

СИНТЕЗ КВАДРИФИЛЯРНОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СТАНЦИЙ АЭРОЛОГИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

М. А. Кудряшов, О. А. Белоусов, А. Ю. Дмитриевцев, М. М. Кириупин

*Кафедра «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»,
maximkudryashov969@gmail.com; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: аэрологический локатор; аэрологическое зондирование; квадрифилярная спиральная антенна; радиолокационная станция; феноменологическая модель.

Аннотация: Рассмотрены основные аспекты синтеза квадрифилярного излучателя. Аргументирован выбор излучателя и показана его математическая модель. Обосновано применение метода феноменологических моделей. Проведено компьютерное моделирование двух моделей квадрифилярного излучателя в комплексе электродинамического моделирования и приведены получившиеся электродинамические характеристики. Дано сравнение двух феноменологических моделей и мотивировано их применение в составе антенной решетки, используемой в комплексах станций аэрологического радиомониторинга.

В настоящее время существуют различные системы аэрологического зондирования, такие как МАРЛ-А, АВК-1, AIR-3А-RT2, RT-20, МРЗ-3АТ, обладающие следующими характеристиками: рабочая частота – 1680 МГц, 1790 МГц; тип излучающих систем: зеркальная, пассивная антенная решетка (АР), адаптивная фазированная антенная решетка (АФАР) [1].

Данные комплексы достаточно громоздки, обладают рядом недостатков, таких как малое количество ведения радиозондов (до 5 целей одновременно), небольшая дальность сопровождения зонда (до 20...40 км), невозможность быстрого управления лучом, в горизонтальной плоскости $\pm 180^\circ$ при скорости 30...40 рад/с, а в вертикальной плоскости от -30 до $+140^\circ$ при скорости 20 рад/с. Ключевым элементом всех аэрологических локаторов является антенная система (АР). От ее характеристик существенным образом зависит качество функционирования таких комплексов в целом. Поэтому для решения поставленной задачи необходимо разработать антенные системы, которые лишены указанных выше недостатков. К таким системам можно отнести следующие АР: адаптивные, фазированные, адаптивные фазированные и использующие алгоритмы управления на базе искусственного интеллекта. Одним из важных этапов разработки АР является выбор или синтез нового излучателя. Для решения задач аэрологического мониторинга наиболее оптимальным образом подходят излучатели на основе замедляющих структур, в частности спиральные излучатели [2]. Все многообразие спиральных излучателей может быть сведено к двум основным типам: классиче-

ские и квадрифилярные [3]. Последние по сравнению с традиционными спиральными антеннами обладают лучшими характеристиками, такими как электродинамические и массо-габаритные.

Для решения поставленной задачи проведем синтез квадрифилярной спиральной антенны (КСА) в диапазоне 1678 МГц, который входит в состав в качестве элемента интеллектуальной фазированной антенной решетки.

Квадрифилярный спиральный излучатель представляет собой антенную систему, состоящую из четырех излучателей, сдвинутых друг относительно друга на 90° , каждый из которых представляет собой металлический проводник, изогнутый вдоль спиральной линии. На основании данной антенны имеются элементы питания, которые возбуждают излучатели. Напряжение на элементах питания антенны формируется с помощью специальной схемы питания [3].

Для того чтобы данная антенна излучала с круговой поляризацией, напряжения должны формироваться с одинаковыми амплитудами, но сдвинуты по фазе относительно друг друга на 90° . На рисунке 1 показана модель простейшей КСА, образованной ленточными проводниками. Такие КСА имеют свободные параметры, к которым можно отнести угол намотки α и диаметр D . Чтобы управлять характеристиками излучения антенны, такими как диаграмма направленности (ДН) и коэффициент эллиптичности, достаточно менять данные параметры. К свободным параметрам также можно отнести диаметр проводника d , если он имеет круглую форму сечения, либо ширину w , когда в качестве проводника используется металлическая лента, однако данные параметры не столь существенно влияют на характеристики квадрифилярного спирального излучателя, вследствие чего их можно не брать во внимание.

Для дальнейшего синтеза излучателя необходимо определить его электродинамические и геометрические характеристики.

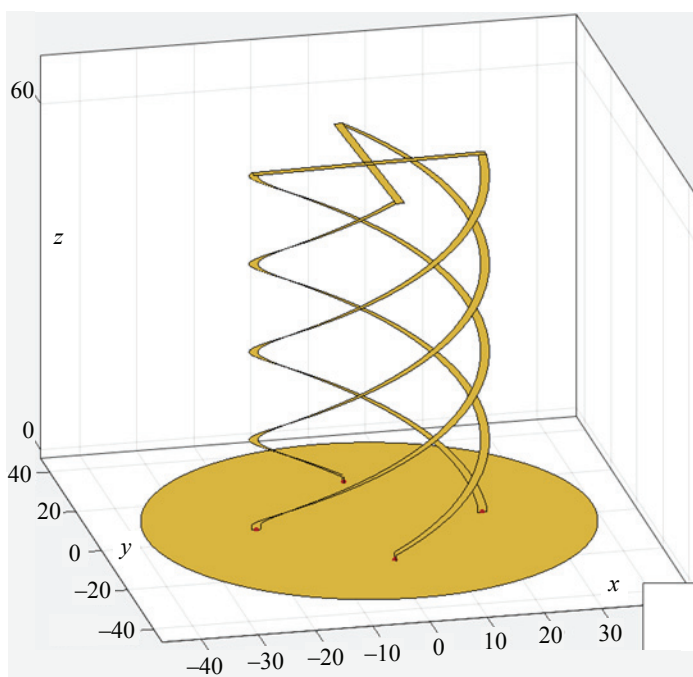


Рис. 1. Модель КСА в программном пакете MATLAB

Коэффициент поляризации можно определить, используя следующее выражение:

$$P = \sqrt{\frac{m^2 \cos^2 \vartheta - m \sin 2\vartheta \cos \tau + \sin^2 \vartheta}{m^2 \sin^2 \vartheta + m \sin 2\vartheta \cos \tau + \cos^2 \vartheta}}, \quad (1)$$

где $m = |E_\varphi|/|E_\theta|$, $\tau = \arg E_\varphi - \arg E_\theta$, $\operatorname{tg} 2\vartheta = \cos 2m/(1 - m^2)$; ϑ – угол преимущественной поляризации.

Далее описаны фазовые характеристики излучателя. Под данным термином подразумевается величина

$$\Phi(\theta, \varphi) = \Psi(0, 0) - \Psi(0, \varphi), \quad (2)$$

где $\Psi(0, 0)$, $\Psi(0, \varphi)$ – фазы поля спирали соответственно в точке с координатами $R_0, 0, 0$ и в некоторой точке дальней зоны, имеющей координаты R_0, θ, φ .

Если рассматривать фазовую характеристику с учетом только одной резонирующей гармоники, получим:

$$\begin{aligned} \Phi(\theta, \varphi) &\approx [y_0(\theta) - y_0(0)] \pi N + \varphi + \Phi_0(\theta); \\ \Phi(\theta, \varphi) &\approx [y_0(\theta) - y_0(0)] \pi N + \varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

при этом

$$\Phi_0(\theta) = \operatorname{arctg}[2 \operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \theta J_1(ka \sin \theta) / J_0(ka \sin \theta)], \quad (4)$$

где J_0 – функция Бесселя нулевого порядка; k – волновое число свободного пространства; a – радиус спирали.

Тогда, зная, что $y_0(\theta) = [\beta \alpha - ka \cos \theta] \operatorname{tg} \alpha$, из (3) получим следующее:

$$\begin{aligned} \Phi(\theta, \varphi) &\approx \frac{kL_z(1 - \cos \theta)}{2} + \varphi + \Phi_0; \\ \Phi(\theta, \varphi) &\approx \frac{kL_z(1 - \cos \theta)}{2} + \varphi, \end{aligned} \quad (5)$$

где L_z – осевая длина излучателя.

Выражение (5) описывает изменение фазы поля на сфере с центром в начале координат, что фактически является точкой возбуждения излучателя. Следуя вышеизложенному выводу, получается, что $\Phi(\theta, \varphi)$ показывает зависимость начальной фазы тока на входе спирали от направления на источник электромагнитного поля. Выражение (5) позволяет проанализировать зависимость фазы на входе спирали от углов θ, φ от геометрических параметров спирали и длины волны.

Коэффициент направленного действия для целого числа витков N можно представить следующим выражением [4]:

$$D = \frac{8[y_0^2(0) + 1] \sin^2[\pi N y_0(0)] \operatorname{katg} \alpha}{[y_0^2(0) - 1]^2 J_0^2(ka \sin 60^\circ) [y_0^2(60^\circ) + 0,25] B \pi N}, \quad (6)$$

где $B = \left\{ \operatorname{Si} \left[2\pi N x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) \right] - \sin^2 \left[\pi N x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) \right] / \pi N x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) \right\}$; $x_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) = y_0 \left(\frac{\pi}{2} \right) - 1$.

Входное сопротивление для целого количества N описывается выражением

$$R_{\text{вх}} \approx \frac{240(kr)^2 \sin^2[\pi N y_0(0)] \left(\frac{J_0}{J_{\text{вх}}} \right)^2}{D [y_0^2(0) - 1]^2}, \quad (7)$$

Для получения результирующей ДН применим следующий прием. Представим данный излучатель в виде плоской прямолинейной эквидистантной равноамплитудной АР, так как используются четыре идентичных спиральных излучателя на одинаковом расстоянии друг от друга. Таким образом, с помощью теоремы перемножения и используя соответствующий множитель АР, получим искомую диаграмму направленности

$$F(\theta, \varphi) = f_1(\theta, \varphi) f_c(\theta, \varphi), \quad (8)$$

где $f_1(\theta, \varphi)$ – результирующая ДН одного излучателя; $f_c(\theta, \varphi)$ – множитель АР.

Векторная ДН излучателя имеет вид

$$f_1(\theta, \varphi) = J_0(ka \sin \theta) \cos \theta. \quad (9)$$

Для определения множителя АР примем N_x и N_y за число излучателей в столбцах и рядах соответственно; D_x и D_y за расстояние между соседними излучателями соответственно по осям OX и OY ; θ_x и θ_y являются углами, отсчитываемыми от точки наблюдения от осей OX и OY соответственно. Затем примем каждый столбец излучателей за линейную АР, множитель которой можно записать в виде

$$F_{Cx}(\theta_x) = \frac{\sin \left[\frac{N_x}{2} (kd_x \cos \theta_x - \alpha_x) \right]}{N_x \sin \left[\frac{1}{2} (kd_x \cos \theta_x - \alpha_x) \right]}. \quad (10)$$

В таком случае, проведя эквивалентную замену каждого столбца плоской АР на излучатель с собственной ДН, получим линейную АР, которая будет ориентирована вдоль оси OY . Затем, воспользовавшись теоремой о перемножении ДН, имеем

$$F_C(\theta_x, \theta_y) = F_O(\theta_x) F_{Cy}(\theta_y), \quad (11)$$

где $F_O(\theta_x)$ – ДН излучателя; $F_{Cy}(\theta_y)$ – множитель АР, состоящей из излучателей. В таком случае $F_{Cy}(\theta_y)$ имеет вид

$$F_{Cy}(\theta_y) = \frac{\sin \left[\frac{N_y}{2} (kd_y \cos \theta_y - \alpha_y) \right]}{N_y \sin \left[\frac{1}{2} (kd_y \cos \theta_y - \alpha_y) \right]}. \quad (12)$$

Далее введем обозначение обобщенных угловых координат:

$$U_x = kd_x \cos \theta_x - \alpha_x; \quad U_y = kd_y \cos \theta_y - \alpha_y. \quad (13)$$

Подставив (13) в (10) и (12), определим множитель плоской АР

$$F_C(U_x, U_y) = \frac{\sin \left(\frac{N_x}{2} U_x \right) \sin \left(\frac{N_y}{2} U_y \right)}{N_x \sin \left(\frac{1}{2} U_x \right) N_y \sin \left(\frac{1}{2} U_y \right)}. \quad (14)$$

Однако необходимо учитывать то, что множитель АР в сферической системе координат не является функцией углов θ_x и θ_y . В таком случае необходимо определить связь между углами θ_x и θ_y ; θ и φ . Если учесть, что $\cos\theta_x$ и $\cos\theta_y$ являются проекциями единичного вектора \vec{e}_0 , который ориентирован в направлении осей OX и OY , то получим

$$e_x^0 = \sin\theta_x; e_y^0 = \sin\theta_y. \quad (15)$$

Учитывая взаимосвязь между сферической и прямоугольной системами координат, можно выразить проекции единичного вектора \vec{e}_0 через углы θ и φ :

$$e_x^0 = \sin\theta \cos\varphi; e_y^0 = \sin\theta \sin\varphi. \quad (16)$$

Получим выражение для множителя АР в сферической системе координат

$$F_C(\theta, \varphi) = \frac{\sin\left(\frac{N_x}{2} kd_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x\right) \sin\left(\frac{N_y}{2} kd_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y\right)}{N_x \sin\left(\frac{1}{2}(kd_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x)\right) N_y \sin\left(\frac{1}{2}(kd_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y)\right)}. \quad (17)$$

Определив множитель АР и подставив выражения (16) и (17) в выражение (8), получаем результирующую диаграмму направленности квадрифилярного спирального излучателя [5, 6]

$$F(\theta, \varphi) = (J_0(ka \sin\theta) \cos\theta) \frac{\sin\left(\frac{N_x}{2} kd_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x\right) \sin\left(\frac{N_y}{2} kd_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y\right)}{N_x \sin\left(\frac{1}{2}(kd_x \sin\theta \cos\varphi - \alpha_x)\right) N_y \sin\left(\frac{1}{2}(kd_y \sin\theta \sin\varphi - \alpha_y)\right)}. \quad (18)$$

Полученная ДН для данного излучателя позволяет судить о достаточной линейности его основных электродинамических характеристик. Для получения основных характеристик данной излучающей структуры будем использовать метод, который основан на построении феноменологических моделей. Он позволяет достаточно оперативно определить параметры вновь синтезируемой антенной структуры и провести анализ ее характеристик, дает возможность синтезировать сложные антенные системы и комплексы без использования методов натурального моделирования и построения физических моделей, так как данный подход показывает максимально приближенные к реальной физической модели результаты, в которых расхождение с физической моделью составляет менее 5%. В свою очередь, благодаря использованию предлагаемого метода, можно оперативно синтезировать антенные структуры, которые будут иметь хорошую повторяемость и линейность электродинамических характеристик при трансформации феноменологических моделей в физические. На основе вышеизложенного подхода будет синтезирована и АР для комплекса метеорологического обеспечения [7].

Для более вариативной выборки синтезировано несколько моделей квадрифилярных излучателей.

Используя выражения (1) – (18), построим феноменологическую модель в программном продукте электродинамического моделирования [8] (рис. 2).

Построим основные электродинамические характеристики данного излучателя: ДН в полярной и декартовой системе координат, коэффициент усиления (**КУ**), коэффициент отражения (**КО**), коэффициент стоячей волны (**КСВ**), волновое сопротивление (рис. 3 – 5).

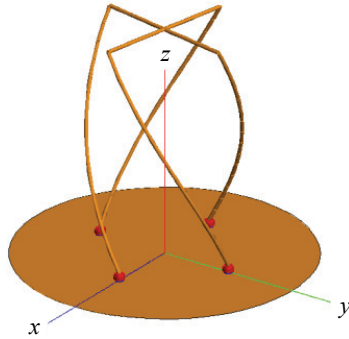


Рис. 2. 3D-модель замкнутой четвертьволновой КСА в программной среде Altair FEKO

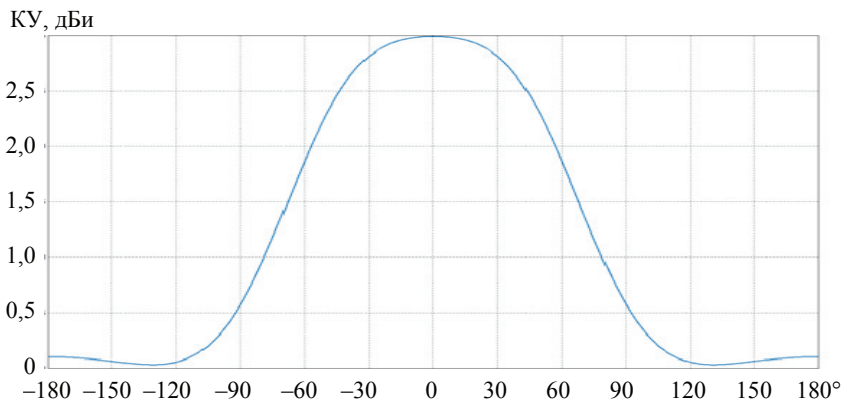


Рис. 3. Диаграмма направленности замкнутой четвертьволновой КСА в декартовой системе координат

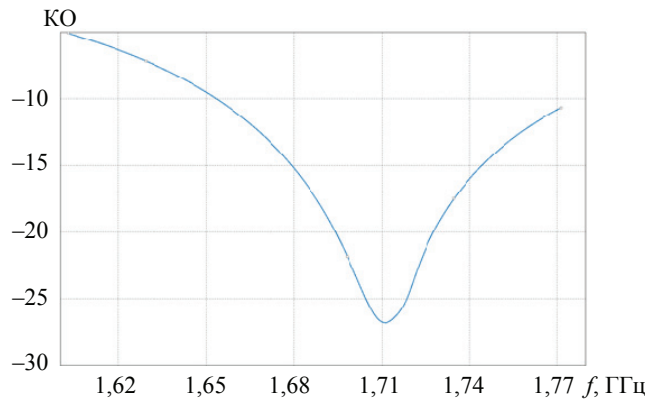


Рис. 4. Коэффициент отражения замкнутой четвертьволновой КСА

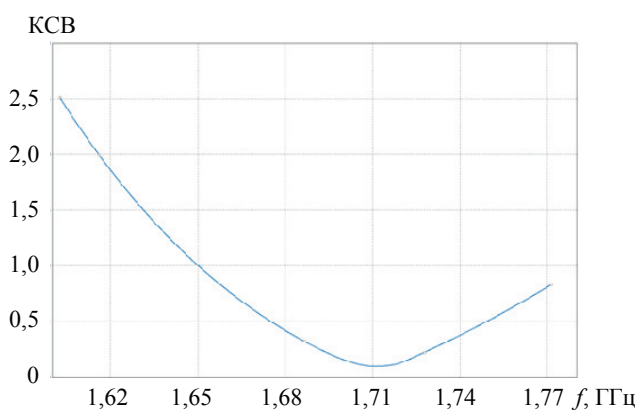


Рис. 5. Коэффициент стоячей волны замкнутой четвертьволновой КСА

Рассмотрим другой тип излучателя, 3D-модель которого представлена в виде разомкнутой КСА (рис. 6). Для данного типа излучателя основные характеристики приведены на рис. 7, 8.

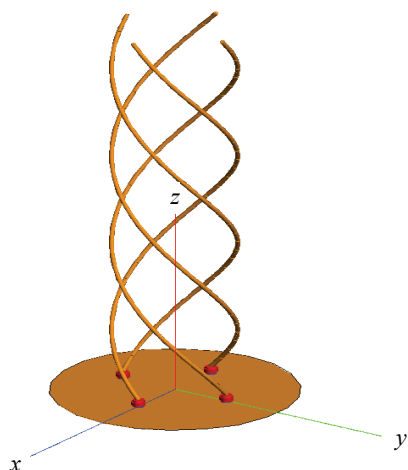


Рис. 6. 3D-модель разомкнутой КСА

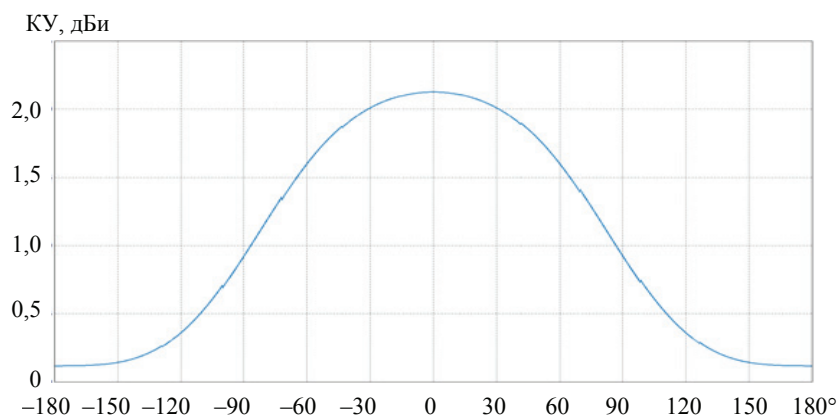


Рис. 7. Диаграмма направленности КСА в декартовой системе координат

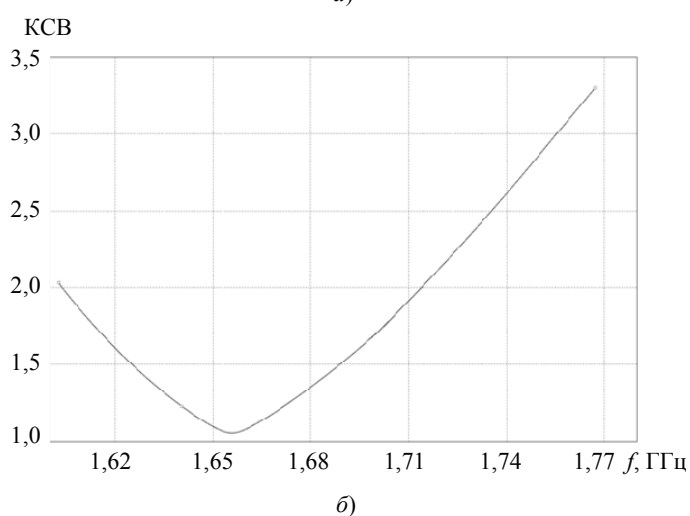
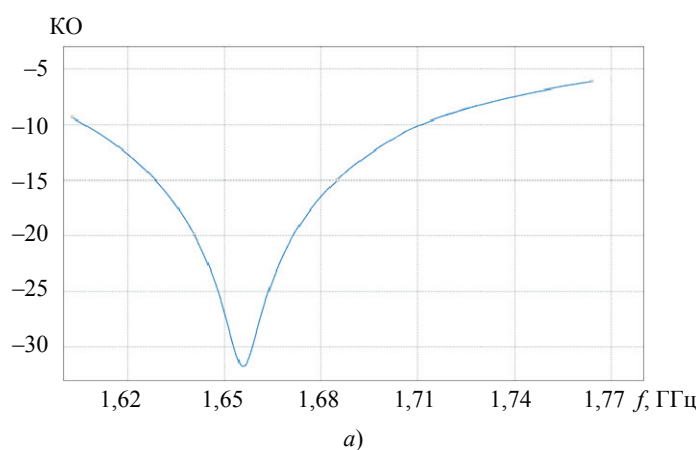


Рис. 8. Коэффициенты отражения (а) и стоячей волны (б) разомкнутой КСА

Сравнив показатели электродинамических характеристик (на центральной частоте) смоделированных излучателей, отметим, что оба имеют хорошую направленность, обладают симметрией поворота и являются взаимными, так как не содержат невзаимных сред, имеют достаточно выраженный главный лепесток, с практически отсутствующими боковыми лепестками (табл. 1).

Таблица 1

Сравнение электродинамических характеристик КСА

Показатель	КСА	
	замкнутая	разомкнутая
Коэффициенты:		
усиления, дБи	3	2,8
стоячей волны	1,4	1,7
отражения, дБ	-20	-15
Волновое сопротивление, Ом	40	50

Результаты проведенного синтеза замедляющих электродинамических структур, таких как квадрифилярные замкнутая и разомкнутая антенны, могут использоваться в качестве элементов интеллектуальной фазированной АР [9, 10].

Использование рассмотренных типов излучателей позволит существенным образом минимизировать такие отрицательные показатели, как малое количество ведения радиозондов, небольшая дальность сопровождения зонда и невозможность быстрого управления лучом, и расширить функциональные возможности систем температурно-ветрового радиозондирования атмосферы при аэрологических наблюдениях.

Список литературы

1. Обеспечить научное сопровождение промышленного производства и ввода в эксплуатацию нового аэрологического комплекса МАРЛ-А. – Текст : электронный / А. В. Кочин, А. С. Азаров, А. С. Дубовецкий, Р. В. Лесков // Отчет о научно-исследовательской работе – 2004. – 35 с. – URL : http://cao-ntcr.mipt.ru/MARL_comp1.htm (дата обращения 18.01.2021).
2. Синтез цилиндрической фазированной антенной решетки на основе логопериодических вибраторных антенн для систем широкополосного доступа стандарта IEEE802.11, IEEE802.16 / О. А. Белоусов, Р. Ю. Курносков, П. А. Горшков, А. Г. Рязанова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 266 – 272. doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.266-272
3. Юрцев, О. А. Спиральные антенны / О. А. Юрцев, А. В. Рунов, А. Н. Казарин. – М. : Сов. радио, 1974. – 224 с.
4. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток : учеб. пособие / Под ред. Д. И. Воскресенский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Радиотехника, 2012. – 744 с.
5. Антенны : учеб. пособие / Ю. Т. Зырянов, П. А. Федюнин, О. А. Белоусов [и др.]. – 4-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2020. – 412 с.
6. Фрадин, А. З. Антенно-фидерные устройства / А. З. Фрадин. – М. : Связь, 1977. – 440 с.
7. A Broadband Folded Printed Quadrifilar Helical Antenna Employing a Novel Compact Planar Feeding Circuit / M. Caillet, M. Clnet, A. Sharaiha, Y. M. M. Antar // Transactions on Antennas and Propagation. – 2010. – Vol. 58, No. 7. – P. 2203 – 2209.
8. Printed Quadrifilar Helix Antenna with Integrated Feed Network / F. Shiqiang, F. Shao-jun, L. Kai, W. Zhong-bao // Microwave Antenna Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications : Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium, 27 – 29 October 2009, Beijing, China. – IEEE, 2009. – P. 67 – 69.
9. Shcherbyna, O. Quadrifilar Helical Antennas with Different Types of Supply Lines / O. Shcherbyna, O. Tomai, O. Kozhokhina // Proceedings of the Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO 2018), 15–16 November 2018, Riga, Latvia. – IEEE, 2018. – P. 167 – 170.
10. Letestu, Y. Multiband Printed Quadrifilar Helical Antenna / Y. Letestu, A. Sharaiha // Electronics Letters. – 2010. – Vol. 46, Issue 13. – P. 885–886.

Synthesis of a Square Radiator for Aerological Sensing Radar Stations

M. A. Kudryashov, O. A. Belousov, A. Yu. Dmitrievtsev, M. M. Kiryupin

*Department of Design of radio-electronic and microprocessor systems,
maximkudryashov969@gmail.com; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: aerological locator; aerological sounding; quadrifilar helical antenna; radar station; phenomenological model.

Abstract: The main aspects of the synthesis of a quadrifilar radiator are considered. The choice of the emitter is explained and its mathematical model is presented. The application of the method of phenomenological models has been substantiated. Computer simulation of two models of a quadrifilar radiator in the complex of electrodynamic modeling is carried out and the resulting electrodynamic characteristics are given. A comparison of two phenomenological models is given and their application as part of an antenna array used in complexes of aerological radio monitoring stations is grounded.

References

1. http://cao-ntcr.mipt.ru/MARL_comp1.htm (accessed 18 January 2021).
2. Belousov O.A., Kurnosov R.Yu., Gorshkov P.A., Ryazanova A.G. [Synthesis of a cylindrical phased antenna array based on logo-periodic dipole antennas for broadband access systems of the IEE802.11, IEE802.16 standards], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 266-272, doi: 10.17277/vestnik.2015.02.pp.266-272 (In Russ., abstract in Eng.)
3. Yurtsev O.A., Runov A.V., Kazarin A.N. *Spiral'nyye anteny* [Spiral antennas], Moscow: Sovetskoye radio, 1974, 224 p. (In Russ.)
4. Voskresenskiy D.I. [Ed.] *Ustroystva SVCH i anteny. Proyektirovaniye fazirovannykh antenykh reshetok: uchebnoye posobiye* [Microwave devices and antennas. Design of phased antenna arrays: textbook], Moscow: Radiotekhnika, 2012, 744 p. (In Russ.)
5. Zyryanov Yu.T., Fedyunin P.A., Belousov O.A. [et al.] *Anteny: uchebnoye posobiye* [Antennas: a tutorial], St. Petersburg: Lan', 2020, 412 p. (In Russ.)
6. Fradin A.Z. *Antenno-fidernyye ustroystva* [Antenna-feeder devices], Moscow: Svyaz', 1977, 440 p. (In Russ.)
7. Caillet M., Clnet M., Sharaiha A., Antar Y.M.M. A Broadband Folded Printed Quadrifilar Helical Antenna Employing a Novel Compact Planar Feeding Circuit, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, vol. 58, no. 7, pp. 2203-2209.
8. Shiqiang F., Shao-jun F., Kai L., Zhong-bao W. Microwave Antenna Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Proceedings of the 3rd IEEE International Symposium, 27 - 29 October, 2009, Beijing, China, IEEE, 2009, pp. 67-69.
9. Shcherbyna O., Tomai O., Kozhokhina O. Quadrifilar Helical Antennas with Different Types of Supply Lines, Proceedings of the Advances in Wireless and Optical Communications (RTUWO 2018), 15-16 November, 2018, Riga, Latvia, IEEE, 2018, pp. 167-170.
10. Letestu Y., Sharaiha A. Multiband Printed Quadrifilar Helical Antenna, *Electronics Letters*, 2010, vol. 46, issue 13, pp. 885-886.

Synthese des quadrifilaren Strahlers für Radarstationen der aerologischen Sondierung

Zusammenfassung: Es sind die Hauptaspekte der Synthese eines Quadrifilar-senders betrachtet. Die Wahl des Senders ist argumentiert und sein mathematisches Modell ist vorgestellt. Die Anwendung der Methode phänomenologischer Modelle ist begründet. Es ist die Computersimulation von zwei Modellen des quadrifilaren Strahlers im Komplex der elektrodynamischen Modellierung durchgeführt und die daraus

resultierenden elektrodynamischen Charakteristiken sind gegeben. Es ist der Vergleich zweier phänomenologischer Modelle gegeben und ihre Anwendung als Teil eines Antennenarrays motiviert, das in Komplexen aerologischer Funkmessstationen verwendet wird.

Synthèse d'un émetteur quadrifilaire pour les stations radar de la détection aérologique

Résumé: Sont examinés les principaux aspects de la synthèse de l'émetteur quadrifilaire. Est argumenté le choix de l'émetteur; est présenté son modèle mathématique. Est justifiée l'application de la méthode des modèles phénoménologiques. Sont présentés deux modèles de radiateurs quadrifilaires dans le complexe de la simulation électrodynamique; sont citées les caractéristiques électrodynamiques obtenues. Est donnée la comparaison de deux modèles phénoménologiques; est motivée leur application dans le réseau d'antennes utilisé dans les complexes des stations de radiomonite aérologique.

Авторы: *Кудряшов Максим Артурович* – магистрант; *Белосов Олег Андреевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем»; *Дмитриевцев Андрей Юрьевич* – магистрант; *Кирюпин Михаил Михайлович* – аспирант кафедры «Конструирование радиоэлектронных и микропроцессорных систем», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Иванов Александр Васильевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.