

Научная статья

УДК 621.396.677.3

DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-49-57



Синтез диаграмм направленности антенных решеток для больших углов сканирования с использованием генетического алгоритма

✉ Виктория Викторовна Дмитриева, dmitrieva.vv@sut.ru

✉ Константин Олегович Коровин, korovin.ko@sut.ru

✉ Алексей Николаевич Ликонцев, Likontsev.an@sut.ru

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

Аннотация: В настоящее время в большинстве современных систем связи, например, в современных спутниковых терминалах предполагается применение антенн со сканирующим лучом, т. е. антенных решеток. При этом при больших углах сканирования сильно возрастает уровень боковых лепестков (УБЛ) и наблюдается уменьшение коэффициента усиления (КУ). В этой связи возникает задача отыскания процедуры синтеза амплитудно-фазового распределения (АФР) с низким уровнем боковых лепестков и высоким КУ при больших углах сканирования. Одним из способов уменьшения боковых лепестков и компенсации снижения КУ является синтез оптимального (по максимуму КУ и минимуму УБЛ) АФР, с использованием оптимизационных алгоритмов. При этом учет характеристик диаграммы направленности (ДН) излучателей решетки приводит к необходимости численного электродинамического расчета. Целью работы является разработка процедуры синтеза АФР с низким УБЛ для линейных и прямоугольных антенных решеток при различных, в том числе больших углах сканирования и компенсации снижения КУ с использованием генетического алгоритма и численного электродинамического расчета. Методами исследования характеристик антенных излучателей является численное электродинамическое моделирование методом конечных элементов в системе автоматизированного проектирования Ansys HFSS и оптимизация АФР для заданной ДН методом случайного поиска с использованием парциальных диаграмм излучателей. Элементами новизны является комбинация точного электродинамического расчета излучателей антенных решеток и оптимизационного поиска АФР для синтеза требуемой ДН с использованием парциальных диаграмм. В результате разработана процедура синтеза АФР линейной и плоской эквидистантной (на примере 8- и 64-элементных) антенных решеток с учетом точных электродинамических характеристик излучателей и их взаимного влияния. С использованием генетического алгоритма при различных углах сканирования найдены АФР на излучателях, для которых получены ДН решетки с учетом влияния соседних элементов. Проанализировано изменение УБЛ и КУ антенной решетки при различных углах сканирования с использованием различных АФР. Предложенный алгоритм позволяет синтезировать АФР с низким УБЛ ДН и высоким КУ при углах отклонения главного лепестка до 40° для линейной антенной решетки и до 80° в случае плоской антенной решетки. Результаты данной работы актуальны в задачах синтеза ДН, так как предложенное решение обеспечивает существенный выигрыш в скорости синтеза АФР ДН линейной и прямоугольной антенных решеток, особенно для систем с большим числом излучателей. При этом удается сохранить высокий КУ при больших углах сканирования, и добиться существенного снижения УБЛ.

Ключевые слова: диаграмма направленности, коэффициент усиления, генетический алгоритм, уровень боковых лепестков, амплитудно-фазовое распределение

Ссылка для цитирования: Дмитриева В.В., Коровин К.О., Ликонцев А.Н. Синтез диаграмм направленности антенных решеток для больших углов сканирования с использованием генетического алгоритма // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 1. С. 49–57. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-49-57. EDN:TWQNDY

Synthesis of Antenna Array Radiation Pattern at Large Scanning Angles Using Genetic Algorithm

Victoria Dmitrieva, dmitrieva.vv@sut.ru
Konstantin Korovin, korovin.ko@sut.ru
Aleksy Likontsev, Likontsev.an@sut.ru

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

Abstract: At present, in most modern communication systems, for example, in modern satellite terminals, the use of scanning beam antennas, i. e. antenna arrays is assumed. At the same time, at large scanning angles, the side lobe level (SLL) increases strongly and decrease in the gain is observed. In this regard, the problem of finding a procedure for synthesizing an amplitude-phase distribution (APD) with low SLL and high gain (G) at large scanning angles comes up. One of the ways to reduce SLL and compensate for the decrease in G is to synthesize the optimal APD (in terms of the maximum G and minimum SLL) using optimization algorithms. At the same time, taking into account the characteristics of the radiation pattern of the array emitters requires numerical electrodynamic calculation. The goal of this paper is to develop a procedure for the synthesis of APD with low SLL for linear and rectangular antenna arrays at various, including large, scanning angles and compensation for G reduction using a genetic algorithm and numerical electrodynamic calculation. The methods for studying the characteristics of antenna radiators are numerical electrodynamic modeling by the finite element method (FEM) in Ansys HFSS computer-aided design system and optimization of the APD for a given radiation pattern (RP) by a random search method using partial diagrams of antenna elements. The novelty is the combination of accurate numerical electrodynamic calculation of the RP of antenna elements and optimization search for APD for the synthesis of the required RP using partial diagrams. As a result, a procedure for APD synthesis of linear and uniform rectangular equidistant (for example, 8- and 64-element) antenna arrays has been developed, taking into account the exact electrodynamic characteristics of antenna elements and their mutual resistance. Radiation patterns were obtained taking into account the effect of neighboring elements, with the help of which, using a genetic algorithm, APDs on emitters were found at different scanning angles. The change in SLL and G of the antenna array is analyzed at different scanning angles using different APDs. The proposed algorithm allows to synthesize APD for a RP with low SLL and high G at scanning angles up to 40° for linear antenna array and up to 80° in the case of a uniform rectangular antenna array. The results of this work are relevant in the problems of radiation pattern synthesis, since the proposed solution provides a significant gain in the radiation pattern synthesis rate of APD of linear and rectangular antenna arrays, especially for systems with a large number of antenna elements. At the same time, it is possible to maintain a high G at large scanning angles, and achieve a significant reduction of SLL.

Keywords: radiation pattern, gain, genetic algorithm, sidelobe level, amplitude-phase distribution

For citation: Dmitrieva V., Korovin K., Likontsev A. Synthesis of Antenna Array Radiation Pattern at Large Scanning Angles Using Genetic Algorithm. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2024;10(1):49–57. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-49-57. EDN:TWQNDY

В настоящее время антенные решетки находят все большее применение в технике связи, радиолокации и навигации. Необходимость синтеза диаграмм направленности (ДН) фазированных антенных решеток с низким уровнем боковых лепестков (УБЛ) при больших углах сканирования обусловлена их использованием во многих современных системах связи, например, спутниковых терминалах. При больших углах сканирования возникает несколько проблем: резко растет уровень боковых лепестков ДН и уменьшается коэффициент усиления (КУ) [1]. Одним из методов решения данной проблемы является применение различных спосо-

бов синтеза амплитудно-фазового распределения (АФР) с использованием алгоритмов оптимизации. В последнее время для оптимизации параметров и характеристик антенных решеток используется большое количество алгоритмов, основанных на биологических процессах, таких как рой частиц, генетический алгоритм (ГА) и их модификации [2–3].

В работе [4] предложен метод уменьшения боковых лепестков при помощи использования разреженных линейных антенных решеток. Как правило, разреженная решетка получается при помощи удаления случайно выбранных элементов. Для

уменьшения УБЛ авторы разработали итерационный алгоритм, позволяющий минимизировать количество удаленных элементов. В случае ограниченного размера решетки применение разреженных решеток не является оптимальным, так как приводит к уменьшению КУ решетки.

В этой связи вызывают интерес оптимизационные методы, позволяющие получить компромисс между КУ и УБЛ. Особый интерес при разработке геометрии размещения элементов решетки представляет собой группа ГА. Например, в работе [5] авторы описали метод создания апероидических линейных фазированных антенных решеток с применением ГА для уменьшения бокового излучения с изменением угла поворота. Данный метод позволяет эффективно рассчитать конструкцию антенной решетки.

В [6] описана задача проектирования неоднородных круглых антенных решеток для снижения УБЛ при ограничении фиксированной ширины ДН. При помощи оптимизации с использованием ГА определяется оптимальный набор весов и разнесения антенных элементов, обеспечивающих ДН с максимальным снижением УБЛ при ограниченной ширине основного лепестка ДН антенной решетки.

В рассмотренных работах применяют оптимизационные алгоритмы для создания эффективной конструкции антенных решеток. В представленной работе описан метод синтеза АФР с применением генетического алгоритма. Наиболее часто алгоритмы синтеза ДН исследуются для линейных решеток [7–9]. В данной работе произведен анализ линейной и плоской антенных решеток и оценка изменения УБЛ при различных углах сканирования. Приведено сравнение коэффициентов направленного действия (КНД), КУ и УБЛ для двух АФР: равноамплитудном и полученным при помощи ГА. Для учета особенностей ДН излучателей антенной решетки произведено моделирование излучателя и расчет ДН в составе решетки в программе HFSS с учетом влияния соседних элементов. Далее, на основе парциальной ДН одиночного элемента построены линейная и прямоугольная антенные решетки.

Следует отметить, что при отклонении луча меняются входные сопротивления элементов, что может приводить к значительным искажениям ДН антенной решетки, вплоть до появления эффектов «ослепления». Однако в представленной методике финальный вычисление синтезированной ДН производится при помощи точного электродинамического расчета, то позволяет обнаружить наличие таких эффектов и устранить их введением паразитных элементов.

Моделирование излучателей антенной решетки

Одиночный элемент антенной системы (рисунок 1) представляет собой микрополосковую

антенну, состоящую из прямоугольной печатной антенны (патча) и подложки, верхняя часть которой состоит из материала prepreg R-5670 ($\epsilon_r = 3,38$), а нижняя – из Rogers RO4003 ($\epsilon_r = 3,55$). Такая антенна имеет круговую поляризацию за счет двух питающих коаксиальных кабелей с разницей фаз 90°. Волновое сопротивление питающих портов 50 Ом, рабочая частота 29,75 ГГц. При проектировании антенной решетки расстояние между излучателями выбрано минимально возможным, равным 0,5λ, так как при большом межэлементном расстоянии могут появиться дополнительные дифракционные максимумы при сканировании [10].

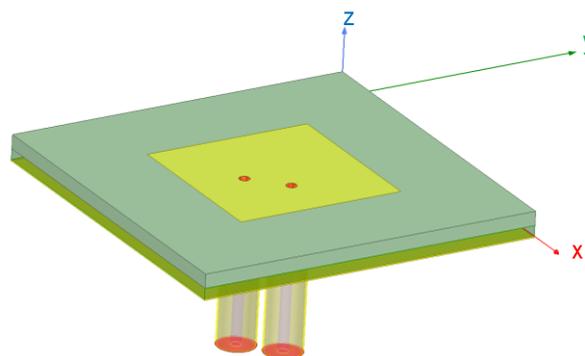


Рис. 1. Микрополосковый одиночный излучатель
Fig. 1. Microstrip Antenna

Наличие взаимных связей соседних элементов антенной решетки негативно сказывается на направленных свойствах антенны и приводит к увеличению боковых лепестков ДН. Поэтому для оценки реальной ДН необходимо учитывать их влияние. Найдем ДН одиночного элемента с учетом влияния соседних элементов для случая линейной антенной решетки, состоящей из 8 элементов и прямоугольной, размерностью 8×8. Для этого задается один активный элемент антенной решетки, а соседние элементы являются подключены к согласованным нагрузкам [11].

ДН антенной решетки в дальней зоне излучателей можно найти как произведение ДН одиночного излучателя на множитель решетки [12]:

$$F(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi) \left| \sum_{n=1}^W A_n e^{ikR_n \cos\theta} \right|, \quad (1)$$

где $F_1(\theta, \varphi)$ – ДН излучателя; A_n – комплексная амплитуда; R_n – расстояние до точки наблюдения.

Получим ДН одиночного излучателя с учетом влияния соседних элементов (рисунок 2) для линейной и прямоугольной антенных решеток, имеющие КНД 5,8 и 6,3 дБ, соответственно. Полученные результаты программы HFSS перенесем в ПО Matlab с целью дальнейшего анализа ДН антенной решетки для различных углов сканирования.

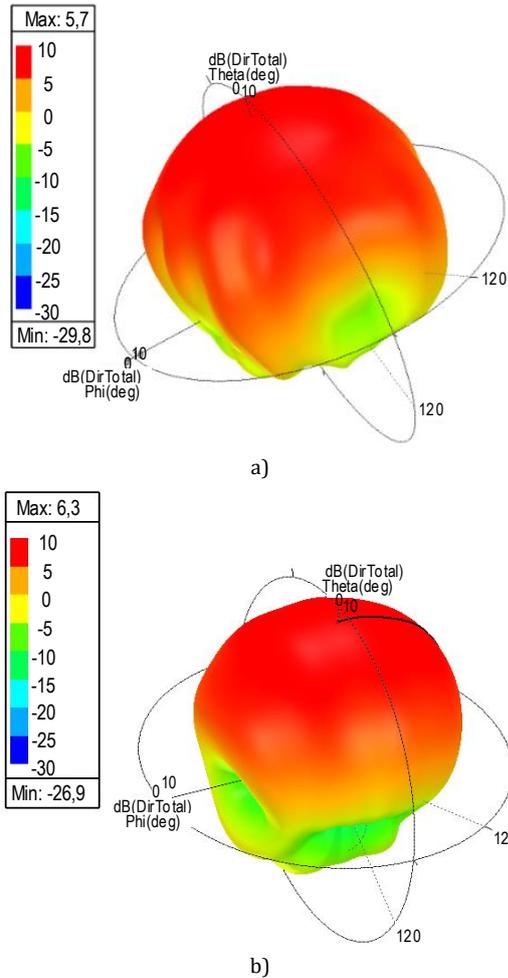


Рис. 2. ДН излучателя с учетом влияния соседних элементов в программе HFSS: для плоской (а) и для линейной (б) антенной решетки

Fig. 2. Antenna Radiation Pattern with Allowance for the Influence of Neighboring Elements in the HFSS Program for Uniform Rectangular (a) and Linear Array (b)

Применение генетического алгоритма в линейных фазированных антенных решетках

Принцип управления лучом ДН широко применяются в радиолокации, радионавигации, сотовой связи и др. В фазированных антенных решетках возможно адаптивное управление лучом, то есть изменение направления сигнала за счет изменения амплитудного и фазового распределения [13]:

$$W_y = A_y \Phi_y, \tag{2}$$

где $A_y \Phi_y$ – диагональные матрицы управления амплитудой и фазой, соответственно.

Основной задачей адаптивного процесса является подстройка весовых коэффициентов. В настоящей работе для получения зависимости АФР от угла сканирования был применен ГА, позволяющий снизить УБЛ ДН. Алгоритм основан на модели биологической эволюции и методе случайного поиска [14]. Его работа базируется на задании огибающей, на основе которой ГА многократно

преобразовывает исходный набор (популяцию) в новую популяцию и, таким образом, ДН (синяя линия) подстраивается под заданные параметры огибающей (красная линия), как показано на рисунке 3. Для работы алгоритма используются расчетные ДН излучателей, полученные при помощи вычислений в программе HFSS, с учетом влияния соседних элементов антенной решетки.

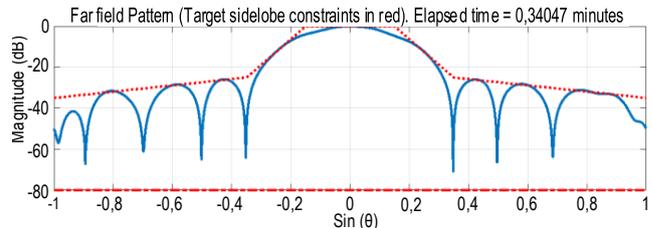


Рис. 3. Огибающая диаграммы направленности

Fig. 3. The Envelope of the Radiation Pattern

Рассмотрим линейную антенную решетку с равноудаленными излучателями (рисунок 4). Оценка угла сканирования производится по углу θ . Для дальнейшего анализа примем к рассмотрению решетку, состоящую из 8 элементов.

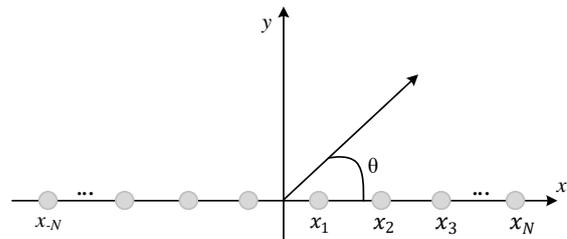


Рис. 4. Геометрия линейной антенной решетки

Fig. 4. Antenna Array Geometries Uniform Linear Array

Для соответствующих углов получены весовые коэффициенты для фиксированного направления основного лепестка ДН. Например, для угла 0° в случае 8-элементной антенной решетки получено амплитудное распределение по элементам:

$$A_1 = 0,4313, A_2 = 0,5084, A_3 = 0,9164, A_4 = 1,0000, A_5 = 0,9939, A_6 = 0,9215, A_7 = 0,5057, A_8 = 0,4331.$$

Сравним ДН антенных решеток, полученные с применением вычисленного АФР и равноамплитудного. Соответствующие ДН приведены на рисунке 5а. КНД изменился с 14,2 до 12,7 дБ, при этом УБЛ уменьшился с $-12,6$ до $-21,2$ дБ.

Для изменения направления основного лепестка ДН антенной решетки был проведен расчет для углов θ отличных от 0° и получены АФР. Пример комплексных весов для 8-элементной линейной антенной решетки в направлении сигнала 20° :

– амплитудное распределение по элементам:

$$A_1 = 0,2822, A_2 = 0,5363, A_3 = 1,0000, A_4 = 1,0000, A_5 = 0,8823, A_6 = 0,8537, A_7 = 0,6140, A_8 = 0,3156;$$

– фазовое распределение по элементам:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= -173,8773^\circ, \psi_2 = -129,5074^\circ, \\ \psi_3 &= -69,1381^\circ, \psi_4 = 0^\circ, \psi_5 = 49,5325^\circ, \\ \psi_6 &= 109,7085^\circ, \psi_7 = 175,4038^\circ, \\ \psi_8 &= -111,6969^\circ. \end{aligned}$$

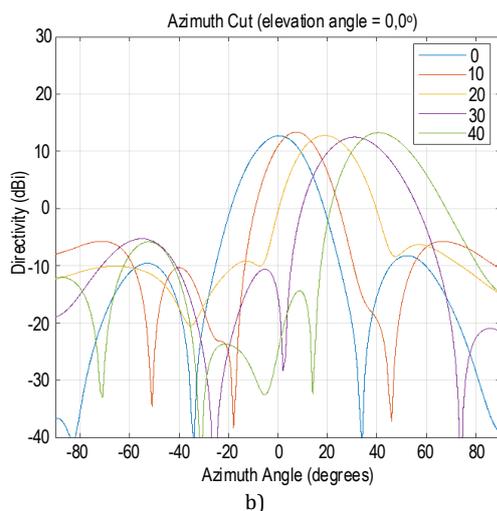
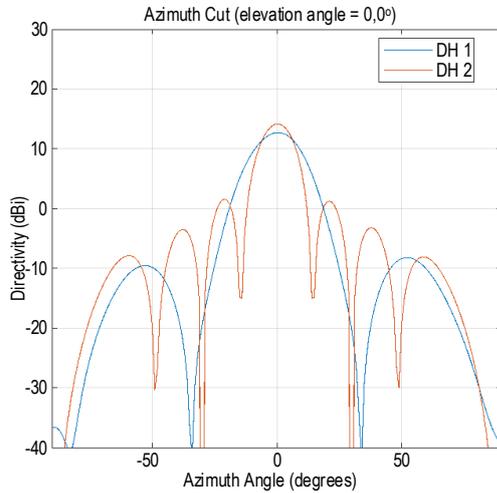


Рис. 5. Сравнение ДН с различным АФР направление 0° (а) и ДН линейной 8-элементной антенной решетки для различных углов сканирования (б)

Fig. 5. Comparison of Radiation Patterns with Different Amplitude-Phase Distributions in the Direction of 0 Degrees (a) and Radiation Pattern of an Eight-Element Antenna Array for Different Scanning Angles (b)

При применении алгоритма для различных углов сканирования антенной решетки также происходит снижение УБЛ – разница для равноамплитудного и синтезированного АФР достигает 7 дБ. На рисунке 5б представлены ДН в зависимости от угла отклонения основного лепестка. Изменение УБЛ, КНД и КУ (все – в дБ) в зависимости от угла приведены в таблице 1.

Применение генетического алгоритма в случае прямоугольной антенной решетки

Рассмотрим геометрию прямоугольных плоских антенных решеток (рисунок 6). В случае с равноудаленными излучателями расстояние между элементами задано равным $0,5\lambda$ (d_x и d_y). В плоской антенной решетке оценка угла сканирования определяется при помощи углов азимута (φ) и угла места (θ) источника сигнала. При этом угол θ лежит в диапазоне от 0° до 90° , а угол φ – от 0° до 360° . Для удобства представления ДН в случае плоских антенных решетках можно рассмотреть ДН в прямоугольных координатах ($U-V$) [15]:

$$\begin{cases} U = \sin\theta\cos\varphi \\ V = \sin\theta\sin\varphi \end{cases} \quad (3)$$

При дальнейшем анализе рассмотрим антенную решетку размерностью 8×8 . Получим амплитуды возбуждения излучателей и фазовое распределение для различных углов сканирования основного лепестка данной антенной решетки. С этой целью, используя комплексные весовые коэффициенты, полученные в случае линейной 8-элементной антенной решетки, найдем весовые коэффициенты прямоугольной с помощью произведения:

$$w_3 = w_1 * w_2, \quad (4)$$

где w_1, w_2 – комплексные коэффициенты, полученные для линейного расположения элементов антенной решетки. Таким образом, для каждого направления излучения имеем 64 весовых коэффициента, задающих АФР на излучателях прямоугольной антенной решетки.

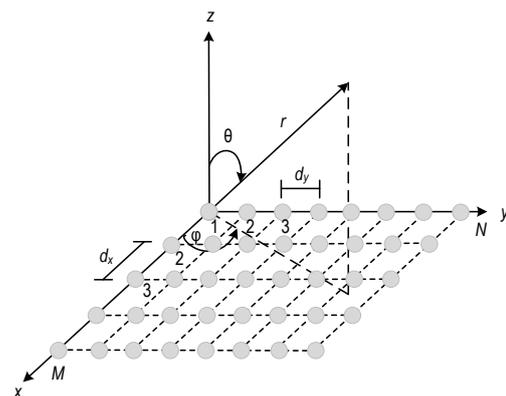


Рис. 6. Геометрия прямоугольной антенной решетки
Fig. 6. Antenna of Array Geometries Uniform Rectangular Array

На рисунке 7 показаны трехмерные ДН для некоторых углов сканирования в системе координат $U-V$. УБЛ при равноамплитудном возбуждении излучателей выше (рисунок 7а) и достигает $-12,9$ дБ в случае $\varphi = 0^\circ$ and $\theta = 0^\circ$, с использованием алгоритма (рисунок 7б) УБЛ удастся уменьшить до $-17,1$ дБ. При анализе другого угла (рисунки 7с и 7д) уровень уменьшается до $-22,5$ дБ в случае использования ГА при синтезе.

ТАБЛИЦА 1. Характеристики линейной антенной решетки, рассчитанной в HFSS и MATLAB

TABLE 1. Characteristics of Uniform Linear Array Modeling in HFSS and MATLAB

Угол θ	Равноамплитудное распределение MATLAB		С применением алгоритма MATLAB		Равноамплитудное АФР HFSS		С применением алгоритма HFSS	
	КНД	УБЛ	КНД	УБЛ	КНД / КУ	УБЛ	КНД / КУ	УБЛ
0°	14,2	-12,6	12,7	-21,2	14,6 / 14,4	-13,2	14,5 / 14,3	-18,8
10°	14,4	-10,5	13,4	-19,2	14,6 / 14,4	-13,1	14,6 / 14,3	-17,5
20°	14,3	-9,6	12,7	-19,6	14,5 / 14,3	-12,6	14,2 / 14,1	-18,3
30°	14,4	-10,3	12,5	-18,1	14,3 / 14,1	-12,1	13,0 / 12,6	-18,0
40°	14,3	-11,6	13,3	-19,0	13,9 / 13,5	-11,1	13,8 / 13,0	-18,6

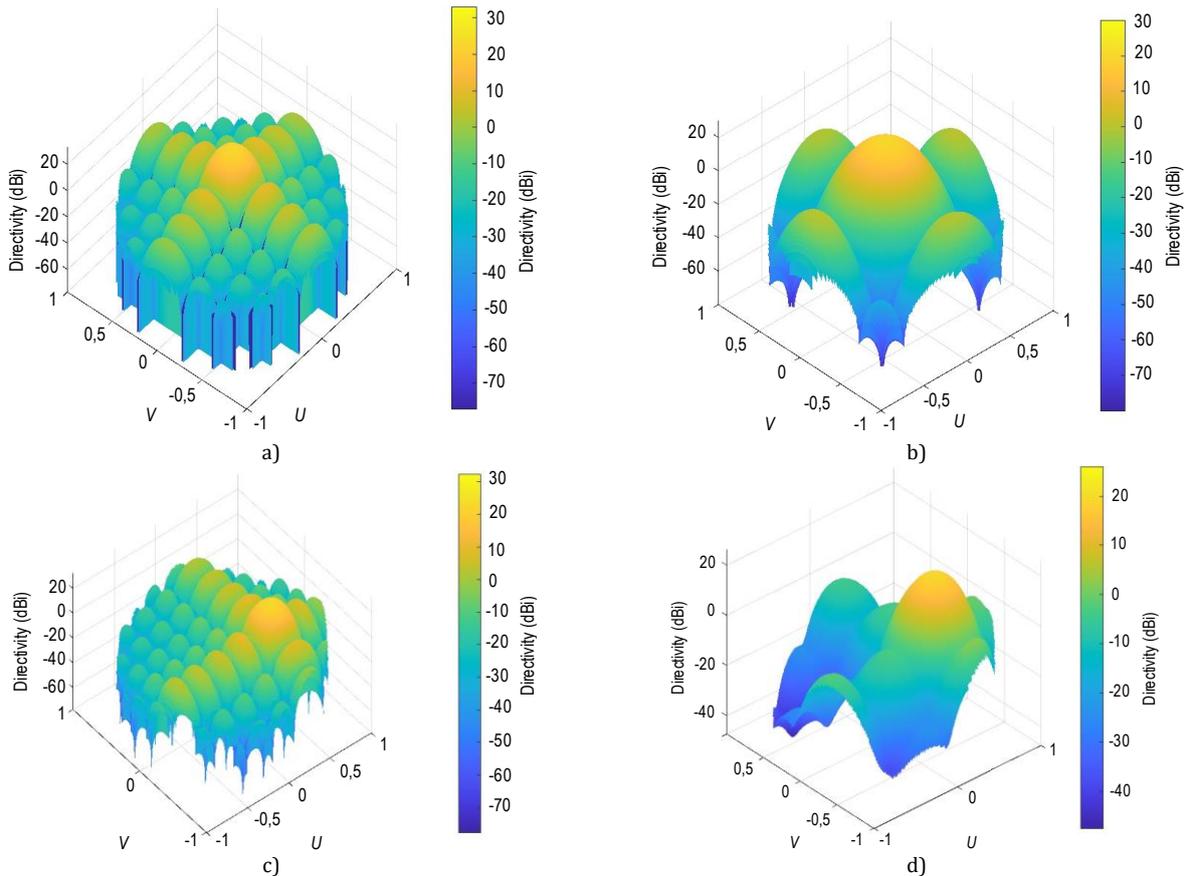


Рис. 7. Трехмерные ДН для $\varphi = 0^\circ$ и $\theta = 0^\circ$ (а), $\varphi = 0^\circ$ и $\theta = 0^\circ$ (б), $\varphi = -135^\circ$ и $\theta = 28^\circ$ (с), $\varphi = -135^\circ$ и $\theta = 28^\circ$ (д) с применением алгоритма

Fig. 7. 3D Radiation Pattern for $\varphi = 0^\circ$ and $\theta = 0^\circ$ (a), $\varphi = 0^\circ$ and $\theta = 0^\circ$ (b), $\varphi = -135^\circ$ and $\theta = 28^\circ$ (c), $\varphi = -135^\circ$ and $\theta = 28^\circ$ (d) Using the Algorithm

Используя весовые коэффициенты, получим значения ДН в HFSS в различных плоскостях. На рисунке 8 изображены ДН для различных углов сканирования. Как и в случае линейной антенной решетки УБЛ существенно снижается; например, для углов $\varphi = -135^\circ$, $\theta = 45^\circ$ (рисунки 8а и 8б) УБЛ уменьшается с $-11,7$ до $-19,7$.

При анализе другого угла также наблюдается снижение УБЛ. На рисунках 9а и 9б изображены нормированные ДН. При применении алгоритма удается уменьшить УБЛ с $-12,9$ до $-17,2$ дБ.

Ради более точной оценки работы алгоритма необходимо проанализировать характеристики и для других направлений излучения с небольшим

шагом до максимального угла сканирования. В случае прямоугольной антенной решетки наибольшее значение угла места составляет $80,8^\circ$ и УБЛ ДН для такого угла равен -20 дБ, в то время как при равноамплитудном распределении УБЛ $-12,2$.

Основные характеристики – КНД, КУ и УБЛ (все в дБ) для различных АФР при различных углах сканирования сведены в таблицу 2. В таблице приведены значения углов для различных систем координат и характеристики, рассчитанные в двух программах. Расчет проводился для различных углов φ и θ , и в таблице 2 приведена лишь малая часть полученных результатов, с типичными для MATLAB отклонениями от точного электродинамического расчета в HFSS.

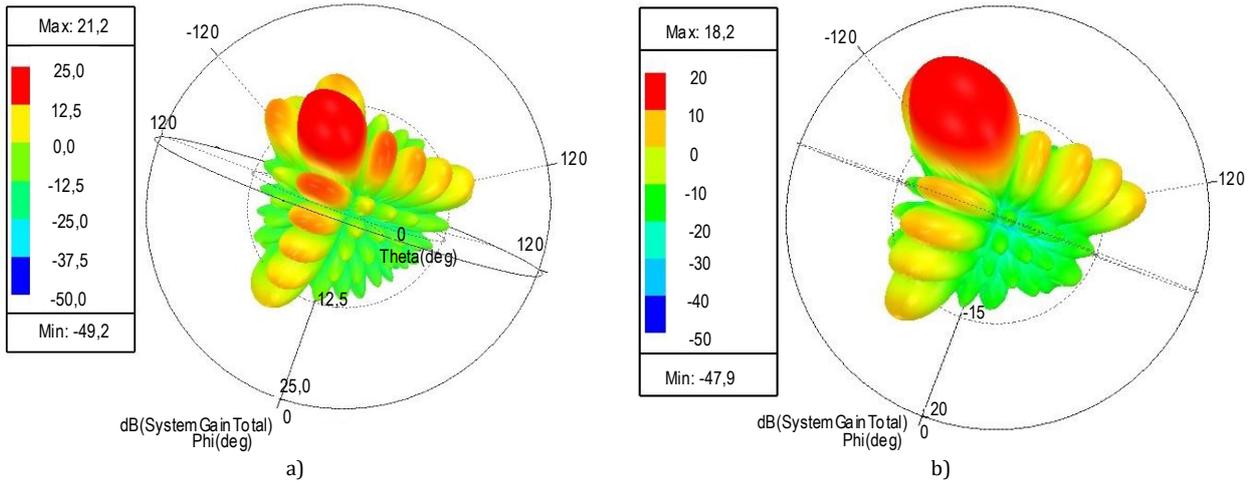


Рис. 8. ДН для углов $\varphi = -135^\circ$ и $\theta = 45^\circ$ равноамплитудного АФР (а) и АФР, полученного при помощи алгоритма (b)
 Fig. 8. Radiation Pattern for Angles $\varphi = -135^\circ$ and $\theta = 45^\circ$ Equal-Amplitude (a) and Obtained Using the Algorithm (b)

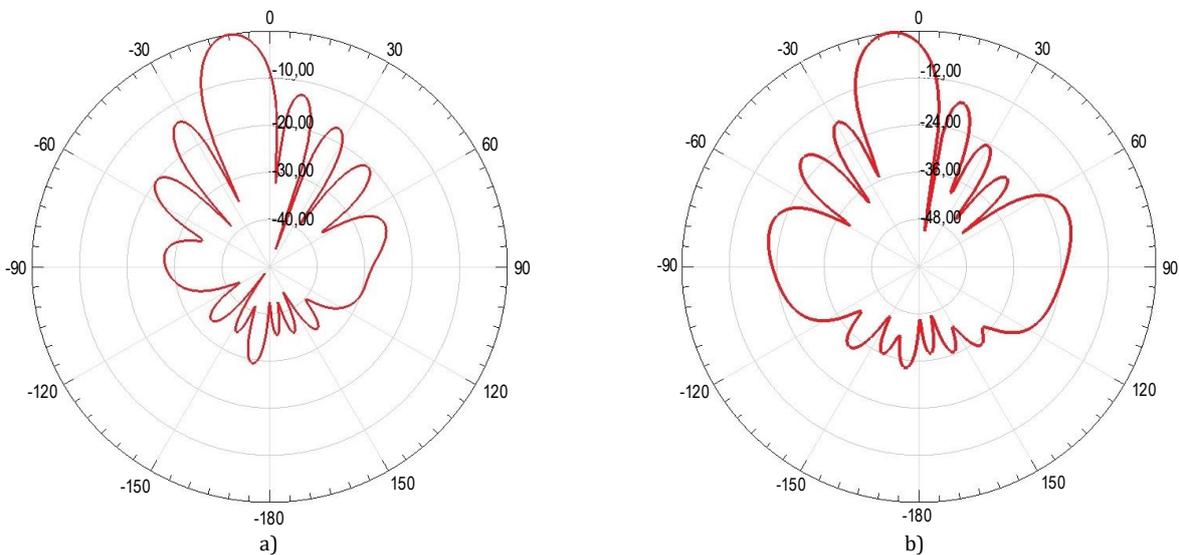


Рис. 9. Нормированные ДН для углов $\varphi = -135^\circ$ и $\theta = 13^\circ$ равноамплитудного АФР (а) и АФР, полученного при помощи алгоритма (b)
 Fig. 9. Normalized Radiation Pattern for Angles $\varphi = -135^\circ$ and $\theta = 13^\circ$ Equal-Amplitude (a) and Obtained Using the Algorithm (b)

ТАБЛИЦА 2. Характеристики прямоугольной антенной решетки, рассчитанной в HFSS и MATLAB

TABLE 2. Characteristics of Uniform Rectangular Array Modeling in HFSS and MATLAB

Угол φ, θ	Равноамплитудное АФР Matlab		С применением алгоритма Matlab		Равноамплитудное АФР HFSS		С применением алгоритма HFSS	
	КНД	УБЛ	КНД	УБЛ	КНД / КУ	УБЛ	КНД / КУ	УБЛ
0,0	22,9	-12,9	20,1	-19,2	23,0 / 22,5	-13,2	22,8 / 22,2	-19,0
[-135, 13]	22,8	-12,5	20,5	-17,0	22,9 / 22,4	-12,9	22,7 / 22,1	-17,2
[-135, 28]	22,3	-12,0	19,3	-22,5	22,5 / 22,0	-12,4	22,2 / 21,5	-19
[-135, 45]	21,9	-11,1	16,2	-20	21,9 / 21,2	-11,7	19,0 / 18,2	-17,3
[-135, 80,8]	20	-11,2	16,1	-25	20,9 / 20,1	-12,2	19,0 / 18,2	-20

Заключение

В настоящей статье представлена процедура синтеза ДН при различных углах сканирования эквидистантных плоских антенных решеток при помощи алгоритма оптимизации, а именно ГА с использованием парциальных диаграмм излуча-

телей. Рассмотрено применение данной методики для линейной 8-элементной и 8x8 плоской прямоугольной решетки, показана эффективность данного метода уменьшения УБЛ, при сохранении высокого КУ при сканировании. В случае линейной антенной решетки УБЛ уменьшен для различных углов в пределах от -17,5 до -18,6 дБ при разнице

КНД (КУ) до 1 дБ. В случае плоских антенных решеток УБЛ также уменьшен от $-17,2$ дБ до -20 при разнице КНД (КУ) менее 2 дБ. При этом, угол сканирования может достигать 40° для 8-элементной линейной антенной решетки.

Следует отметить, что для линейных и прямоугольных антенных решеток с ростом числа излучателей результаты будут отличаться, причем в лучшую сторону. Во-первых, выигрыш во времени расчета будет возрастать. Во-вторых, с ростом числа излучателей решетки, можно достичь более низких УБЛ. Например, при размерности решетки более 16 (линейная 16-элементная решетка или прямоугольная решетка 16×16 элементов) УБЛ может быть снижен до -24 дБ. Очевидно, что для рассматриваемого гигагерцового диапазона рабочих частот, практическое применение, например, в качестве антенной решетки наземного терминала спутниковой связи требует большего числа элементов, что позволит добиться существенного выигрыша в скорости синтеза АФР и результатов. В-третьих, точность работы метода будет возрастать с ростом числа элементов. Парциальные диаграммы излучателей в центре решетки и на краях отличаются, поэтому с ростом числа излучателей использование парциальных диаграмм для синтеза АФР будет приводить к уменьшению расхождения с точным электродинамическим расчетом.

Список источников

1. Brown A.D. Electronically Scanned Arrays MATLAB® Modeling and Simulation. Boston: CRC Press, 2012. 232 p. DOI:10.1201/b12044
2. Кочетков В.А., Горшков А.А., Тихонов А.В., Солдатов И.В. Оптимизация линзовых антенных решеток алгоритмами роя частиц и кукушкиного поиска при их проектировании // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 2. С. 115–125. EDN:DLYE0S
3. Тиников А.В., Щербинин В.В. Применение методов глобальной оптимизации для решения задачи синтеза антенных решеток // Известия Алтайского государственного университета. 2013. № 1(77). С. 194–198. EDN:ROXLLD
4. Wang Z., Wang W.-Q., Zheng Z., Shao H. Nested Array Sensor With Grating Lobe Suppression and Arbitrary Transmit-Receive Beampattern Synthesis // IEEE Access. 2018. Vol. 6. PP. 9227–9237. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2804486
5. Bray M.G., Werner D.H., Boeringer D.W., Machuga D.W. Optimization of thinned aperiodic linear phased arrays using genetic algorithms to reduce grating lobes during scanning // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2002. Vol. 50. Iss. 12. PP. 1732–1742. DOI:10.1109/TAP.2002.807947
6. Panduro M.A., Mendez A.L., Dominguez R., Romero G. Design of non-uniform circular antenna arrays for side lobe reduction using the method of genetic algorithms // AEU-International Journal of Electronics and Communications. 2006. Vol. 60. Iss. 10. PP. 713–717. DOI:10.1016/j.aeue.2006.03.006
7. Ravidudi J.L., Neebha M. Synthesis of linear antenna arrays using jaya, self-adaptive jaya and chaotic jaya algorithms // AEU-International Journal of Electronics and Communications. 2018. Vol. 92. PP. 54–63. DOI:10.1016/j.aeue.2018.05.022
8. Guney K., Onay M. Optimal synthesis of linear antenna arrays using a harmony search algorithm // Expert Systems with Applications. 2011. Vol. 38. Iss. 12. PP. 15455–15462. DOI:10.1016/j.eswa.2011.06.015
9. Ознобихин В.И., Ромодин В.Б., Ячменева Т.В., Кулик В.С. Синтез селекторных диаграмм направленности с использованием генетического алгоритма // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2016. № 8. С. 29–33. EDN:WBPGRD
10. Хансен Р.С. Фазированные антенные решетки. Пер. с англ. М.: Техносфера, 2012. 560 с.
11. Андропов А.В., Кузьмин С.В. Методика синтеза диаграмм направленности антенных решеток с произвольным расположением излучающих элементов // Труды учебных заведений связи. 2022. Т. 8. №. 2. С. 15–28. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-15-28
12. Жук М.С., Молочков Ю.Б. Антенно-фидерные устройства. М.: Энергия, 1966. 648 с.
13. Самойленко В.И., Шишов Ю.А. Управление фазированными антенными решетками. М.: Радио и связь, 1983. 240 с.
14. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 1998. Т. 8. № 2. С. 4–7. EDN:KXAPID
15. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1986. 448 с.

References

1. Brown A.D. *Electronically Scanned Arrays MATLAB® Modeling and Simulation*. Boston: CRC Press; 2012. 232 p. DOI:10.1201/b12044
2. Kochetkov V.A., Gorshkov A.A., Tikhonov A.V., Soldatkov I.V. Optimization of lens antenna arrays by particle swarms and cuckoo search algorithms in their design. *Izvestiya TulGU. Tehnicheskie nauki*. 2021;2:115–125. EDN:DLYEOS
3. Tinekov A.V., Shcherbinin V.V. Implementation of global optimization methods for solving the antenna array synthesis problem. *Izvestiya of Altai State University*. 2013;2(1):194–198. EDN:ROXLLD
4. Wang Z., Wang W.-Q., Zheng Z., Shao H. Nested Array Sensor With Grating Lobe Suppression and Arbitrary Transmit-Receive Beampattern Synthesis. *IEEE Access*. 2018;6:9227–9237. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2804486
5. Bray M.G., Werner D.H., Boeringer D.W., Machuga D.W. Optimization of thinned aperiodic linear phased arrays using genetic algorithms to reduce grating lobes during scanning. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2002;50(12):1732–1742. DOI:10.1109/TAP.2002.807947
6. Panduro M.A., Mendez A.L., Dominguez R., Romero G. Design of non-uniform circular antenna arrays for side lobe reduction using the method of genetic algorithms. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 2006;60(10):713–717. DOI:10.1016/j.aeue.2006.03.006
7. Ravipudi J.L., Neebha M. Synthesis of linear antenna arrays using Jaya, self-adaptive Jaya and chaotic Jaya algorithms. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*. 2018;92:54–63. DOI:10.1016/j.aeue.2018.05.022
8. Guney K., Onay M. Optimal synthesis of linear antenna arrays using a harmony search algorithm. *Expert Systems with Applications*. 2011;38(12):15455–15462. DOI:10.1016/j.eswa.2011.06.015
9. Oznobihin V.I., Romodin V.B., Jachmeneva T.V., Kulik V.S. Selector synthesis of radiation patterns using a genetic algorithm. *Interjekspos Geo-Sibir'*. 2016;8:29–33. EDN:WBPBGHD
10. Hansen R.S. *Phased Antenna Arrays*. New Jersey: John Wiley & Sons; 2009. 551 p.
11. Andropov A., Kuzmin S. Radiation Pattern Synthesis Method of Antenna Arrays with an Arbitrary Arrangement of Radiating Elements. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2022;8(2):15–28. DOI:10.31854/1813-324X-2022-8-2-15-28
12. Zhuk M.S., Molochkov Yu.B. *Antenno-fidernye ustrojstva*. Moscow: Energy Publ.; 1966. 648 p.
13. Samojlenko V.I., Shishov Ju.A. Control of phased antenna arrays. Moscow: *Radio i Svyaz Publ.*; 1983. 240 p.
14. Kureichik V.M. Genetic algorithms. *Izvestija Juzhnogo federalnogo universiteta. Tehnicheskie nauki*. 1998;8(2):4–7. EDN:KXAPID
15. Monzingo R.A., Miller T.W. *Introduction to Adaptive Arrays*. John Wiley & Sons; 1980.

Статья поступила в редакцию 17.01.2024; одобрена после рецензирования 30.01.2024; принята к публикации 16.02.2024.

The article was submitted 17.01.2024; approved after reviewing 30.01.2024; accepted for publication 16.02.2024.

Информация об авторах:

ДМИТРИЕВА
Виктория Викторовна

старший преподаватель кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-5608-5961>

КОРОВИН
Константин Олегович

кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0000-0001-7979-3725>

ЛИКОНЦЕВ
Алексей Николаевич

кандидат технических наук, доцент кафедры радиосистем и обработки сигналов Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича
 <https://orcid.org/0009-0009-5562-2142>