

ISSN 2500-316X (Online)

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2020-8-6-54-62>



УДК 621.396.677

Выбор расположения излучателей в неэквидистантной антенной решетке

Н.М. Легкий[@],
Н.В. Михеев

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: legki@mirea.ru

Антенны являются одним из основных элементов радиотехнических систем. Фазированные антенные решетки (ФАР), позволяющие регулировать направление излучения благодаря возможности управления фазами или разностями фаз излучаемого сигнала, являются наиболее эффективными типами антенн. Размер, конструкция и форма ФАР зависят от решаемых задач, типа излучателей и характера их расположения. В статье рассматривается преобразование эквидистантной ФАР в неэквидистантную решетку с заданным минимальным расстоянием между излучателями с целью уменьшения уровня боковых лепестков и подавления дифракционных максимумов. Приведены модель неэквидистантной антенной решетки и расчетные формулы для ее анализа. Представленная в работе методика, основанная на итерационных методах вычислений, дает возможность выбрать основные параметры неэквидистантной ФАР с учетом связей, образующихся между соседними излучающими элементами. Расчет координат расположения элементов излучателей неэквидистантной ФАР осуществлен в программе на языке MATLAB. При этом реализован метод поиска оптимального расположения излучателей относительно друг друга, при котором диаграмма направленности антенной решетки будет иметь минимальный уровень дифракционных максимумов и требуемый уровень боковых лепестков. По результатам выполнения программы получены координаты новой неэквидистантной ФАР. Смоделированная по результатам расчета неэквидистантная фазированная антенная решетка показала полное отсутствие дифракционных максимумов в отличие от эквидистантной решетки, но при этом не удалось в достаточной мере получить требуемый уровень боковых лепестков. Приведенные для сравнения расчетные диаграммы направленности антенн показали преимущества неэквидистантной антенной решетки.

Ключевые слова: фазированная антенная решетка, неэквидистантная антенная решетка, диаграмма направленности, синтез антенной решетки, минимаксный уровень боковых лепестков, оптимизация конструкции антенны.

Для цитирования: Легкий Н.М., Михеев Н.В. Выбор расположения излучателей в неэквидистантной антенной решетке. *Российский технологический журнал*. 2020;8(6):54-62. <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-54-62>

Selection of location of radiators in a non-equivalent antenna array

Nikolay M. Legkiy[@],
Nikolay V. Mikheev

MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia
[@]Corresponding author, e-mail: legki@mirea.ru

Antennas are one of the main elements of radio engineering systems. Phased antenna arrays (PAR), which make it possible to regulate the direction of radiation due to the ability to control the phases or phase differences of the emitted signal, are the most effective types of antennas. The size, design and shape of the PAR depend on the tasks to be solved, the type of emitters and the nature of their location. The article discusses the transformation of an equidistant PAR into a non-equidistant antenna array in order to reduce the level of side lobes and suppress diffraction maxima with a given minimum distance between the emitters. A model of a non-equidistant antenna array and calculation formulas for its analysis are presented. The method presented in the work based on iterative calculation methods makes it possible to select the main parameters of a non-equidistant PAR taking into account the bonds formed between neighboring radiating elements. The coordinates of the emitter elements of the non-equidistant PAR were calculated in a program using the MATLAB language. At the same time, a method was implemented to search for the optimal arrangement of emitters relative to each other, in which the directional pattern of the antenna array will have a minimum level of diffraction maxima and the required level of side lobes. According to the results of the program execution, the coordinates of the new non-equidistant PAR were obtained. The non-equidistant phased array antenna simulated according to the calculation results showed a complete absence of diffraction maxima, in contrast to the equidistant array, but it was not possible to sufficiently obtain the required level of side lobes. The calculated antenna radiation patterns presented for comparison showed the advantages of a non-equidistant antenna array.

Keywords: phased antenna array, non-equidistant antenna array, directional pattern, antenna array synthesis, minimax side lobe level, antenna design optimization.

For citation: Legkiy N.V., Mikheev N.V. Selection of location of radiators in a non-equivalent antenna array. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2020;8(6):54-62 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2020-8-6-54-62>

Введение

Возможность формирования луча с необходимой диаграммой направленности в фазированных антенных решетках (ФАР) в режиме реального времени является неоспоримым преимуществом данного типа антенн.

Различают два типа фазированных антенных решеток: с эквидистантным (равномерным) и неэквидистантным (неравномерным) расположением излучателей в поле антенны. Антенная решетка (АР) первого типа используется наиболее часто. Но некоторые недостатки таких решеток и желание улучшить характеристики АР привели к созданию и применению неэквидистантных антенных решеток. Использование АР с неравномерно расположенными излучателями позволяет решать задачи, не решаемые классическими эквидистантными АР.

Преимущества неэквидистантных антенных решеток:

- наличие только одного основного лепестка АР, что позволяет сконцентрировать энергию излучения в нужном направлении;
- уменьшение уровня боковых лепестков, что приводит к уменьшению вероятности появления ложных целей;
- уменьшение числа излучателей, и как следствие, уменьшение массы и стоимости антенны.

Качественное выполнение своих задач неэквидистантными антенными решетками полностью зависит от результатов расчета координат излучателей.

Постановка задачи

Рассмотрим формирование неэквидистантной антенной решетки на примере линейной АР с восемью изотропными излучателями (рис. 1) и расстоянием между ними d_i ($i = 1, 2, \dots, 7$), причем $d_i \neq d_{i\pm 1}$.

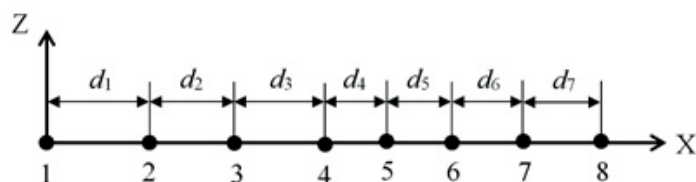


Рис. 1. Модель неэквидистантной антенной решетки.

Необходимо рассчитать d_i для $i = 1, 2, \dots, 7$, чтобы максимально возможно снизить уровни боковых лепестков и подавить дифракционные максимумы антенной решетки.

Методы исследования

Подходы к моделированию неэквидистантных антенных решеток рассмотрены в работах [3–17]. Как правило, разработка АР с заданными или специальными характеристиками направленности требует использования алгоритмов параметрического синтеза [8, 17].

Падающая электромагнитная (ЭМ) волна распространяется через передающую антенную решетку длиной $l = \sum_{i=1}^7 d_i$, составленную из $n = 8$ излучателей с периодичностью p_n . Фазу излучаемого сигнала γ_n в направлении с углом отклонения θ от основного лепестка, можно представить как

$$\gamma_n = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot p \cdot n \cdot \sin \theta = k_0 \cdot p \cdot n \cdot \sin \theta, \quad (1)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число.

Следовательно, фаза сигнала α_n в излучателе n может быть определена с помощью формулы

$$\alpha_n = -\gamma_n + \alpha_1 + 2\pi \cdot i, \quad i = 1, 2, \dots, 7, \quad (2)$$

где α_1 – фаза ЭМ волны на первом излучателе.

Направление θ излучаемой волны определяется как функция разности фаз η между смежными излучателями элементов

$$\begin{aligned} \eta = \alpha_n - \alpha_{n-1} = \gamma_n + \gamma_{n-1} &= -k_0 \cdot p \cdot n \cdot \sin \theta + k_0 \cdot p \cdot (n-1) \cdot \sin \theta = \\ &= -k_0 \cdot p \cdot \sin \theta. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, изменяя фазу сигнала каждого излучателя на определенный угол, можно направить ЭМ волну в нужном направлении относительно нормали конструкции:

$$\eta = -k_0 \cdot p \cdot \sin \theta \Rightarrow \theta = -\sin^{-1} \left(\eta \cdot \frac{\lambda}{2\pi \cdot p} \right). \quad (4)$$

Рассмотрим задачу уменьшения уровней мощности бокового излучения.

Необходимо найти ряд d_i для i от 1 до 7, при котором диаграмма направленности (ДН) антенной решетки будет иметь требуемый уровень боковых лепестков $\zeta_{\text{бок}}$.

Известно [1, 2], что у системы с оптимальной ДН существует максимально возможное число равных по уровню боковых лепестков. В случае эквидистантной (симметричной) фазированной антенной решетки (ФАР), имеющей n излучателей, диаграмма направленности описывается следующим образом:

$$F_n \left(\frac{u}{I_n}, x_n \right) = \sum I_n \cdot \sin(x_n \cdot u),$$

где $x_n = 2d/\lambda$, $\sin(x_n \cdot u)$ – направление боковых лепестков.

Найдем оптимальное расположение излучателей для неэквидистантной антенной решетки с числом элементов $n = 8$ и заданным уровнем боковых лепестков. Для решения этой задачи будем использовать метод вариации параметров в программе на языке MATLAB.

Для этого берем произвольную эквидистантную линейную решетку с 8 излучателями и рассчитываем диаграмму направленности с N боковыми лепестками, у которых разные уровни ζ_i .

Задаем приращения координат и токов излучателей:

$$x_n \rightarrow x_n + \Delta x; \quad I_n \rightarrow I_n + \Delta I. \quad (5)$$

Следует отметить, что чем меньше приращение, тем точнее определяется координата, но вместе с тем увеличивается время обработки.

При изменении координат и токов излучателей изменятся также уровни боковых лепестков:

$$u_i \rightarrow u_i + \Delta u; \quad \zeta_i \rightarrow \zeta_i + \Delta \zeta.$$

Приращения определяются с помощью системы дифференциальных уравнений. Если параметры диаграммы направленности еще далеки от необходимых параметров, то процедура (5) повторяется до тех пор, пока уровень боковых лепестков максимально не приблизится к заданным значениям. В результате получим координаты x_n излучателей, при которых будет достигнут требуемый уровень боковых лепестков.

Предложенная и реализованная методика не учитывает взаимное влияние между соседними излучателями. Это влияние можно минимизировать, если ввести ограничения на расстояние между излучателями:

$$d_{n+1} - d_n \geq \frac{\lambda}{2}. \quad (6)$$

Рассмотрим процесс ослабления дифракционных лепестков при реализации данного метода. Сигналы двух соседних излучателей синфазно складываются сразу в нескольких направлениях θ_M , для которых справедливо равенство

$$k \cdot d \cdot \sin \theta_M - \Delta\Phi = 2\pi \cdot M, \quad M = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

где M – номер дифракционного лепестка; $\Delta\Phi$ – фазовый сдвиг между соседними излучателями; $k \cdot d \cdot \sin \theta_M$ – разность хода.

Углы максимального излучения θ_m можно найти из уравнения

$$\sin \theta_m = \frac{2\pi \cdot M + \Delta\Phi}{k \cdot d} = \frac{2\pi \cdot M}{k \cdot d} + \zeta = \frac{M \cdot \lambda}{d} + \zeta.$$

При изменении шага плоской антенной решетки d/λ направление основного максимума $\theta_0 = \arccos \xi = \frac{\Delta\Phi}{k \cdot d}$ всегда остается постоянным, направления побочных лепестков θ_M изменяются. Задав случайный шаг АР, изменяя величину фазового сдвига $\Delta\Phi$ так, чтобы уровень боковых лепестков ζ оставался неизменным, получаем различные направления дифракционных максимумов для соседних пар излучателей, что приведет к значительному уменьшению побочных лепестков по всей зоне видимости. Если при расчетах d_i придерживаться неравенства (6), то другие характеристики антенной решетки не ухудшатся. Для наиболее эффективного размещения излучателей симметричной АР можно привести расчет с нарастанием расстояния между излучателями в арифметической прогрессии:

$$d_i = d_1 \left(1 + (i-1) \frac{p_n - 1}{n-1} \right),$$

где $p_n = \frac{d_n}{d_1}$ – периодичность антенной решетки.

Определим оптимальный вариант конструкции антенной решетки для подавления дифракционных лепестков.

При отклонении луча на максимальный угол θ_m велика вероятность появления дополнительного максимума ДН. Введем еще одно ограничение на расстояние между излучателями d :

$$\frac{d_i}{\lambda} \leq \frac{n-1}{n} \cdot \frac{1}{1 + |\sin \theta_m|}.$$

Согласно [17], расстояние между излучателями в антенной решетке не должно превышать $\lambda/2$, но вместе с тем элементы АР, исходя из конструктивных особенностей, не могут располагаться относительно друг друга ближе d_{min} . Это расстояние проверяется на каждом шаге расчета антенной решетки.

Результаты исследования

Для решения задачи в качестве алгоритма используем метод перебора. Программа, реализованная на языке MATLAB, определяет координаты излучателей, удовлетворяющих заданной точности. В результате ее выполнения получаем координаты излучателей в антенной решетке, при которых формируемая ДН имеет наименьшее отклонение от необходимой. Таким образом, методом случайного поиска подбирается расположение элемента, при котором будет обеспечено подавление дифракционных максимумов. Однако в данной программе не учитывается межэлементное взаимное влияние.

Результат выполнения программы приведен на рис. 2, где указаны координаты антенных элементов при оптимальном расположении.

Xtop =							
Columns 1 through 8							
0	0.0590	0.1100	0.1970	0.2410	0.3300	0.4100	0.4820

Рис. 2. Результат выполнения программы.

Для наглядной оценки полученных результатов сравним ДН рассчитанной антенной решетки и ДН эквидистантной ФАР. На рис. 3 представлена ДН неэквидистантной антенной решетки с рассчитанным расположением антенных элементов, а на рис. 4 – ДН ФАР с равномерным расположением элементов.

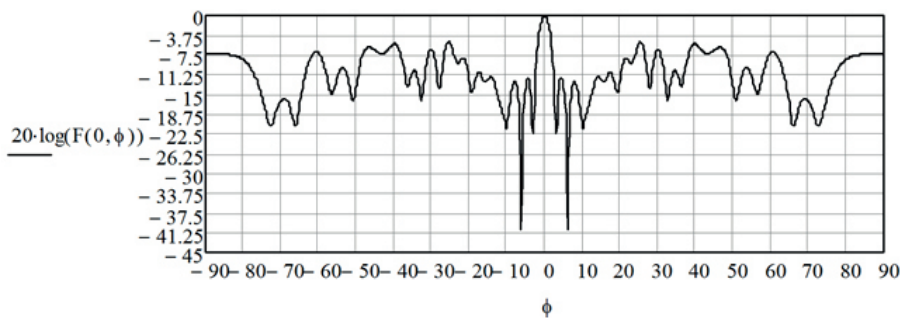


Рис. 3. ДН с рассчитанным расположением антенных элементов.

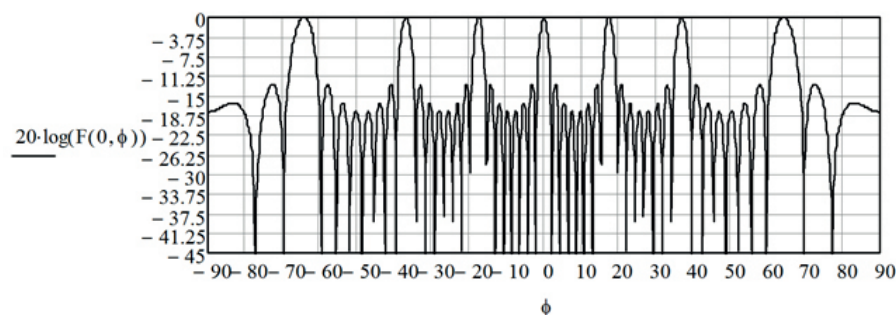


Рис. 4. ДН с эквидистантным расположением антенных элементов.

Как видно из графиков, в рассчитанной неэквидистантной антенной решетке можно полностью избавиться от дифракционных максимумов, появляющихся в эквидистантной решетке через каждые 20° , но уровень боковых лепестков недостаточно низкий. Это можно объяснить тем, что из-за физических размеров антенные элементы невозможно расположить ближе друг к другу.

Заключение

Предложенная в работе методика, основанная на итерационных методах вычислений, дает возможность выбрать основные параметры неэквидистантной ФАР с учетом образующихся между соседними излучающими элементами связей. Данная методика расчета неэквидистантной антенной решетки на языке MATLAB, в отличие от большинства имеющихся на рынке программных продуктов, достаточно проста и не требует дополнительного изучения сложных программ. Кроме того, реализация метода на языке MATLAB позволяет использовать результаты вычисления для дальнейшего расчета в других программах без дополнительного преобразования данных, что дает возможность проведения сквозной автоматизации расчетов всей системы.

Таким образом, рассмотренный подход позволяет совмещать преимущества точного моделирования отдельных СВЧ-систем ФАР в специализированных программах с программами, использующими собственные алгоритмы расчета характеристик ФАР. Полученная по предложенному методу модель антенной решетки хорошо коррелируется с результатами, полученными в других программах.

Литература:

1. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. М.: Техносфера, 2012. 560 с. ISBN 978-5-94836-323-3
2. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток, под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2012. 744 с. ISBN 978-5-88070-311-1
3. Гончаров В.А. Синтез антенных решеток со стабильной диаграммой направленности применительно к задачам обнаружения. Материалы Международной научно-технической конференции «INTERMATIC – 2012», часть 5, 3–7 декабря 2012 г. М.: МИРЭА. С. 182-187.
4. Федосеева Е.В., Тарасов А.А. Исследование метода синтеза неэквидистантной равноамплитудной антенной решетки. *Радиотехнические и телекоммуникационные системы*. 2011;3:4-8.
5. Анпилогов В., Эйдус А. Неэквидистантная антенная решетка с низким уровнем боковых лепестков. *Технологии и средства связи*. 2017;2(119):40-43.
6. Жуков В.Б. Синтез неэквидистантной гидроакустической антенной решетки. *Гидроакустика*. 2016;28(4):5-9.
7. Березин А.В., Виноградов А.Д., Михин А.Ю., Никитенко Е.П. Способы построения и параметры широкодиапазонных пеленгаторных неэквидистантных линейных антенных решеток. *Антенны*. 2018;5(249):21-30.
8. Кирпичева И.А. Уменьшение уровня бокового излучения в равноамплитудных антенных решетках при сохранении направленных свойств. В сборнике: Физико-математическое моделирование систем. Материалы XVIII Международного семинара. Часть 2. 2018. С. 54-59.
9. Костин М.С., Латышев К.В., Марков Д.В. Мобильный комплекс радиолокационного мониторинга на синхронизированной системе БПЛА. В сборнике: Радиолокация и связь – перспективные технологии. Материалы XVI Всероссийской молодежной научно-технической конференции. 2018. С. 32-37.
10. Тюбаев А.Н., Маничев А.О. Эффективные методы расширения луча неэквидистантной спиральной фазированной антенной решетки. *Антенны*. 2013;1(188):051-056.
11. Останков А.В., Кирпичёва И.А. Оптимизация направленных свойств линейных неэквидистантных антенных решеток. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2013;9(4):8-11
12. Останков А.В., Антипов С.А., Сахаров Ю.С. Минимаксный уровень бокового излучения равноамплитудной неэквидистантной антенной решетки. *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2013;9(6-3):10-12.

13. Шкодина А.П. Применение методов углового сверхразрешения в неэквидистантной линейной антенной решетке пассивного радиолокатора. *Молодежный научно-технический вестник*. 2014;10:1.
URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/737417.html>
14. Шипилов С.Э., Сатаров Р.Н., Якубов В.П., Цепляев И.С., Юрченко А.В. Планарная неэквидистантная тактированная сверхширокополосная антенная решетка для радиотомографии. *Контроль. Диагностика*. 2013;13:45-49.
15. Lutsenko V.I., Popov I.V., Lutsenko I.V., Luo Y., Mazurenko A.V. Nonequidistant two-dimensional antenna arrays are based on magic squares. In: 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW): Proc. Kharkov, Ukraine, 21–24 June 2016.
<https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538080>
16. Shabunin S., Chechetkin V.A., Klygach D., Ershov A. Non-equidistant antenna array with low level of side lobes. In: 2016 IEEE 6th International Conference on Communications and Electronics (ICCE). *IEEE ICCE* 2016. P. 230-233.
<https://doi.org/10.1109/CCE.2016.7562641>
17. Skiena S.S. The Algorithm design manual. Springer Publishing Company; 2008. 752 p.

References:

1. Hansen R.S. *Fazirovannyye antennyye reshetki* (Phased antenna arrays). Moscow: Tekhnosfera; 2012. 560 p. (in Russ.). ISBN 978-5-94836-323-3
[Hansen R.S. Phased antenna arrays. New York: Wiley; 2009. 550 p.]
2. *Ustroystva SVCh i anteny. Proektirovaniye fazirovannykh antennnykh reshetok* (Microwave devices and antennas. Design of phased antenna arrays, ed. D.I. Voskresensky. Moscow: Radiotekhnika; 2012. 744 p. (in Russ.). ISBN 978-5-88070-311-1
3. Goncharov V.A. Synthesis of antenna arrays with a stable directional diagram for detection problems. In: Proc. of the International Scientific and Technical Conference «INTERMATIC–2012», part 5, 3 - 7 December 2012. Moscow: MIREA Publishing House. P. 182-187 (in Russ.).
4. Fedoseeva E.V., Tarasov A.A. Research of a method of synthesis unequally spaced and with identical amplitude antenna arrays. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye system = Radio and telecommunication systems*. 2011;3:4-8 (in Russ.).
5. Anpilogov V., Eidus A. A non-equidistant antenna array with a low level of side lobes. *Tekhnologii i sredstva svyazi = Communication technologies & equipment*. 2017;2(119):40-43 (in Russ.).
6. Zhukov V.B. Synthesis of tapered sonar array. *Gidroakustika = Hydroacoustics*. 2016;28(4):5-9 (in Russ.).
7. Berezin A.V., Vinogradov A.D., Mikhin A.Yu., Nikitenko E.P. Methods of construction and parameters of wideband direction finding density tapered liner antenna array. *Antenny = Antennas*. 2018;5(249):21-30 (in Russ.).
8. Kirpicheva I.A. Decrease of side radiation level in equally amplitude antenna array direction characteristics. In: Physical and mathematical modeling of systems. Proc. of the XVIII International Seminar. V. 2. 2018. P. 54-59 (in Russ.).
9. Kostin M.S., Latyshev K.V., Markov D.V. Mobile complex for radar monitoring on a synchronized UAV system. In: Radar and communication – promising technologies. Proc. of the XVI All-Russian youth scientific and technical conference. 2018. P. 32-37 (in Russ.).
10. Tyuvaev A.N., Manichev A.O. Effective methods of beam expansion to a non-equidistant spiral phased antenna array. *Antenny = Antennas*. 2013;1(188):051-056 (in Russ.).
11. Ostankov A.V., Kirpicheva I.A. Optimization of directional properties of linear non-equidistant antenna arrays. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = The Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2013;9(4):8-11 (in Russ.).
12. Ostankov A.V., Antipov S.A., Sakharov Yu.S. Minimax level of side radiation of the non-equidistant antenna array with the uniform amplitude distribution. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = The Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2013;9(6-3):10-12 (in Russ.).
13. Shkodina A.P. Application of angular superresolution methods in a non-equidistant linear antenna array of a passive radar. *Molodezhnyi nauchno-tehnicheskii vestnik*. 2014;10:1 (in Russ.).
URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/737417.html>
14. Shipilov S.E., Satarov R.N., Yakubov V.P., Tsepilyaev I.S., Yurchenko A.V. Planar non-equidistant UWB clocked liner antenna array for radio tomography. *Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics*. 2013;13:45-49 (in Russ.).
15. Lutsenko V.I., Popov I.V., Lutsenko I.V., Luo Y., Mazurenko A.V. Nonequidistant two-dimensional antenna arrays are based on magic squares. In: 2016 9th International Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW): Proc. Kharkov, Ukraine, 21–24 June 2016.
<https://doi.org/10.1109/MSMW.2016.7538080>
16. Shabunin S., Chechetkin V.A., Klygach D., Ershov A. Non-equidistant antenna array with low level of side lobes. In: 2016 IEEE 6th International Conference on Communications and Electronics (ICCE). *IEEE ICCE* 2016. P. 230-233.
<https://doi.org/10.1109/CCE.2016.7562641>
17. Skiena S.S. The Algorithm design manual. Springer Publishing Company; 2008. 752 p.

Об авторах:

Легкий Николай Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной экологии техносферы Института радиотехнических и телекоммуникационных ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). Scopus AuthorId 56178415900. <https://orcid.org/0000-0003-1242-5113>

Михеев Николай Владимирович, аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов экологии Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

About the authors:

Nikolay M. Legkiy, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Environmental Engineering, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia). Scopus AuthorId 56178415900. <https://orcid.org/0000-0003-1242-5113>

Nikolay V. Mikheev, Postgraduate Student, Department of Radio-Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo Pr., Moscow, 119454, Russia).

Поступила: 18.12.2019; получена после доработки: 12.08.2020; принята к опубликованию: 12.09.2020.