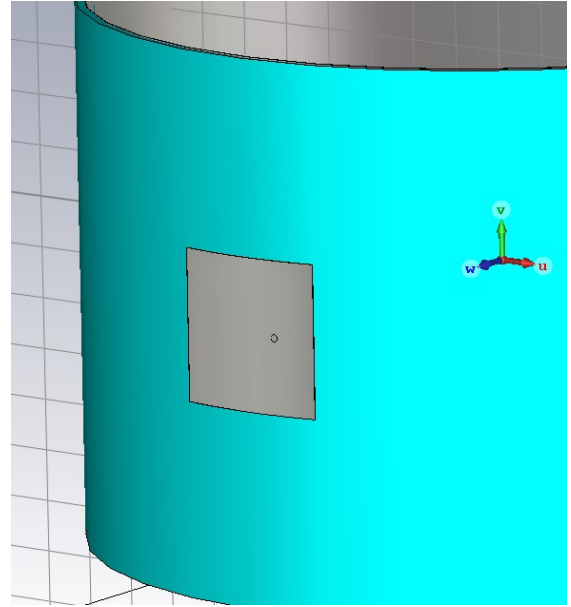
оклейкой металлической фольгой. Для связи с ним будем использовать стандартную частоту для связи равную 2,4 ГГц.

Рассчитаем на основную частоту $f_{осн} = 2,4$ ГГц ($\lambda=12,5$ см) прямоугольный печатный излучатель и разместим его на выпуклую поверхность. Моделирования проведем для случая линейной и круговой поляризации. Общие принципы проектировки печатных излучателей представлены в [19]. Композитный материал, из которого изготовлен фюзеляж будет с диэлектрической проницаемостью в пределах $\varepsilon_r = 4 - 4,8$ (в расчетах будем считать $\varepsilon_r = 4,4$). Толщина диэлектрической подложки 2 мм. На рабочей частоте КСВ должен быть ниже 2. Сектор обзора антенной решетки $\varphi_{ск} = 225$ градусов и $\theta_{ск} = 30$ градусов.

Выбор точки подключения коаксиального кабеля делался подбором, чтобы получить S_{11} ниже -10дБ на частоте 2,4 ГГц. Печатный излучатель может создавать излучения как с линейной, так и с круговой поляризацией, а также работать на одной или двух частотах с взаимно ортогональным расположением плоскостей поляризации излучаемых волн [20]. На рисунке 1 предсталенна геометрия печатного излучателя для линейной и круговой поляризации. Для создания круговой поляризации использовалось 2 точки запитки с разностью фаз 90 градусов. Размер патча L-29 мм.



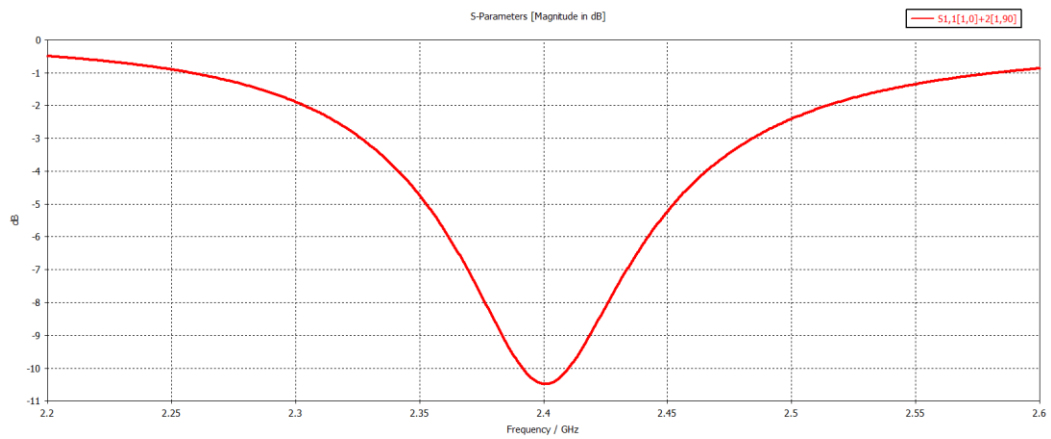
а)



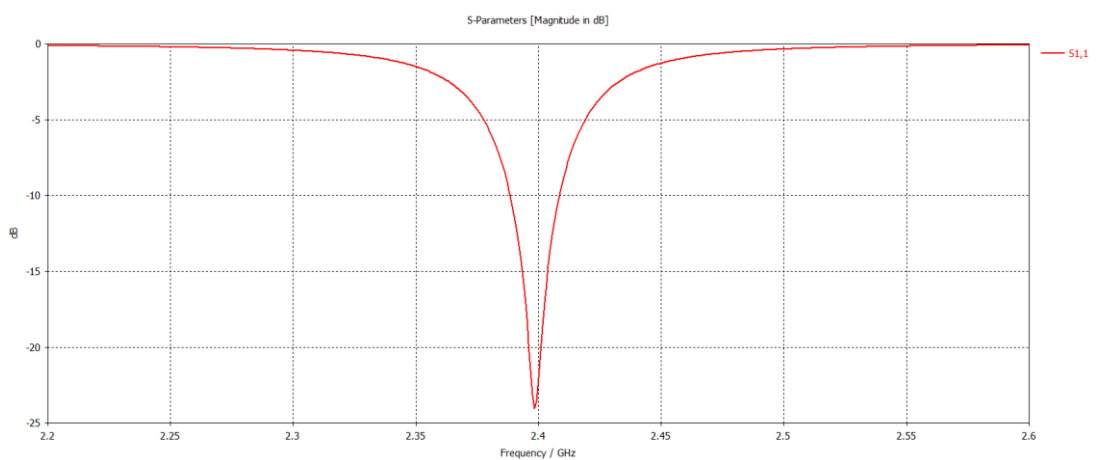
б)

Рисунок 1 – Патч 2.4 ГГц на цилиндре радиуса 16 см коаксиальной запиткой: а) круговой поляризации; б) линейной поляризации.

По рисунку 2 можно наблюдать, что выбор точки запитки позволил достичь коэффициент отражения S_{11} на частоте 2,4 ГГц для круговой поляризации равный -10,5 дБ и для линейной поляризации равный -24 дБ. Ширина полосы по уровню -10 дБ составляет 25 МГц для обоих случаев.



а)



б)

Рисунок 2– Коэффициент отражения S11 патча: а) круговой поляризации;
б) линейной поляризации.

На рисунке 3 представлена характеристика направленности излучателя с круговой поляризацией. Ширина главного лепестка ДН по уровню минус 3 дБ в плоскости $\varphi = 90^\circ$ составляет 89 градусов и в плоскости $\varphi = 0^\circ$ – 107 градусов. Уровень обратного излучения составляет -11,3 дБ. КУ в направлении максимума равен 6,2 дБ.

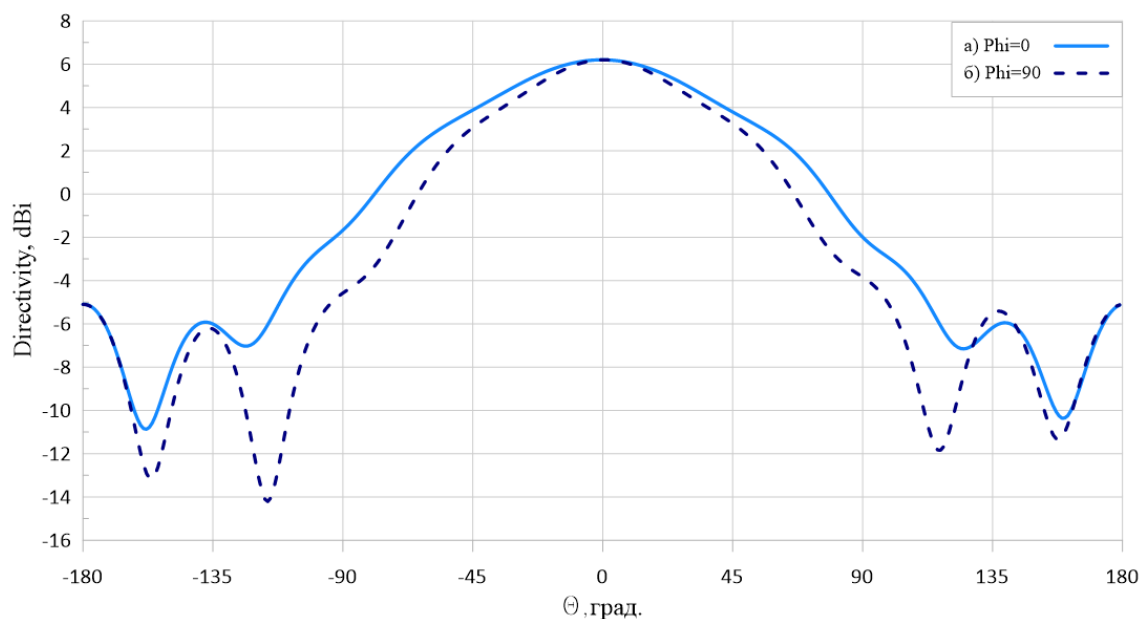


Рисунок 3 – ДН патч антенны на частоте 2,4 ГГц для одиночного элемента с круговой поляризацией в плоскости: а) $\varphi = 0^\circ$; б) $\varphi = 90^\circ$.

На рисунке 4 представлена характеристика направленности излучателя с линейной поляризацией. Ширина главного лепестка ДН по уровню минус 3 дБ в плоскости $\varphi = 90^\circ$ составляет 78,5 градусов и в плоскости $\varphi = 0^\circ$ – 125 градусов. Уровень обратного излучения составляет -12 дБ. КУ в направлении максимума равен 6,1 дБ.

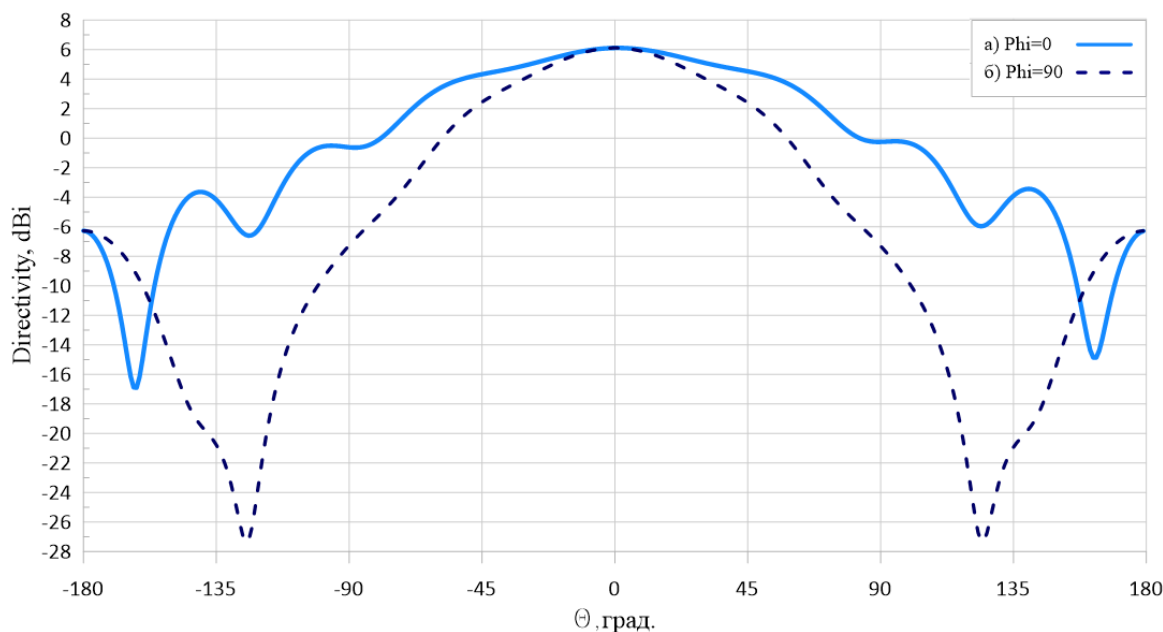


Рисунок 4 – ДН патч антенны на частоте 2,4 ГГц для одиночного элемента с линейной поляризацией в плоскости: а) $\varphi = 0^\circ$; б) $\varphi = 90^\circ$.

Цилиндрическая конформная антенная решетка из 7 печатных излучателей с линейной поляризацией

Мы предполагаем, что функция излучения для одного элемента n равна $EL_n(r)$, где r - направление и расстояние от контрольной точки в элементе до точки поля. Точка отсчета имеет глобальные координаты R_n , а комплексное возбуждение элемента равно V_n . Таким образом, излучаемое поле от этого элемента, включая поляризацию, задается $V_n EL_n(r)$. Суммируя все элементы, мы получаем излучаемое поле в точке P , заданной координатами r .

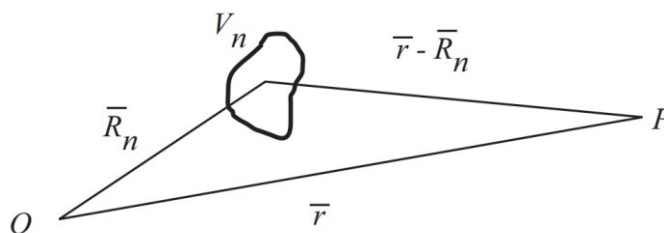


Рисунок 5 - Геометрия, относящаяся к одному излучателю с возбуждением V_n .

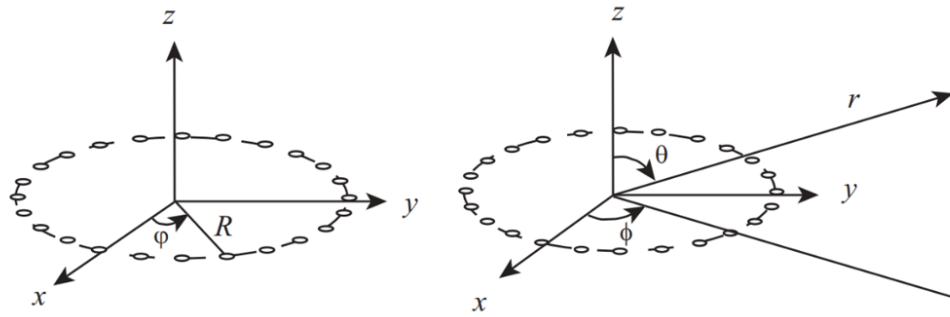


Рисунок 6 – Геометрия для кольцевой антенной решетки. Локальными координатами на окружности являются (R, φ) . Координаты дальнего поля обозначены (r, Θ, φ) .

Выражение дальнего поля для кольцевой решетки в плоскости азимута равно:

$$E(\varphi) = \sum_n V_n EL(\varphi - n\Delta\varphi) e^{jkR \cos(\varphi - n\Delta\varphi)} \quad (1)$$

Мы можем налагать значения фазы на каждый элемент, чтобы они согласованно складывались в требуемом направлении. Мы получаем правильное фазовое возбуждение (синфазное возбуждение луча) для каждого элемента n , выбирая:

$$\psi(n) = -kR \cos(\varphi_0 - n\Delta\varphi) \quad (2)$$

Функция излучения для сфокусированного круглого случая становится:

$$E(\varphi) = \sum_n |V_n| EL(\varphi - n\Delta\varphi) e^{jkR(\cos(\varphi - n\Delta\varphi) - \cos(\varphi_0 - n\Delta\varphi))} \quad (3)$$

А требуемое фазовое распределение:

$$\psi(n) = -kR(\cos(\varphi - n\Delta\varphi) - \cos(\varphi_0 - n\Delta\varphi)) \quad (4)$$

Линейная поляризация, по сравнению с круговой, более проста в технической реализации и требует меньше денежных затрат. Поэтому для антенной решетки остановимся на излучателе с линейной поляризацией. Геометрия решетки представлена на рисунке 7. Излучатели идут с шагом λ , чтобы снизить взаимное влияние. На цилиндре радиуса 16 см с выбранным шагом можно разместить $n = 8$

излучателей, для которой $\Delta\varphi=45^\circ$. Так как нам нужно обеспечить сектор обзора $\varphi_{ск} = 225$ градусов, то оставим только 7 излучателей.

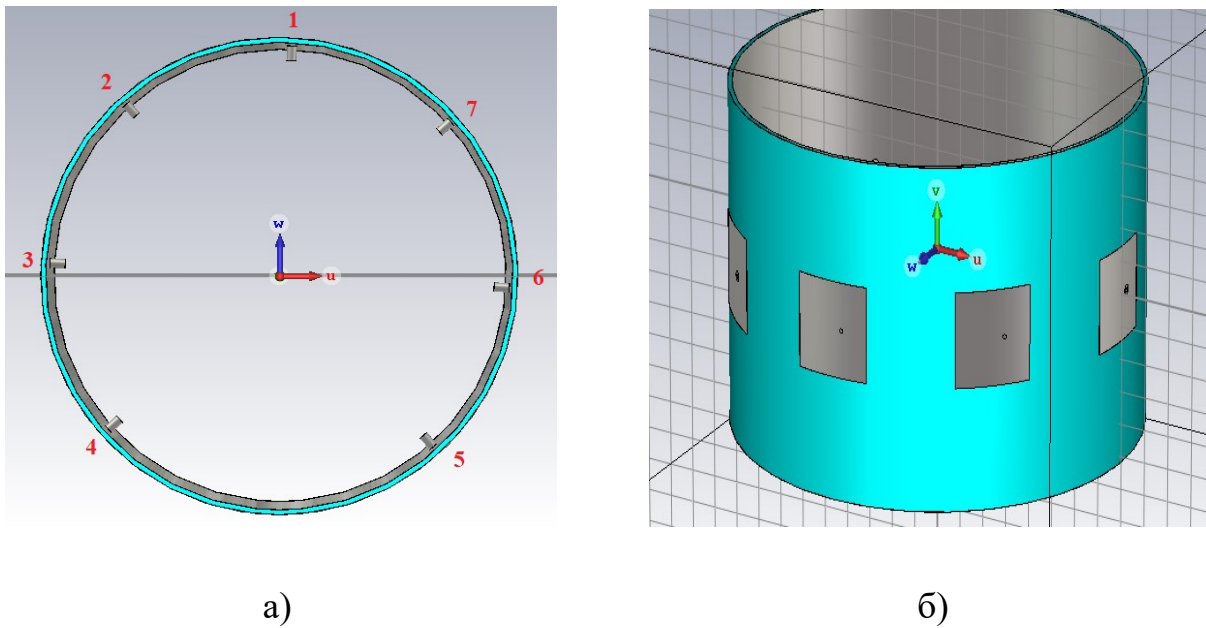


Рисунок 7 – Антенная решетка из 7 печатных элементов с линейной поляризацией:

а) общий вид; б) вид сверху с указанием номеров элементов.

Типичным случаем является синфазное возбуждение для сканирования сфокусированного луча в определенном направлении. Необходимое фазовое распределение по элементам для отклонения главного лепестка ДН антенны, полученное с помощью формулы (4), представлена в таблице 1. Для уменьшения побочного излучения антенны лучше всего возбуждать только элементы, попадающие на освещенную, с точки зрения геометрической оптики, сторону антенной решетки.

Теоретическое фазовое распределение для отклонения луча. Возбуждаем только элементы с подчеркнутым значением фазового сдвига.

Номер элемента n	$\psi(n)_{0^\circ}$	$\psi(n)_{22^\circ}$	$\psi(n)_{112^\circ}$
1	<u>-458°</u>	<u>-425°</u>	171°
2	<u>-324°</u>	<u>-422°</u>	-179°
3	0°	-171°	<u>-425°</u>
4	324°	179°	<u>-422°</u>
5	324°	422°	179°
6	0°	171°	425°
7	<u>-324°</u>	-179°	422°

На рисунке 8 представлен результат фокусировки антенной решетки в направлении 0 градусов, при этом возбуждаются только 1,2 и 7 элементы. У нас элементы идут с шагом 45 градусов, а значит отклоняя луч на 45 градусов, мы получаем такой же результат, как и в направлении 0 градусов. КУ в направлении максимума составляет 8,7 дБ. Уровень боковых лепестков -6 дБ, а уровень обратного излучения -10 дБ. Ширина главного лепестка ДН по уровню минус 3 дБ в плоскости $\varphi = 90^\circ$ составляет 70 градусов и в плоскости $\varphi = 0^\circ$ – 36 градусов.

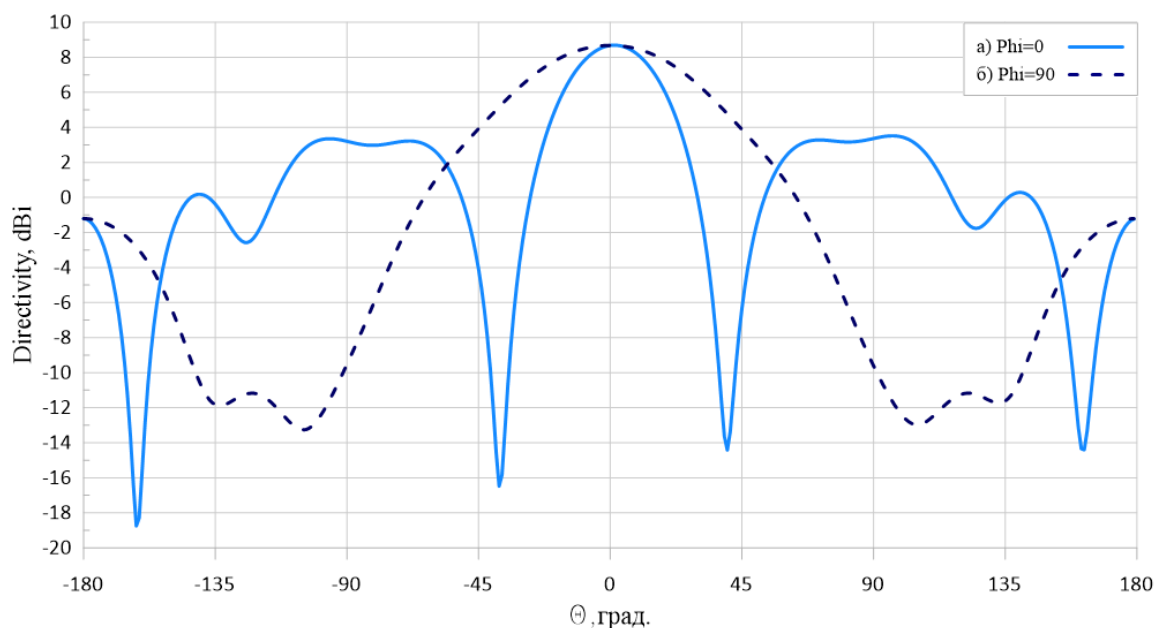


Рисунок 8 – ДН антенной решетки на частоте 2,4 ГГц при фокусировке в направлении 0° с возбуждаемыми 1,2 и 7 элементами в плоскости: а) $\varphi = 0^\circ$;
б) $\varphi = 90^\circ$.

При направлении луча в направлении 22,5 градуса, элементы 1 и 2 начинают находится на одинаковом расстоянии от центра эквивалентного линейного раскрыва. В таком случае лучше всего возбуждать только эти 2 элемента.

Рисунок 9 показывает полученные ДН при фокусировке луча в направлении 22 градуса и 112 градусов. Это идентичные случаи отличаются только смещением фазовых набегов на 2 элемента против часовой стрелки. КУ в направлении максимума составляет 8,7 дБ. Уровень боковых лепестков -15 дБ. Ширина главного лепестка ДН по уровню минус 3 дБ в плоскости $\varphi = 0^\circ$ составляет 55 градусов.

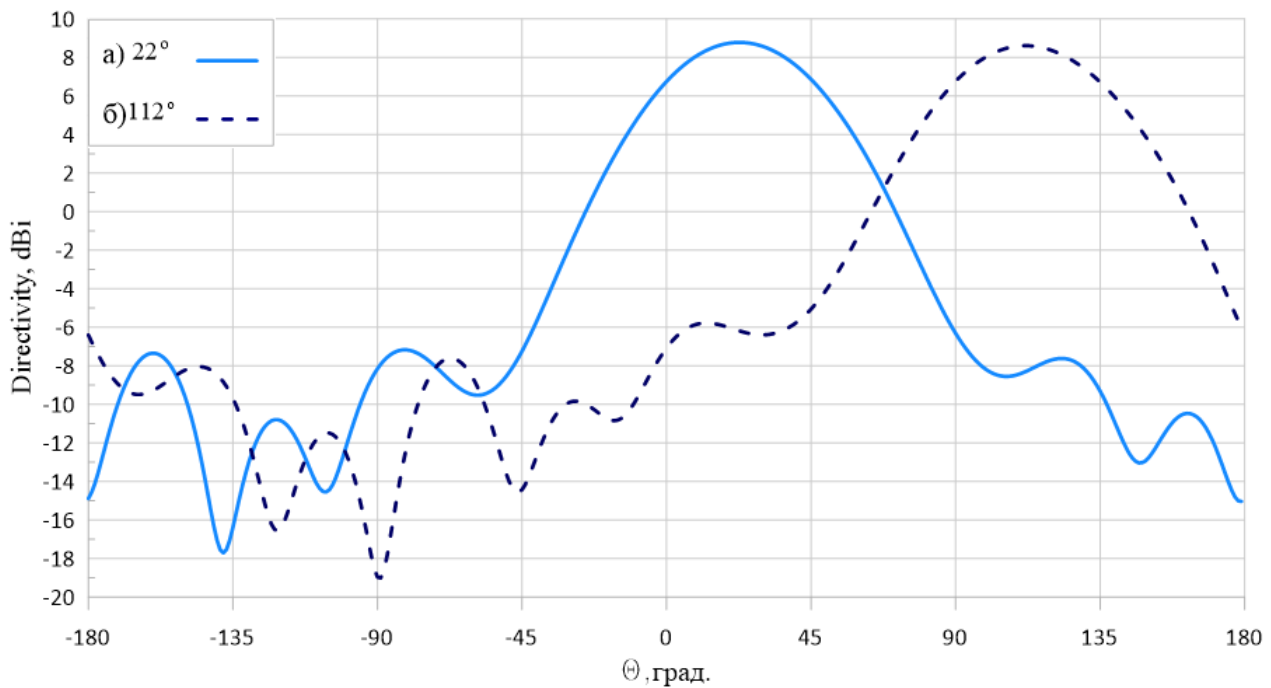


Рисунок 9 – ДН антенной решетки на частоте 2,4 ГГц в плоскости $\varphi = 0^\circ$ при фокусировке в направлении: а) 22° с возбуждаемыми 1 и 2 элементами; б) 112° с возбуждаемыми 3 и 4 элементами.

Теоретически увеличение радиуса цилиндра позволит разместить большее количество элементов, что увеличит КУ и сузит главный луч ДН при одинаковом секторе возбуждения. Для сравнения создадим решетку из 13 элементов на цилиндре радиуса 32 см. Ее геометрия представлена на рисунке 10.

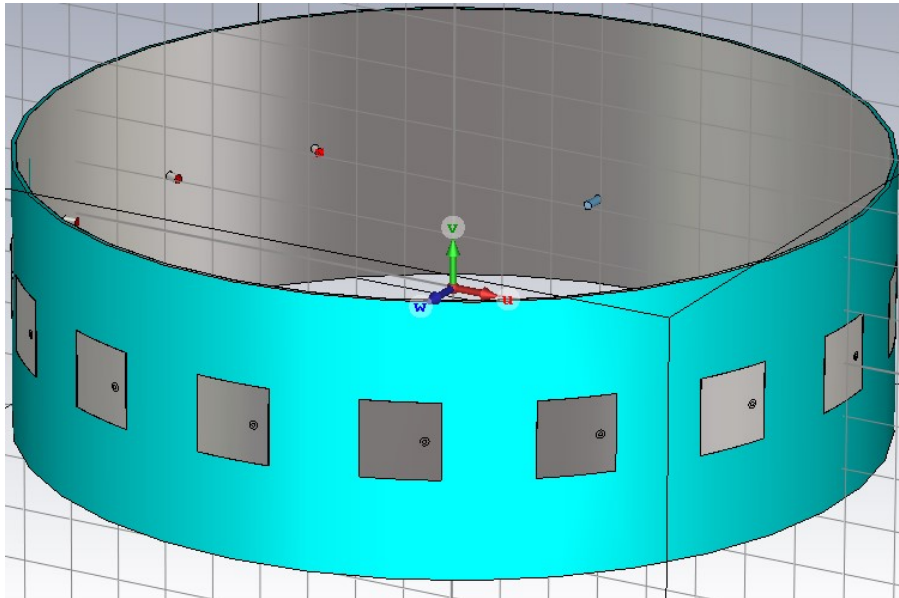


Рисунок 10 – Антенная решетка из 13 печатных элементов с линейной поляризацией на цилиндре радиуса 32 см

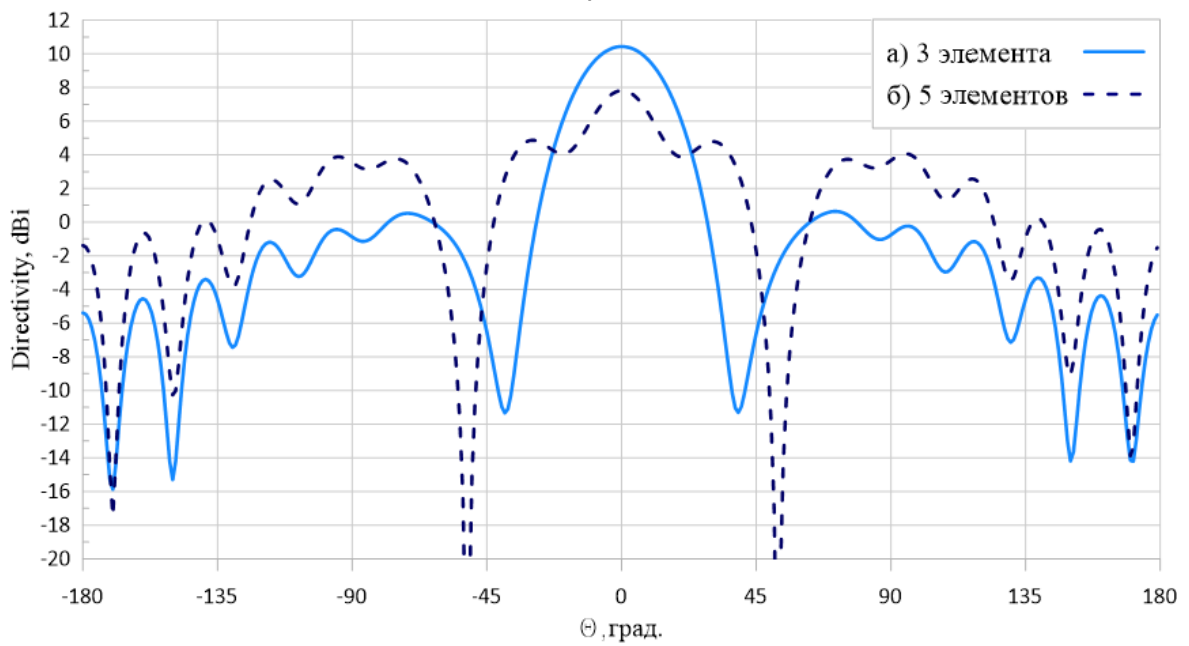


Рисунок 11 – ДН антенной решетки на частоте 2,4 ГГц при фокусировке в направлении 0° в плоскости $\varphi = 0^\circ$ с возбуждаемыми: а) 3 печатными элементами; б) 5 печатными элементами.

Полученный результат, представленный на рисунке 11, показал, что при сохранении того же сектора возбуждения, в формировании ДН стало участвовать 5 элементов. КУ ухудшился с 8,7 дБ для АР на цилиндре радиуса 16 см до 8 дБ. УБЛ повысился с -6 дБ до -3дБ. Но ширина ДН уменьшилась с 36 градусов до 29 градусов. Чтобы улучшить параметры необходимо или применить амплитудное распределение или уменьшить сектор возбуждения. Пойдя по второму пути, мы уменьшили количество возбуждаемых элементов до 3. Это позволило получить КУ равный 10,5 дБ и УБЛ -10 дБ, а ширину ДН равную 33 градуса.

Цилиндрическая конформная антенная решетка из 7х3 печатных излучателей с линейной поляризацией

Чтобы получить возможность вести обзор в плоскости θ необходимо добавить 2 ряда по 7 элементов к имеющейся антенной решетке (Рисунок 12). Помимо этого, увеличение количества элементов позволит повысить КУ антенны. Так общее количество элементов станет равным 21. Шаг рядов составляет $0,6\lambda$.

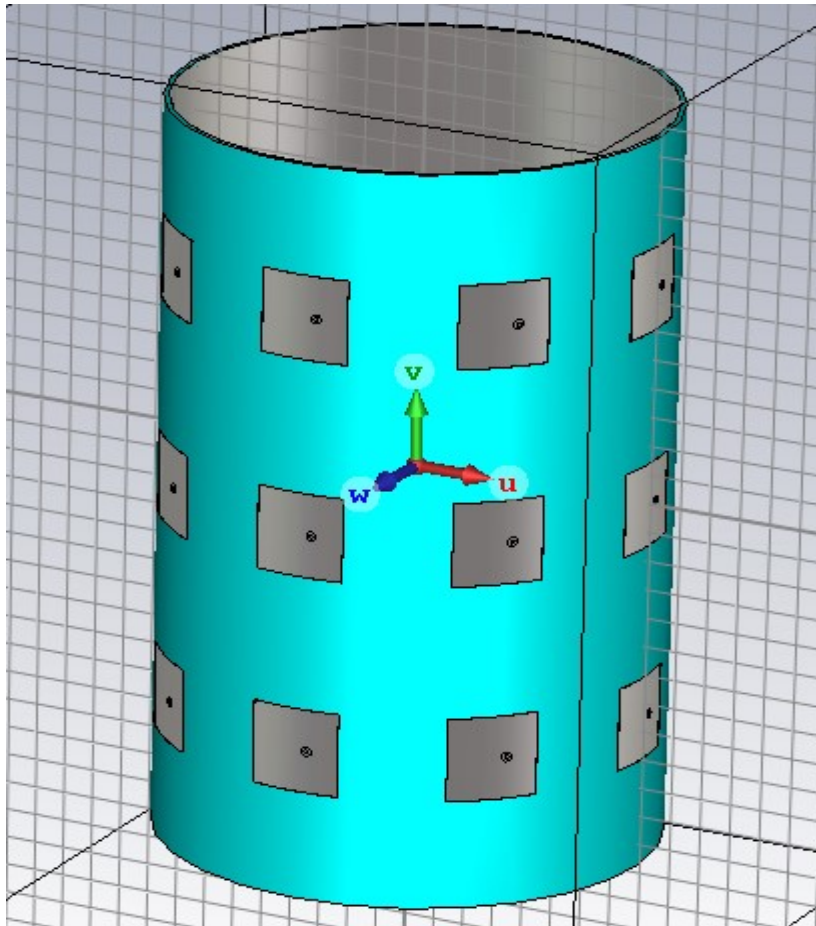


Рисунок 12 – Антенная решетка из 21 печатного элемента с линейной поляризацией

Чтобы отклонить луч в плоскости θ на угол $\theta_{ск}$ необходимо создать фазовый сдвиг:

$$\Theta(n) = kY_n \sin(\theta_{ск}) \quad (5)$$

,где Y_n - значение координат положения ряда.

Полученные значения по (5) необходимо прибавить к (4), тогда получим одновременное отклонение луча в плоскости θ и φ .

Сфокусируем луч в направлении 0 градусов, задав фазовые значения как в таблице 1 для каждого из рядов, а затем прибавим к ним сдвиг по формуле (5), чтобы отклонить луч на $\theta_{ск} = 15$ градусов. Полученный результат представлен на

рисунке 13. КУ в направлении максимума составляет 13 дБ. Ширина главного лепестка ДН по уровню минус 3 дБ в плоскости $\varphi = 90^\circ$ составляет 28 градусов.

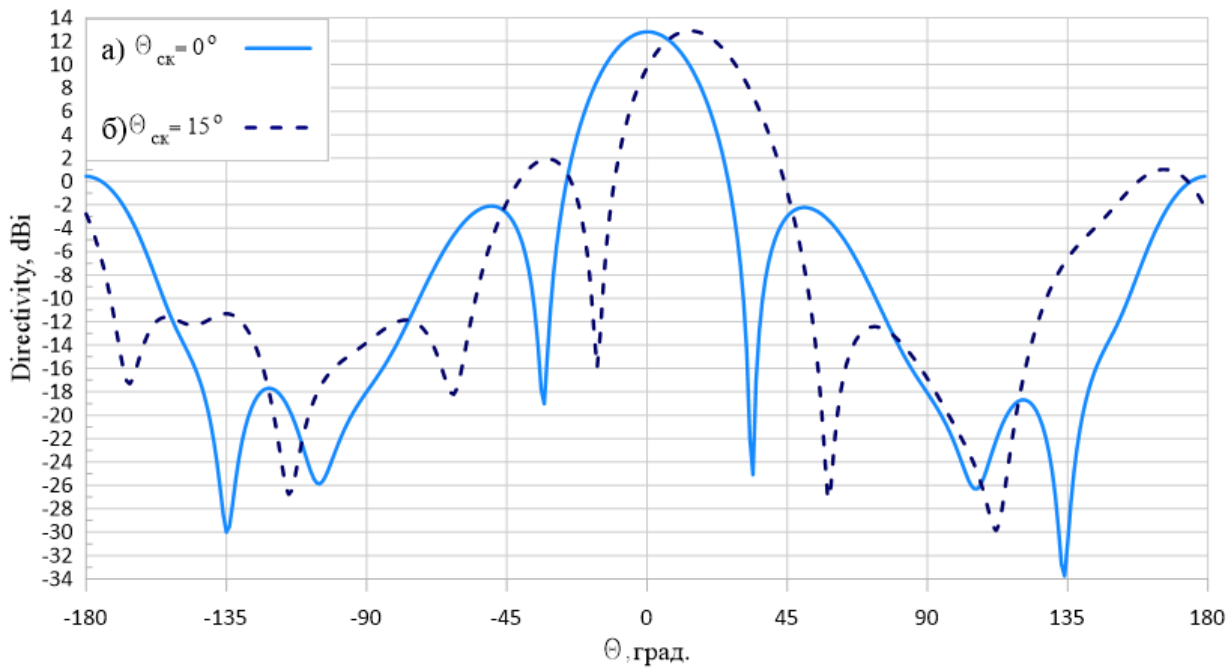
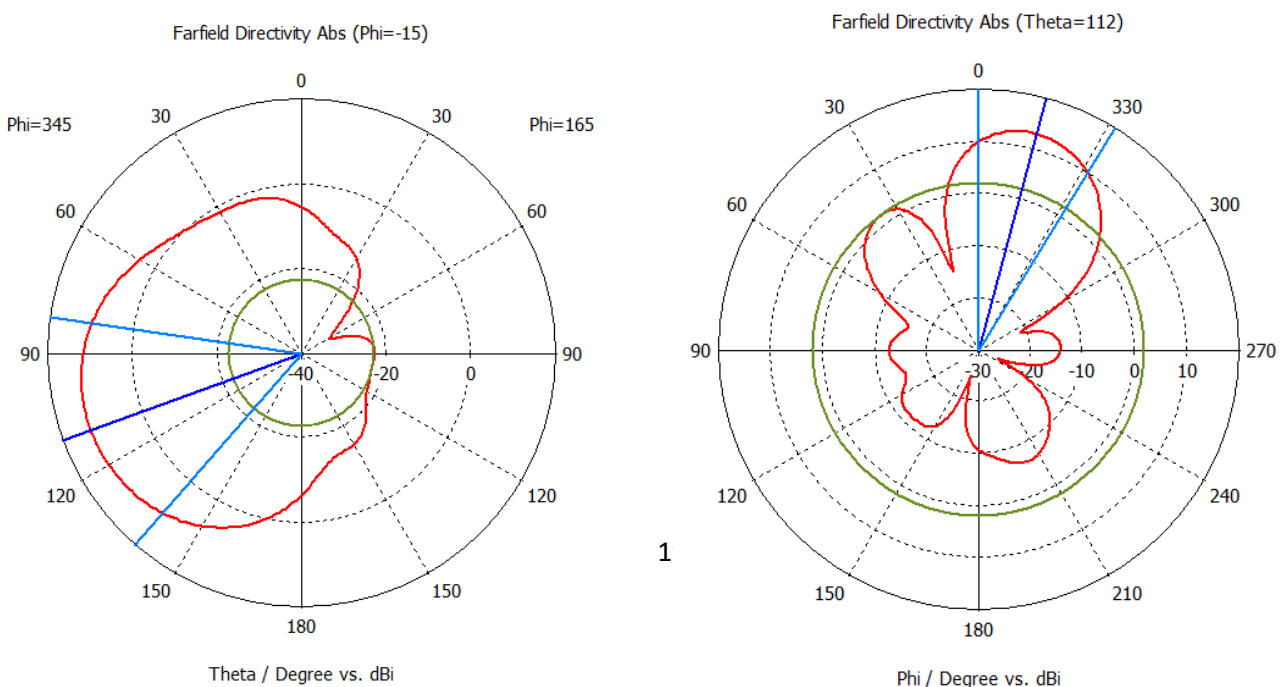


Рисунок 13 – ДН антенной решетки на частоте 2,4 ГГц в плоскости $\varphi = 90^\circ$ при фокусировке в направлении $\varphi_{ск} = 0^\circ$ и: а) $\theta_{ск} = 0^\circ$ б) $\theta_{ск} = 15^\circ$.

Последний случай представлен на рисунке 14, где мы отклонили луч на самый край зоны сканирования в направлении $\varphi_{ск} = 112^\circ$ и $\theta_{ск} = 15^\circ$. Ширина главного лепестка ДН по уровню минус 3 дБ в плоскости $\theta = 112^\circ$ составляет 30 градусов и в плоскости $\varphi = -15^\circ - 57$ градусов



а)

б)

Рисунок 14 – ДН антенной решетки на частоте 2,4 ГГц при фокусировке в направлении $\varphi_{ск} = 112^\circ$ и $\theta_{ск} = -15^\circ$: а) в плоскости $\varphi = -15^\circ$ б) в плоскости $\theta = 112^\circ$.

Заключение

В работе выполнены исследования по численному моделированию печатной конформной антенной решетки на частоту 2,4 ГГц, которую предполагается разместить на небольшом БПЛА. Предполагается аппроксимация участка беспилотного летательного аппарата, на котором располагается антенная решетка, цилиндром. Рассчитаны и оптимизированы одиночные печатные излучатели с линейной и круговой поляризациями, расположенные на цилиндре. Представлена постановка задачи моделирования кольцевой конформной антенной решетки с конечным числом элементов. Проведено численное моделирование 2-х вариантов антенной решетки: 1. Цилиндрической с одним рядом печатных излучателей предназначенной для сканирования только в одной плоскости в секторе $\varphi_{ск} = 225^\circ$ 2. Цилиндрической с тремя рядами печатных излучателей для одновременного сканирования в двух плоскостях в секторе $\varphi_{ск} = 225^\circ$ $\theta_{ск} = 30^\circ$. При сканировании в плоскости φ ширина ДН по мере поворота луча изменяется в пределах 36-55 градусов. Такой эффект мы получаем из-за того, что в создании ДН участвуют в начале 3, а потом только 2 элемента. Если выбрать сектор излучения на цилиндре 90 градусов, то в излучении будут принимать участие от 5 до 4 элементов, но это существенно повысит УБЛ и потребуются введение спадающего к краям

амплитудного распределения, что в свою очередь добавит в систему еще и аттенюаторы.

Список источников

1. H. Ahn, B. Tomasic, S. Liu. Digital Beamforming in a large conformal Phased Array Antenna for satellite operations support — Architecture, design, and development // 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, MA, USA, 2010, pp. 423-431. DOI: 10.1109/ARRAY.2010.5613334
2. Q. Jianjun, Y. Zhaowei, C. Xiangyu. MOM Analysis of Cylindrical Conformal Dipole Array // 2006 7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory, Guilin, China, 2006, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ISAPE.2006.353394
3. S. Ogurtsov, S. Koziel. A Conformal Circularly Polarized Series-Fed Microstrip Antenna Array Design // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, vol. 68, no. 2, pp. 873-881. DOI: 10.1109/TAP.2019.2943326
4. K. A. Yinusa. A Dual-Band Conformal Antenna for GNSS Applications in Small Cylindrical Structures // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2018, vol. 17, no. 6, pp. 1056-1059. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2830969
5. K. Xu et al. Analytical Beam Forming for Circularly Symmetric Conformal Apertures // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1458-1464. DOI: 10.1109/TAP.2014.2382663
6. H. Xu, J. Cui, J. Duan, B. Zhang, Y. Tian. Versatile Conical Conformal Array Antenna Based on Implementation of Independent and Endfire Radiation for UAV

- Applications // IEEE Access, 2019, vol. 7, pp. 31207-31217. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2903198
7. B. D. Braaten, S. Roy, I. Irfanullah, S. Nariyal, D. E. Anagnostou. Phase-Compensated Conformal Antennas for Changing Spherical Surfaces // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, vol. 62, no. 4, pp. 1880-1887. DOI: 10.1109/TAP.2014.2298881
8. P. Knott. Design and Experimental Results of a Spherical Antenna Array for a Conformal Array Demonstrator // 2007 2nd International ITG Conference on Antennas, Munich, Germany, 2007, pp. 120-123. DOI: 10.1109/INICA.2007.4353945
9. Josefsson Lars, Patrik Persson. Conformal array antenna theory and design. John wiley & sons, 2006, 488 p.
10. Титов К.Д. Принципы построения сверхширокополосного канала связи на беспилотном летательном аппарате вертолетного типа легкого класса // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164250/> DOI: 10.34759/trd-2022-122-12
11. Ильин Е.М., Полубехин А.И., Черевко А.Г. Конформные антенные системы – перспективное направление развития бортовых РЛК для беспилотных летательных аппаратов // Вестник СибГУТИ. 2015. № 2. С. 149-155.
12. Yunfei Qiang, Lin Guo, Jing M. et al. A design of conformal dipole array for aircraft applications // IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2016. DOI: 10.1109/icmmt.2016.7761809

13. Расторгуев В.В., Нуждин В.М., Коновальцев А.В., Ананенков А.Е., Марин Д.В. К вопросу о расширении возможностей использования бортовых радиолокационных систем // Труды МАИ. 2016. № 90. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=74827>
14. Бушкин С.С., Головин С.А., Сорока Н.Н. Особенности разработки малогабаритных фазированных антенных решеток на ферритовых фазовращателях для беспилотных летательных аппаратов // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2020. № 1. С. 19-25. DOI: [10.38013/2542-0542-2020-1-19-25](https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-19-25)
15. Азаров А.В., Караваев М.Н., Рожков С.С., Славянский А.О., Смолка К.А. Синтез малогабаритного фазового пеленгатора авиационного базирования // Труды МАИ. 2022. № 123. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=165549>. DOI: [10.34759/trd-2022-123-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-123-12)
16. Овчинникова Е.В., Рыбаков А.М. Печатная антенная решетка для бортовой РЛС // Труды МАИ. 2012. № 52. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=29558>
17. Вахитов М.Г., Клыгач Д.С. Моделирование конформной антенной решётки для беспилотного летательного аппарата // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 3. DOI: [10.30898/1684-1719.2021.3.7](https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.7)
18. Jun-Jie Peng, Shi-Wei Qu, Mingyao Xia, Shiwen Yang. Conformal Phased Array Antenna for Unmanned Aerial Vehicle with $\pm 70^\circ$ Scanning Range // IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, vol. 69, issue 8. DOI: [10.1109/TAP.2021.3060125](https://doi.org/10.1109/TAP.2021.3060125)
19. Король Д.Г. Оптимизация числа излучателей конформной антенной решетки летательного аппарата на основе генетического алгоритма // 21-я Международная

конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, 21-25 ноября 2022): тезисы докладов. – М.: Изд-во «Перо», 2022. С. 289-290.

20. Воскресенского Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток. - М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.

References

1. H. Ahn, B. Tomasic, S. Liu. Digital Beamforming in a large conformal Phased Array Antenna for satellite operations support — Architecture, design, and development, 2010 *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*, Waltham, MA, USA, 2010, pp. 423-431. DOI: 10.1109/ARRAY.2010.5613334

2. Q. Jianjun, Y. Zhaowei, C. Xiangyu. MOM Analysis of Cylindrical Conformal Dipole Array, 2006 *7th International Symposium on Antennas, Propagation & EM Theory*, Guilin, China, 2006, pp. 1-4. DOI: 10.1109/ISAPE.2006.353394

3. S. Ogurtsov, S. Koziel. A Conformal Circularly Polarized Series-Fed Microstrip Antenna Array Design, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, vol. 68, no. 2, pp. 873-881. DOI: 10.1109/TAP.2019.2943326

4. K. A. Yinusa. A Dual-Band Conformal Antenna for GNSS Applications in Small Cylindrical Structures, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, vol. 17, no. 6, pp. 1056-1059. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2830969

5. K. Xu et al. Analytical Beam Forming for Circularly Symmetric Conformal Apertures, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 63, no. 4, pp. 1458-1464. DOI: 10.1109/TAP.2014.2382663

6. H. Xu, J. Cui, J. Duan, B. Zhang, Y. Tian. Versatile Conical Conformal Array Antenna Based on Implementation of Independent and Endfire Radiation for UAV Applications, *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 31207-31217. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2903198
7. B. D. Braaten, S. Roy, I. Irfanullah, S. Nariyal, D. E. Anagnostou. Phase-Compensated Conformal Antennas for Changing Spherical Surfaces, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, vol. 62, no. 4, pp. 1880-1887. DOI: 10.1109/TAP.2014.2298881
8. P. Knott. Design and Experimental Results of a Spherical Antenna Array for a Conformal Array Demonstrator, *2007 2nd International ITG Conference on Antennas*, Munich, Germany, 2007, pp. 120-123. DOI: 10.1109/INICA.2007.4353945
9. Josefsson Lars, Patrik Persson. *Conformal array antenna theory and design*. John Wiley & sons, 2006, 488 p.
10. Titov K.D. *Trudy MAI*, 2022, no. 122. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164250>. DOI: 10.34759/trd-2022-122-12
11. Il'in E.M., Polubekhin A.I., Cherevko A.G. *Vestnik SibGUTI*, 2015, no. 2, pp. 149-155.
12. Yunfei Qiang, Lin Guo, Jing M. et al. A design of conformal dipole array for aircraft applications, *IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2016. DOI: 10.1109/icmmt.2016.7761809
13. Rastorguev V.V., Nuzhdin V.M., Konoval'tsev A.V., Ananenkov A.E., Marin D.V. *Trudy MAI*, 2016, no. 90. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=74827>
14. Bushkin S.S., Golovin S.A., Soroka N.N. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz – Antei»*, 2020, no. 1, pp. 19-25. DOI: [10.38013/2542-0542-2020-1-19-25](https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-1-19-25)

15. Azarov A.V., Karavaev M.N., Rozhkov S.S., Slavyanskii A.O., Smolka K.A. *Trudy MAI*, 2022, no. 123. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=165549>. DOI: 10.34759/trd-2022-123-12
16. Ovchinnikova E.V., Rybakov A.M. *Trudy MAI*, 2012, no. 52. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=29558>
17. Vakhitov M.G., Klygach D.S. *Zhurnal radioelektroniki*, 2021, no. 3. DOI: 10.30898/1684-1719.2021.3.7
18. Jun-Jie Peng, Shi-Wei Qu, Mingyao Xia, Shiwen Yang. Conformal Phased Array Antenna for Unmanned Aerial Vehicle with $\pm 70^\circ$ Scanning Range, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, vol. 69, issue 8. DOI: 10.1109/TAP.2021.3060125
19. Korol' D.G. *21-ya Mezhdunarodnaya konferentsiya «Aviatsiya i kosmonavtika»: tezisy dokladov*. Moscow, Izd-vo «Pero», 2022, pp. 289-290.
20. Voskresenskii D.I. *Ustroistva SVCh i anteny. Proektirovanie fazirovannykh antennykh reshetok* (Antenna and microwave devices. Designing of phased antenna arrays), Moscow, Radiotekhnika, 2012, 744 p.

Статья поступила в редакцию 22.02.2023

Одобрена после рецензирования 28.02.2023

Принята к публикации 27.04.2023

The article was submitted on 22.02.2023; approved after reviewing on 28.02.2023; accepted for publication on 27.04.2023