

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.7>

УДК 621.396.67

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНФОРМНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЁТКИ ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

М. Г. Вахитов, Д. С. Клыгач

Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)
454080, Челябинск, пр. Ленина, 76

Статья поступила в редакцию 10 ноября 2020 г., после доработки – 16 марта 2021 г.

Аннотация. В статье рассмотрены результаты численного моделирования для плоской антенной решётки и конформной антенной решётки, выполненных на основе печатных излучателей в диапазоне частот 12-18 ГГц. Рассмотрен один из вариантов использования подобной антенны с учетом кривизны крыла беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в качестве конформной антенной решётки. Показано влияние кривизны поверхности БПЛА на параметры антенной решётки.

Ключевые слова: полосковая антенна, антенная решётка, конформная антенна, электромагнитное моделирование.

Abstract. The article discusses the results of numerical simulation for a flat antenna array and a conformal antenna array based on printed emitters in the frequency range 12-18 GHz. One of the options for using such an antenna, taking into account the curvature of the wing of an unmanned aerial vehicle (UAV), is as a conformal antenna array. The influence of the curvature of the UAV surface on the parameters of the antenna array is shown.

Key words: strip antenna, antenna array, conformal antenna, electromagnetic modeling.

Введение

В настоящее время при проектировании и разработке антенных систем для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) предъявляются следующие

требования – компактность, малый вес, технологичность и низкая стоимость изготовления. Это достигается за счёт применения композитных материалов, а также при использовании антенн на основе печатных излучателей.

Применение антенных решеток на основе печатных излучателей, волноводов или других излучающих элементов для формирования остронаправленной диаграммы направленности требует большого количества излучателей [1-3]. Увеличение числа излучателей приводит к увеличению размеров самой антенной решётки и, как следствие, повышению парусности самой антенны.

Одним из способов уменьшения парусности является расположение излучателей антенной решётки на несущей конструкции. Антенная решётка должна повторять обводы корпуса объекта, на котором она расположена (самолёта, беспилотного летающего аппарата и т.д.). Для решения таких задач применяются конформные антенные, т.е. изогнутые в какой-то плоскости антенные решётки [4].

Излучатели в таких антенных решётках могут располагаться по кругу (рис. 1) или на плоскости с различным радиусом кривизны (рис. 2) [5].

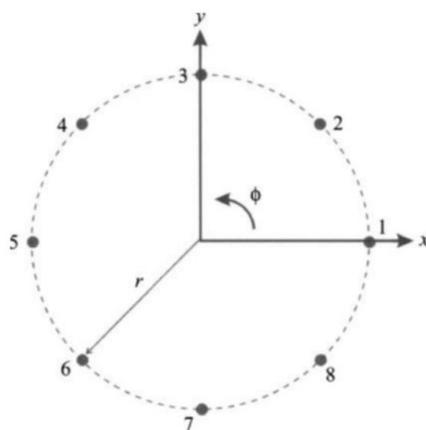


Рис.1. Расположение излучателей антенной решётки по кругу.

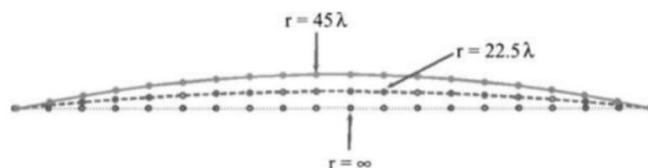


Рис.2. Конформная антенная решётка с различным радиусом кривизны поверхности.

Излучатели антенной решётки могут располагаться на эллиптической поверхности, например, поверхности дирижабля [6, 7].

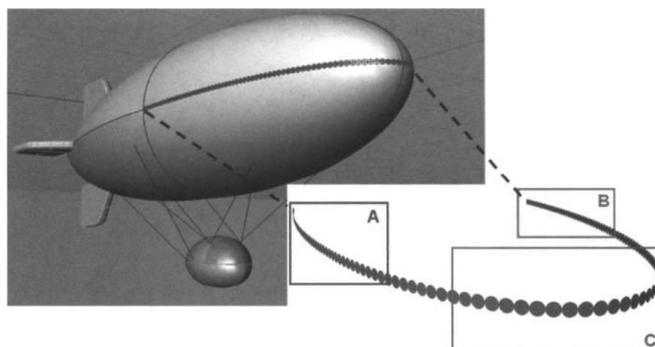


Рис. 3. Дирижабль с конформной антенной решёткой.

1. Расчет диаграммы направленности

Печатные излучатели широко применяются в качестве излучателей антенных решеток, поскольку обладают рядом преимуществ по сравнению с другими излучателями: не выступают на поверхности антенны, имеют низкую стоимость изготовления печатной антенны, а также хорошо интегрируются с печатными платами и легко принимают форму неплоской поверхности.

Возбуждение печатных излучателей может осуществляться различными способами. На рис. 4а возбуждение осуществляется с помощью коаксиального кабеля через отверстие в диэлектрической подложке. Внутренний проводник коаксиального кабеля гальванически соединен с печатным излучателем. Внешний проводник припаян к металлизации внизу. Отверстие в диэлектрике должно быть достаточно большим, чтобы внутренний проводник не касался заземляющей плоскости.

На рис. 4б показано возбуждение с помощью микрополосковой линии передачи. Видно, что к печатному элементу добавлены элементы для обеспечения согласования с линией передачи. На рис. 4в показано возбуждение с помощью микрополосковой линии передачи, которая расположена в самом диэлектрике.

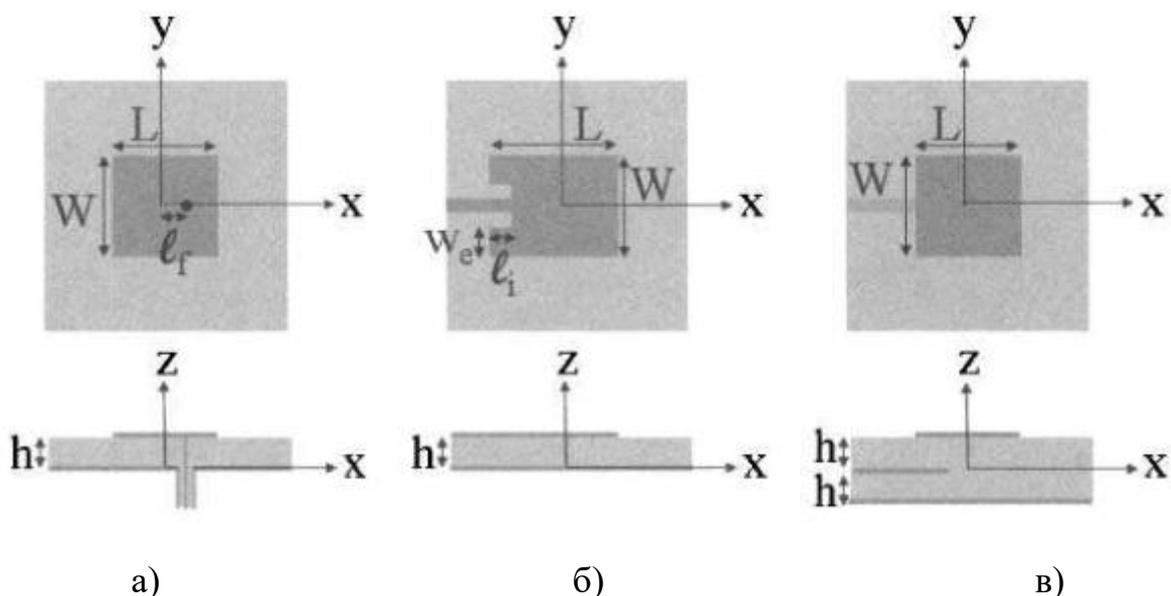


Рис. 4. Внешний вид и способы возбуждения печатных излучателей.

Размеры печатного излучателя определяются пор формулам:

$$W \approx 0.3\lambda_0, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eff} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + \frac{10h}{W}}}, \quad (2)$$

$$L \approx 0.49 \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_{eff}}}, \quad (3)$$

Диаграмма направленности печатного излучателя определяется по формулам:

$$E_\theta = \cos(\varphi) \cos\left(\frac{k_0 L}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi)\right) \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \sin(\theta) \sin(\varphi)\right)}{\frac{k_0 W}{2} \sin(\theta) \sin(\varphi)}, \quad (4)$$

$$E_\varphi = -\cos(\varphi) \sin(\varphi) \cos\left(\frac{k_0 L}{2} \sin(\theta) \cos(\varphi)\right) \frac{\sin\left(\frac{k_0 W}{2} \sin(\theta) \sin(\varphi)\right)}{\frac{k_0 W}{2} \sin(\theta) \sin(\varphi)}, \quad (5)$$

Коэффициент направленного действия находится по формуле:

$$D = \frac{2(k_0 W)^2}{\cos(k_0 W) - 2 + k_0 W \int_0^{k_0 W} \frac{\sin x}{x} dx + \frac{\sin(k_0 W)}{(k_0 W)}}, \quad (6)$$

В случае расположения печатных излучателей на прямой поверхности рис. 5, диаграмма направленности будет определяться по теореме перемножения по формуле:

$$\vec{E}_\Sigma(\theta, \varphi) = \frac{e^{-ikR}}{R} \vec{F}(\theta, \varphi) \sum_{n=1}^N \dot{I}_n(\varphi) e^{ik[x_n \cos\varphi \sin\theta + y_n \sin\theta \sin\varphi + z_n \cos\theta]}, \quad (7)$$

где $\dot{F}_n(\varphi)$ - диаграмма направленности одиночного печатного излучателя;

N - количество излучателей;

i - мнимая единица;

k - волновое число;

(x_n, y_n) - координаты n -го излучателя.

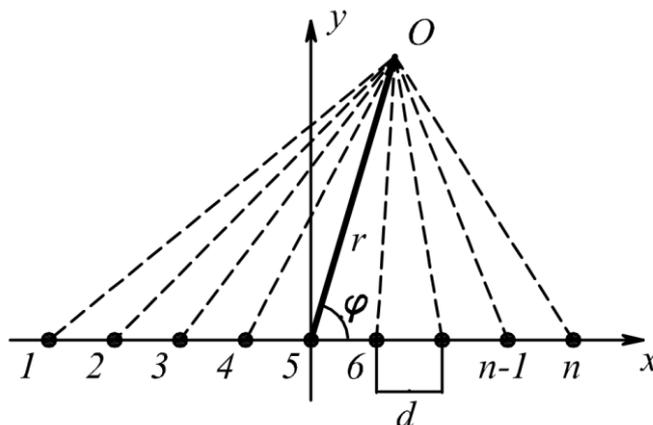


Рис.5. Равномерная антенная решётка.

Зададим уравнение сечения поверхности, на которой будут расположены излучатели.

$$y = Kx^2, \quad (8)$$

где K - коэффициент параболы, назовем его коэффициентом изгиба. При $K = 0$ парабола преобразуется в прямую линию $y = 0$.

С учетом изгиба поверхности, при расчёте диаграммы направленности необходимо учитывать ориентацию максимумов диаграмм направленности каждого печатного излучателя. Если в случае прямолинейного расположения все максимумы ориентированы в одном направлении, то в случае изгиба, каждый максимум повернут на определенный угол.

2. Расчет фазы излучателей

Поскольку излучатели располагаются не равномерно или на искривленной поверхности рис. 6, то необходимо ввести компенсирующую фазу ψ_n . Эта фаза необходима для обеспечения синфазного возбуждения

антенной решётки. Отсутствие учета компенсационных фаз равносильно введению квадратичной фазовой ошибки.

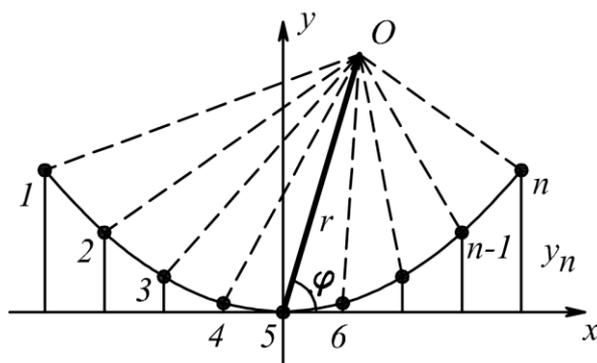


Рис.6. Конформная антенная решётка.

В общем случае изменение фазы в излучателях антенной решетки можно записать по формуле:

$$\psi = kdc\cos\varphi - \psi_0 \quad (9)$$

где k - волновое число;

d – расстояние между излучателями;

ψ_0 – начальная фаза.

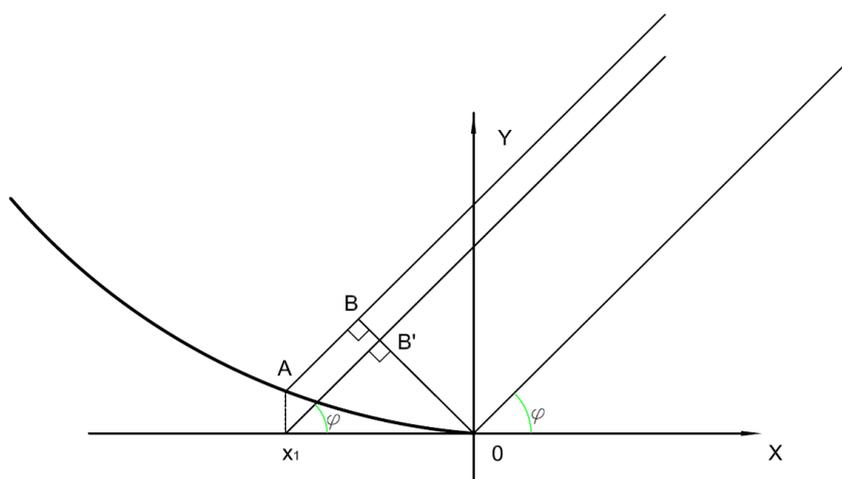


Рис.7. Ход лучей при излучении излучателями.

В случае конформной антенной решетки необходимо учитывать изгиб поверхности. Вычислим координаты излучателей на изогнутой поверхности антенны рис. 7. Для этого найдем координаты излучателя на поверхности в точке (x_1, y_1) если известна длина дуги равная $\frac{\lambda}{2}$.

$$\int_{x_0=0}^{x_1} \sqrt{1 + 4K^2 x^2} dx = \frac{\lambda}{2} \rightarrow 2K \int_{x_0=0}^{x_1} \sqrt{x^2 + \frac{1}{4K^2}} dx = \frac{\lambda}{2}. \quad (10)$$

Вычисляя интеграл, получим

$$2K \left[x \sqrt{x^2 + \frac{1}{4K^2}} + \frac{1}{4K^2} \ln \left| x + \sqrt{x^2 + \frac{1}{4K^2}} \right| \right] \Big|_{x_0=0}^{x_1} = \frac{\lambda}{2}. \quad (11)$$

Поскольку

$$x_1^2 \ll \frac{1}{4K^2}. \quad (12)$$

Тогда

$$2K \left[x_1 \frac{1}{2K} + \frac{1}{4K^2} \ln \left| x_1 + \frac{1}{2K} \right| - \frac{1}{4K^2} \ln \left| \frac{1}{2K} \right| \right] \approx \frac{\lambda}{2}. \quad (13)$$

Но

$$\frac{1}{2K} \gg x_1 \rightarrow x_1 + \frac{1}{2K} \approx \frac{1}{2K}. \quad (14)$$

В итоге получим

$$2K \left[x_1 \frac{1}{2K} + \frac{1}{4K^2} \ln \left| \frac{1}{2K} \right| - \frac{1}{4K^2} \ln \left| \frac{1}{2K} \right| \right] \approx \frac{\lambda}{2} \rightarrow x_1 \approx \frac{\lambda}{2}. \quad (15)$$

Получили, что для первого излучателя координаты на изогнутой поверхности будут равны $\left(\frac{\lambda}{2}, K \frac{\lambda^2}{4}\right)$. Аналогично можно показать, что при малых значениях $K \ll \frac{1}{\lambda}$ координаты расположения излучателей будут равны $x_1 \approx \frac{\lambda}{2}$, $x_2 \approx 2\frac{\lambda}{2}$, ..., $x_n \approx n\frac{\lambda}{2}$.

Вычислим AB - расстояние запаздывания между излучателем в центре и первым излучателем рис. 8, $AB = x_1 B' - x_1 A'$. Согласно формуле (15), длина $x_1 B' = \frac{\lambda}{2} \cos \varphi$. Длину $x_1 A'$ можно найти из треугольника $x_1 A A'$. Поскольку длина $x_1 A$ известна и равна $K \frac{\lambda^2}{4}$, получим, что $x_1 A' = K \frac{\lambda^2}{4} \sin \varphi$.

Тогда фазовый сдвиг для первого излучателя будет равен:

$$\psi_1 = kd_1 - \psi_0 = k \left(\frac{\lambda}{2} \cos \varphi - K \frac{\lambda^2}{4} \sin \varphi \right) - \psi_0. \quad (16)$$

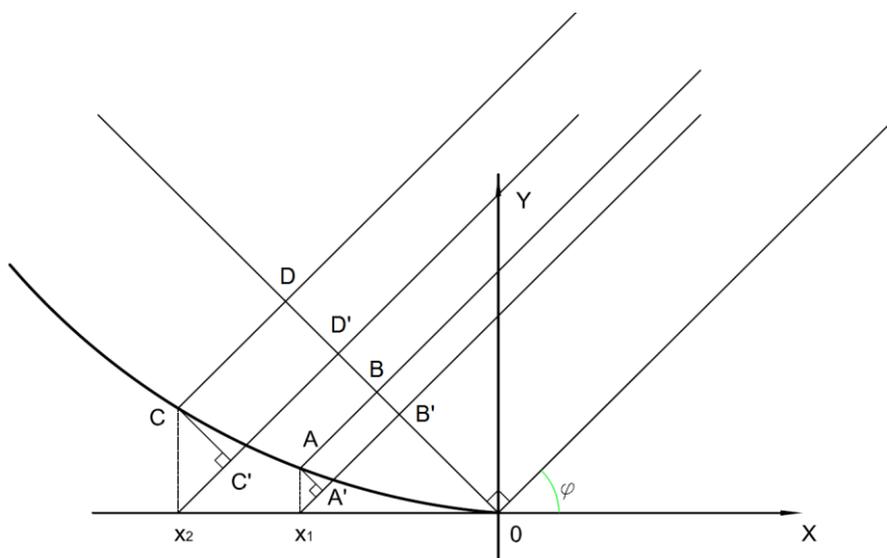


Рис.8. Фазовые сдвиги в антенне.

Рассчитаем аналогично расположение каждого излучателя на изогнутой поверхности и фазовый сдвиг для каждого излучателя с учетом кривизны поверхности. Для второго излучателя, получим

$$\psi_2 = kd_2 - \psi_0 = k(\lambda \cos \varphi - K \lambda^2 \sin \varphi) - \psi_0. \quad (17)$$

Для третьего излучателя получим

$$\psi_3 = kd_3 - \psi_0 = k \left(\frac{3\lambda}{2} \cos \varphi - K \frac{4\lambda^2}{9} \sin \varphi \right) - \psi_0. \quad (18)$$

Для n-го излучателя получим

$$\psi_n = kd_n - \psi_0 = k \left(\frac{\lambda n}{2} \cos \varphi - K \frac{(\lambda n)^2}{4} \sin \varphi \right) - \psi_0. \quad (19)$$

При $K = 0$ формула (19) преобразуется в (9).

В этом случае, диаграмма направленности будет вычисляться по формуле:

$$\vec{E}_\Sigma(\theta, \varphi) = \frac{e^{-ikR}}{R} \vec{F}(\theta, \varphi) \sum_{n=1}^N I_n(\varphi - \varphi_n) e^{ik[x_n \cos \varphi \sin \theta + y_n \sin \theta \sin \varphi + z_n \cos \theta] + i\psi_n}, \quad (20)$$

где φ_n - угол учитывающий поворот максимума диаграммы направленности печатного излучателя;

ψ_n - фаза обеспечивающая синфазное распределение в антенной решётке.

Компенсирующая фаза необходима, так как при изгибе поверхности излучатели не изменили своего положения по оси x, но изменилась координата

по оси y . Таким образом, получается, что расстояния между излучателями не равны, а значит, антенная решётка из эквидистантой стала неэквидистантной.

3. Моделирование

Рассмотрим модель плоской эквидистантной антенной решетки с излучающими элементами на основе печатных излучателей, представленных на рис.9. Зададим изгиб антенной плоскости в виде параболы. Поскольку длина решетки относительно размеров излучающего элемента велика, то даже небольшой изгиб приведет к уменьшению линейного размера решётки. Изгиб задается коэффициентом параболы. На рис. 10 и 11 представлена эта же антенная решётка, но с изгибом поверхности по параболе (конформная).

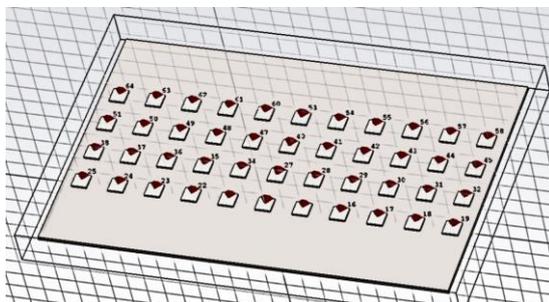


Рис. 9. Плоская антенная решётка с равномерным распределением печатных излучателей ($K = 0$).

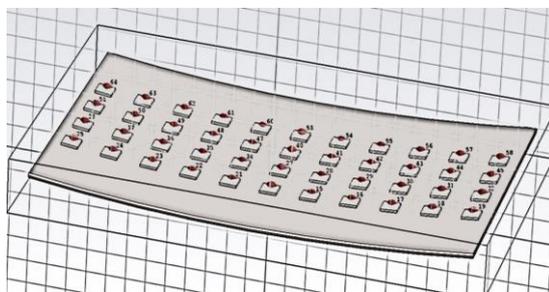


Рис. 10. Конформная антенная решётка с равномерным распределением печатных излучателей ($K = 0.0005$).

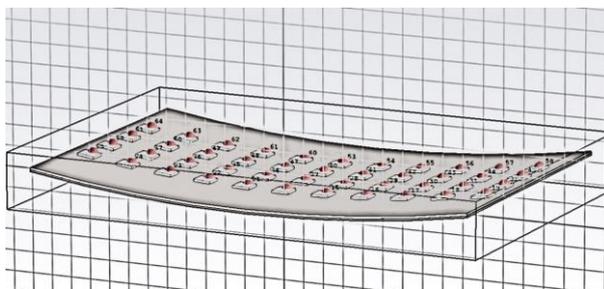


Рис. 11. Конформная антенная решётка с равномерным распределением печатных излучателей ($K = 0.00075$).

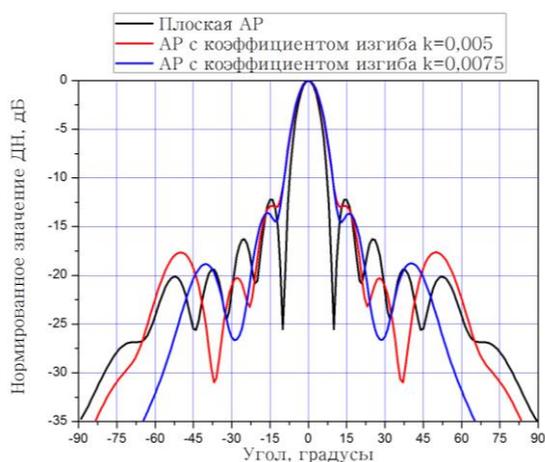


Рис. 12. Диаграмма направленности антенной решётки с различными коэффициентами изгиба.

Из рис. 12 видно, что при плоской поверхности ширина диаграммы составляет 9° , однако при увеличении кривизны поверхности до коэффициента изгиба равного $K = 0.00075$ ширина диаграммы направленности незначительно увеличивается до 10.7° .

Уровень боковых лепестков снизился с -12 дБ до -14.5 дБ. За счёт того, что поверхность изогнута только в одной плоскости, не будет возникать эффект кроссполяризации.

Поскольку печатные излучатели располагаются на вогнутой поверхности и максимумы диаграмм направленности ориентированы внутрь, то в этом случае усиливается влияние печатных излучателей друг на друга.

Заключение

В работе выполнены исследования по численному моделированию печатной конформной антенны в диапазоне 12-18 ГГц. Показано, что антенную

решётку можно располагать на поверхности изогнутой в виде параболы.

Вычислены фазовые сдвиги для каждого излучателя с учетом кривизны поверхности, на которой расположены излучатели. В случае если выполнено соотношение $K \ll \frac{1}{\lambda}$, где K – коэффициент кривизны параболы, то фазовый сдвиг для n -го излучателя равен:

$$\psi_n = k \left(\frac{\lambda n}{2} \cos \varphi - K \frac{(\lambda n)^2}{4} \sin \varphi \right) - \psi_0. \quad (21)$$

Проведено сравнение ДН плоской антенной решетки и конформной антенны с разным радиусом изгиба поверхности в диапазоне $K = 0 - 0.00075$. Из полученных результатов видно, что при изгибе поверхности антенной решетки, уменьшается уровень боковых лепестков снизился с -12 дБ до -14.5 дБ, увеличивается ширина главного лепестка с 9° до 10.7° .

Литература

1. Pandeewari R., Raghavan S. Microstrip antenna with complementary split ring resonator loaded ground plane for gain enhancement. (2015) *Microwave and Optical Technology Letters*. 2015. Vol.57. No.2. P.292-296. <https://doi.org/10.1002/mop.28835>.
2. Abdullin R.R., Mitelman Y.E., Shabunin S.N. Radiation pattern of leaky-wave antenna based on partially-filled rectangular waveguide. *2014 Loughborough Antennas and Propagation Conference, (LAPC 2014)*. Article № 6996438. P.516-518. <https://doi.org/10.1109/LAPC.2014.6996438>.
3. Shabunin S.N., Chechetkin V.A., Klygach D.S., Ershov A.V., Vakhitov M.G., Dumchev V.A., Dumchev I.A. Non-equidistant antenna array with low level of side lobes. *6th International Conference on Communications and Electronics, IEEE ICCE 2016*. Article № 7562641. P.230-233. <https://doi.org/10.1109/CCE.2016.7562641>.
4. Yinusa K.A., Elmarissi W., Caizzone S., Dreher A. A multi-band conformal antenna array for GNSS applic. *2016 IEEE Antennas and Propagation Society*

International Symposium, APSURSI 2016. Article № 7696157. P.897-89.
<https://doi.org/10.1109/APS.2016.7696157>.

5. Haupt Randy L. *Antenna arrays: a computational approach*. Wiley-IEEE Press. 2010. 534 p.
6. *UHF radar carried by airship*. The University Pierre et Marie Curie Paris 6, 2008.
7. Josefsson L., Persson P. *Conformal Array Antenna Theory and Design*. Wiley-IEEE Press. 2006. 496 p. <https://doi.org/10.1002/047178012X>.

Для цитирования:

Вахитов М.Г., Клыгач Д.С. Моделирование конформной антенной решётки для беспилотного летательного аппарата. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №3. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.3.7>