

СИНТЕЗ КОНФОРМНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ

М. О. Бусел; А. А. Калинин, кандидат технических наук, доцент;
А. Г. Романович, кандидат технических наук*

Предложен новый метод численного синтеза антенных решеток с произвольным расположением излучающих элементов в пространстве на основе специальных базисных функций. Метод обеспечивает учет направленных свойств излучателей и их ориентацию. Приведены результаты численного моделирования сферической антенной решетки.

The new method of antennas arrays numerical synthesis with any location of radiating elements, on the basis of special basic functions is offered. The method provides directed properties and space orientation of radiators. Results of numerical modeling of spherical arrays are represented.

В последнее время для решения целого ряда прикладных задач радиосвязи, радиолокации, радионавигации, радиоастрономии и т. д. все чаще возникает необходимость в размещении излучающих элементов над выпуклыми (конформными) поверхностями. Совмещение излучающего полотна антенны с поверхностью различных объектов, например цилиндров, конусов, сфер и других придает дискретным излучающим системам целый ряд полезных свойств, отсутствующих у линейных и плоских антенн [1, 2].

К настоящему времени разработано и развито достаточно много методов синтеза антенн. Основными из них традиционно являются: метод парциальных диаграмм, собственных функций, метод интеграла Фурье и др. [3–5]. В литературе широко представлено применение данных методов к синтезу в основном линейных и плоских антенн с равномерным распределением излучающих элементов. В то же время вопросы синтеза излучающих систем сложной формы остаются почти незатронутыми.

Одной из задач, решаемых в ходе синтеза антенных решеток с произвольным расположением излучающих элементов, является определение геометрии излучающей области и амплитудно-фазового распределения (АФР) в этой области. Размещение излучателей на поверхности решетки может быть как эквидистантным (равномерным), так и неэквидистантным (неравномерным). В литературе широко представлено применение методов синтеза для равномерного размещения элементов в антенной решетке. В конформных антенных решетках размещение не всегда эквидистантное, следовательно, необходимо проводить синтез для решетки с близким к такому размещению излучателей. В литературе данный вопрос почти не затрагивается.

Рассмотрим случай размещения излучателей на сферической поверхности, которая является поверхностью с двойной кривизной. Сферическая антенная решетка (САР) представляет собой систему излучателей, размещенных на сферической поверхности. Размещение излучателей на поверхности такой антенной решетки – достаточно сложная задача [6]. Как известно, применительно к плоским решеткам [7] гексагональное размещение излучателей является более экономичным по сравнению с размещением в узлах прямоугольной сетки, поскольку в этом случае на каждый элемент приходится примерно на 15 % площади поверхности больше. Очевидно, такое же соотношение следует ожидать и в случае конформных антенн.

Сферическая антенная решетка обеспечивает сканирование лучом неизменных ширины и формы в азимутальной и угломестной плоскостях за счет перемещения излучающей области по поверхности решетки (так называемый коммутационный метод). При этом размеры, форма и количество элементов излучающей области остаются практически неизменными (конформное сканирование). Конструктивные особенности

сферической антенной решетки показаны на рисунке 1. Следует отметить, что САР представляет собой систему из N одинаковых излучателей, размещенных в узлах гексагональной сетки, расположенных на сфере радиуса R . Диаграмма направленности (ДН) элемента решетки (в общем случае это комплексная функция) $F_{1n}(\theta, \varphi)$ совпадает по форме и отличается направлением главного излучения, что позволяет описать ее в виде

$$F_{1n}(\theta, \varphi) = F_1(\theta - \theta_n, \varphi - \varphi_n). \quad (1)$$

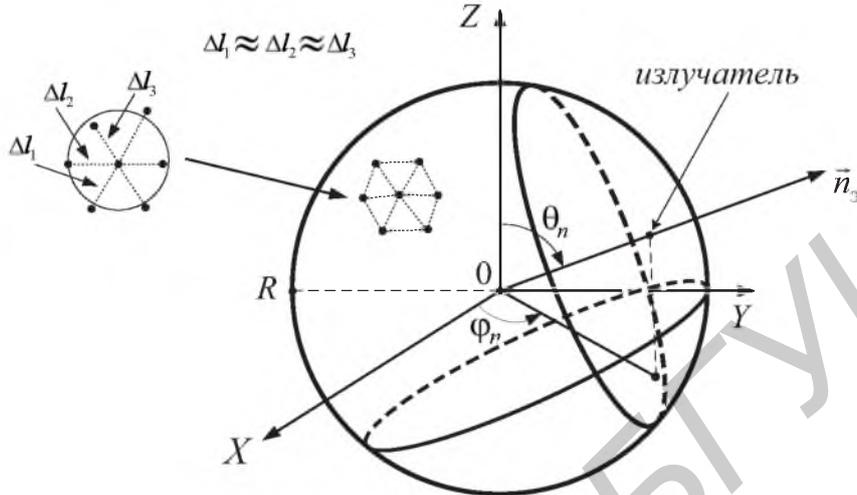


Рисунок 1. – Конструкция сферической антенной решетки

На практике излучающие элементы сферической антенной решетки располагаются над проводящей поверхностью, поэтому при формировании ДН в заданном направлении используется лишь некоторая так называемая активная область решетки (рисунок 2).



Рисунок 2. – Активная область сферической антенной решетки

Под решением задачи синтеза САР понимается расчет такого амплитудно-фазового распределения, которое обеспечит формирование ДН с требуемыми свойствами. При этом принимаются известными геометрические особенности сферической антенной решетки (радиус, ширина активной области, количество излучателей, линейное или угловое расстояние между соседними излучателями, тип излучающего элемента и его направленные свойства).

Запишем выражение для нормированной комплексной ДН сферической антенной решетки в виде

$$\dot{F}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \dot{A}_n F_{1n}(\theta, \varphi) e^{iO_n(\theta, \varphi)}, \quad (2)$$

где N – число излучателей антенной решетки; \dot{A}_n – комплексная амплитуда возбуждения n -го элемента решетки; $O_n(\theta, \varphi)$ – набег фазы поля n -го излучателя при распространении

волны до точки дальней зоны, для случая сферической системы координат определяется выражением

$$O_n(\theta, \varphi) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_n \sin \theta \cos \varphi + y_n \sin \theta \sin \varphi + z_n \cos \theta), \quad (3)$$

где λ – длина волны; x_n, y_n, z_n – декартовы координаты n -го излучателя.

Для случая равномерно возбужденной антенной решетки с учетом ее кривизны амплитудно-фазовое распределение на ее раскрыве определяется по формуле

$$\dot{A}_n = e^{-iO_n(\theta_0, \varphi_0)}, \quad (4)$$

где $O_n(\theta_0, \varphi_0) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_n \sin \theta_0 \cos \varphi_0 + y_n \sin \theta_0 \sin \varphi_0 + z_n \cos \theta_0)$ – набег фазы поля n -го излучателя в направлении (θ_0, φ_0) .

Амплитудно-фазовое распределение (4) обеспечивает синфазное сложение полей излучающих элементов в заданном направлении (θ_0, φ_0) .

В конформных антенных решетках взаимное влияние между излучающими элементами в сравнении с плоскими и линейными антенными решетками относительно невелико [8]. Эта особенность определяется различным направлением излучения элементов в пространстве, а также расстоянием между излучателями $\Delta l > 0,5\lambda$. Тогда в (2) с небольшими допущениями можно использовать диаграмму направленности элемента антенной решетки, расположенного в свободном пространстве. Для получения более точных результатов необходимо использовать ДН излучателя в составе антенной системы [9].

Представим амплитудно-фазовое распределение на раскрыве сферической антенной решетки в виде разложения в бесконечный ряд Фурье:

$$\dot{A}_n = \sum_{s=0}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} \{ \dot{a}_{l,s} S_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] + \dot{b}_{l,s} C_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] \}, \quad (5)$$

где $\dot{a}_{l,s}$ и $\dot{b}_{l,s}$ – комплексные коэффициенты разложения (в самом общем случае в бесконечный ряд Фурье); $S_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] = \sin[l(\theta_n - \theta_0)] \sin[s(\varphi_n - \varphi_0)]$ и $C_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0] = \cos[l(\theta_n - \theta_0)] \cos[s(\varphi_n - \varphi_0)]$ – функции разложения.

Далее по тексту в целях сокращения записи вместо $S_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0]$ и $C_{l,s}[\theta_n - \theta_0, \varphi_n - \varphi_0]$ будет использоваться $S_{l,s}[\theta_n, \varphi_n]$ и $C_{l,s}[\theta_n, \varphi_n]$.

Подставим (5) в (2). Тогда выражение для комплексной нормированной диаграммы направленности сферической антенной решетки можно записать таким образом:

$$\dot{F}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{s=0}^S \sum_{l=0}^L \{ \dot{a}_{l,s} S_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] + \dot{b}_{l,s} C_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] \} F_{1n}(\theta, \varphi) e^{iO_n(\theta, \varphi)}, \quad (6)$$

где $L = S$ – конечное число членов ряда Фурье, характеризует точность разложения двух функций.

Введем новое обозначение и представим выражение (6) как

$$\dot{F}(\theta, \varphi) = \sum_{s=0}^S \sum_{l=0}^L \{ \dot{a}_{l,s} \dot{Z}_{S_{l,s}}(\theta, \varphi) + \dot{b}_{l,s} \dot{Z}_{C_{l,s}}(\theta, \varphi) \}, \quad (7)$$

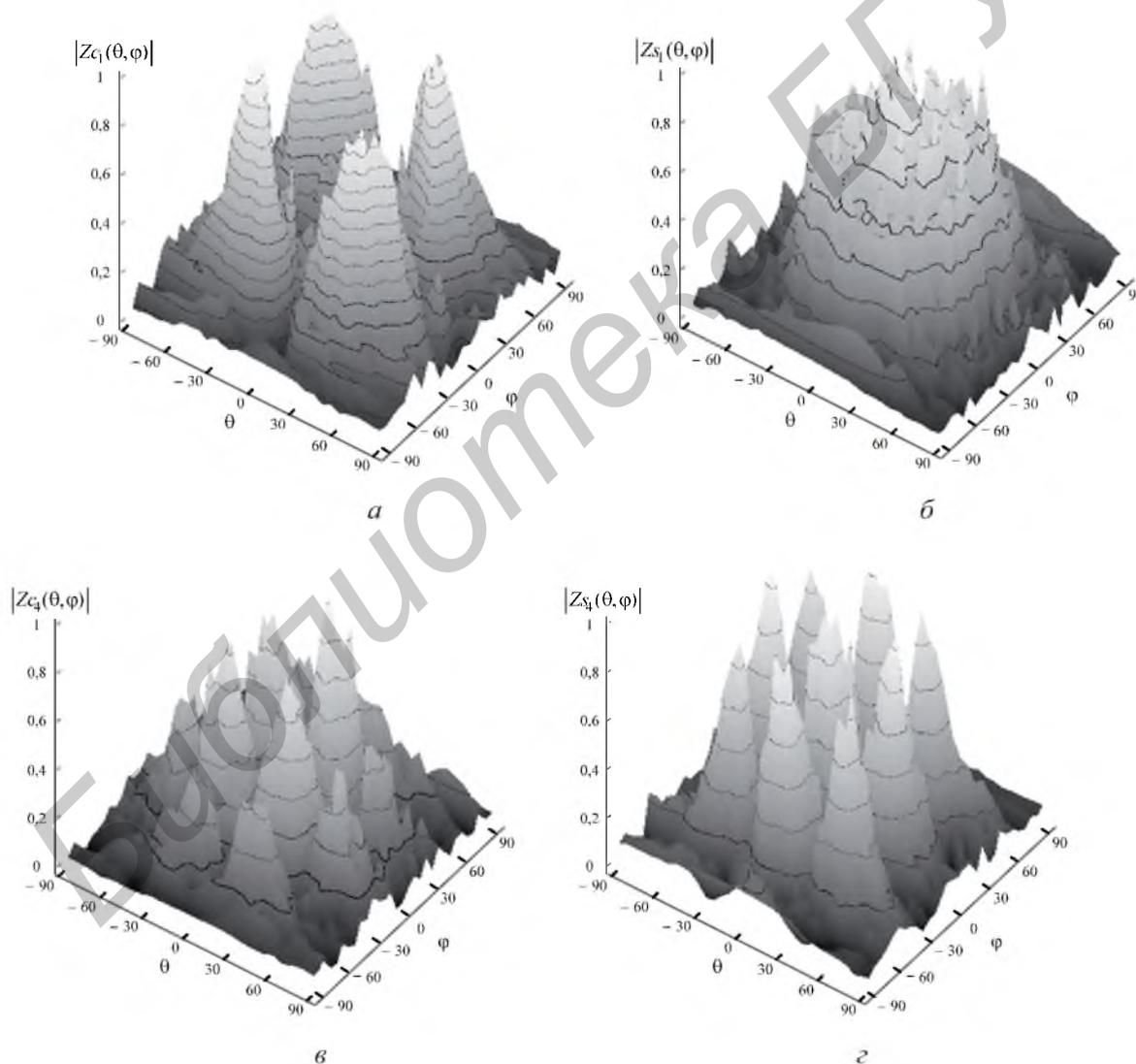
где $\dot{Z}_{S_{l,s}}(\theta, \varphi)$, $\dot{Z}_{C_{l,s}}(\theta, \varphi)$ – базисные функции, которые описываются следующими соотношениями [2]:

$$\dot{Z}_{S_{l,s}}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \{ F_{1n}(\theta, \varphi) S_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \}; \quad (8)$$

$$\dot{Z}_{c_{l,s}}(\theta, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \{ F_{1n}(\theta, \varphi) C_{l,s}[\theta_n, \varphi_n] e^{-iO_n(\theta, \varphi)} \}. \quad (9)$$

Как видно из выражения (7), суть предлагаемого метода заключается в представлении заданной ДН в виде разложения в ряд Фурье по системе базисных функций $\dot{Z}_{s_{l,s}}(\theta, \varphi)$ и $\dot{Z}_{c_{l,s}}(\theta, \varphi)$, нахождении коэффициентов $\dot{a}_{l,s}$ и $\dot{b}_{l,s}$ с дальнейшей подстановкой их в формулу (5) для расчета комплексных амплитуд возбуждения элемента решетки.

Из соотношений (8) и (9) видно, что функции $\dot{Z}_{s_{l,s}}(\theta, \varphi)$ и $\dot{Z}_{c_{l,s}}(\theta, \varphi)$ содержат в себе информацию как о конструктивных особенностях САР, так и о направленных свойствах ее элементов. В качестве примера на рисунке 3 показан вид нормированных амплитудных значений базисных функций $\dot{Z}_{s_{l,s}}(\theta, \varphi)$ и $\dot{Z}_{c_{l,s}}(\theta, \varphi)$ первого (а, б) и четвертого (в, г) порядка для случая заданной активной области ($2\varphi_{0,5} = 130^\circ$, $2\theta_{0,5} = 130^\circ$) сферической антенной решетки с параметрами ($R = 9\lambda$, $\Delta l \approx 0,6\lambda$).



а, б – первый порядок; в, г – четвертый порядок

Рисунок 3. – Нормированные базисные функции

Коэффициенты разложения $\dot{a}_{l,s}$ и $\dot{b}_{l,s}$ находятся с использованием стандартной процедуры [10]:

$$\dot{a}_{l,s} = \frac{2}{\pi^2} \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \dot{F}_{\text{мп}}(\theta, \varphi) \dot{Z}_{s,l,s}(\theta, \varphi) d\theta d\varphi; \quad (10)$$

$$\dot{b}_{l,s} = \frac{2}{\pi^2} \int_{-0,5\pi}^{0,5\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \dot{F}_{\text{мп}}(\theta, \varphi) \dot{Z}_{c,l,s}(\theta, \varphi) d\theta d\varphi, \quad (11)$$

где $\dot{F}_{\text{мп}}(\theta, \varphi)$ – требуемая комплексная диаграмма направленности.

Следует отметить, что $\dot{F}_{\text{мп}}(\theta, \varphi)$ можно получить, задавая требуемые направленные свойства в двух главных плоскостях [2]:

$$\dot{F}_{\text{мп}}(\theta, \varphi) = \dot{F}_{\theta\text{мп}}(\theta) \dot{F}_{\varphi\text{мп}}(\varphi), \quad (12)$$

где $\dot{F}_{\theta\text{мп}}(\theta)$ и $\dot{F}_{\varphi\text{мп}}(\varphi)$ – требуемые комплексные диаграммы направленности в соответствующих главных плоскостях.

Найденные значения коэффициентов $\dot{a}_{l,s}$ и $\dot{b}_{l,s}$ в дальнейшем используются для расчета комплексных амплитуд возбуждения (4) элементов решетки. Синтезированное амплитудно-фазовое распределение обеспечивает формирование ДН сферической антенной решетки с заданными параметрами.

Выражения (1)–(12) описывают метод численного синтеза амплитудно-фазового распределения конформной антенной решетки заданной конструкции.

В качестве элементов антенных решеток обычно используются слабонаправленные излучатели: вибраторные, щелевые, волноводные антенны, антенны бегущей волны и т. п. Коэффициент направленного действия (КНД) таких излучателей составляет всего несколько единиц. Поэтому при моделировании их можно приближенно описывать в виде элементарных излучателей, например элемента Гюйгенса. Соответственно все многообразие излучающих элементов можно разделить на две группы: вибраторные и апертурные.

Модель излучателя вибраторного типа применяется при отсутствии проводящего конформного экрана. Такие конформные антенные решетки используются в различных пеленгационных системах коротковолнового диапазона волн. Их рассмотрение выходит за рамки данной работы.

Апертурные излучатели САР по направленным свойствам близки к элементу Гюйгенса, представляемому в виде бесконечно малого участка волнового фронта плоской электромагнитной волны с линейной поляризацией. ДН элемента Гюйгенса имеет близкую к осесимметричной форму, а его КНД равен 3 [7]. Поэтому при моделировании направленных свойств $F_{1n}(\theta, \varphi)$ излучающего элемента САР его амплитудные ДН в двух главных плоскостях задавались выражениями (рисунок 4):

$$F_{1\varphi}(\varphi) = \left| \frac{1 + \cos\varphi}{2} \right|; \quad (13)$$

$$F_{1\theta}(\theta) = \left| \frac{1 + \cos\theta}{2} \right|, \quad (14)$$

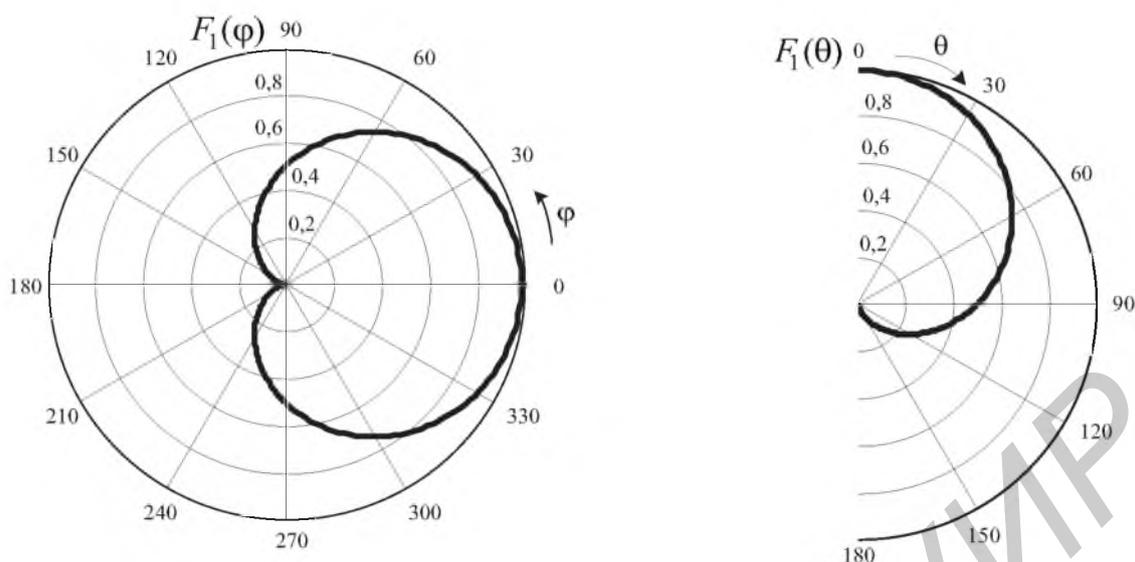


Рисунок 4. – ДН излучателя в главных плоскостях

На практике часто излучающие элементы САР располагаются над проводящей поверхностью. Поэтому при формировании ДН в некотором направлении необходимо исключить излучение в область пространства, экранированную проводящим экраном. С учетом этого при расчетах модель излучателя сферической антенной решетки принимает вид, как показано на рисунке 5.

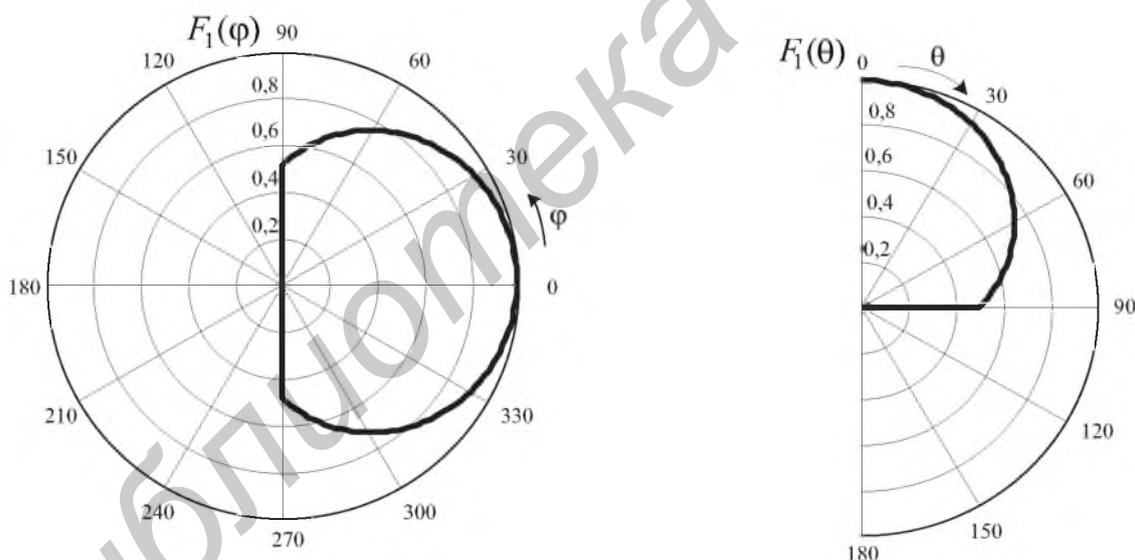
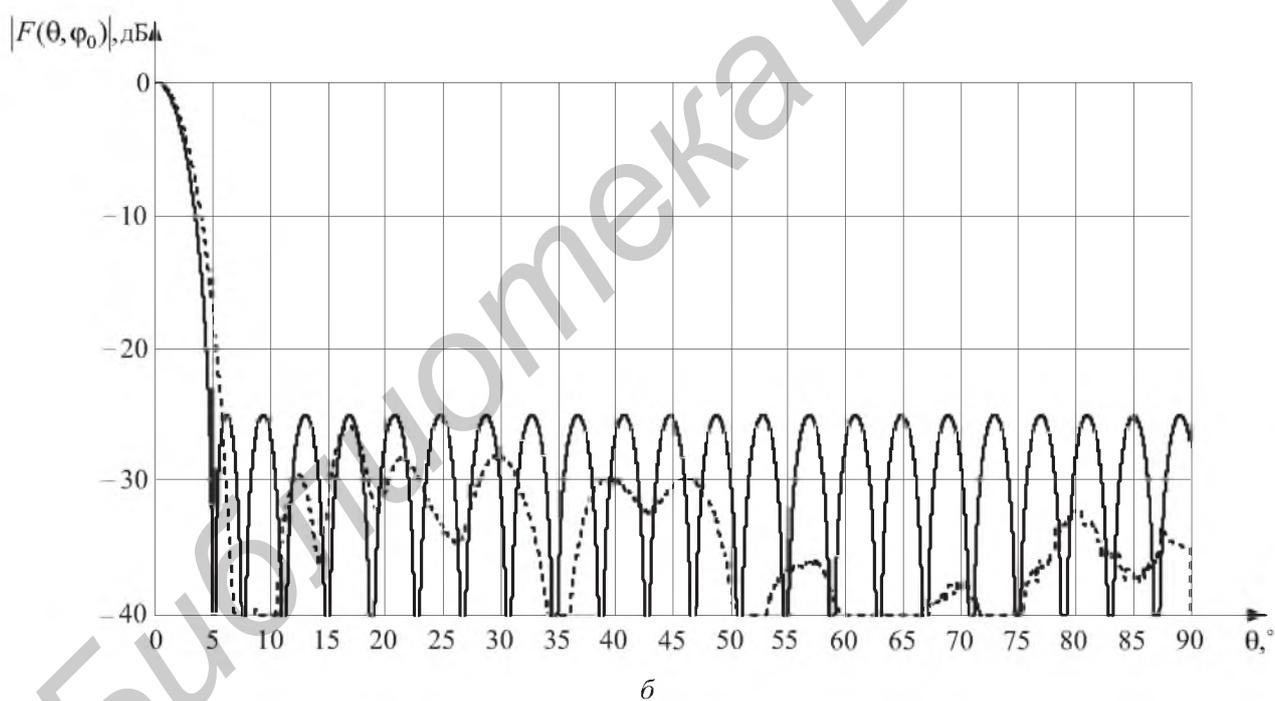
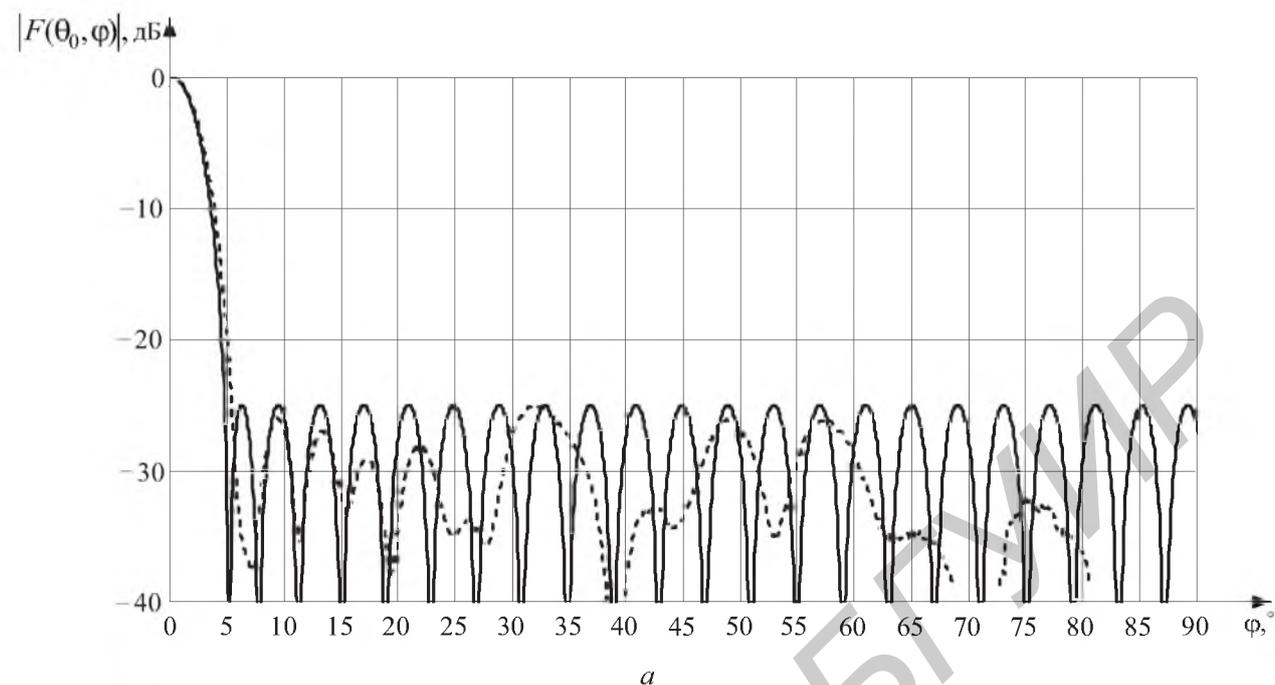


Рисунок 5. – ДН излучателя без обратного излучения в главных плоскостях

Результирующая ДН излучателя описывается выражением

$$F_1(\theta, \varphi) = \left| \frac{1 + \cos \varphi}{2} \right| \cdot \left| \frac{1 + \cos \theta}{2} \right|. \quad (15)$$

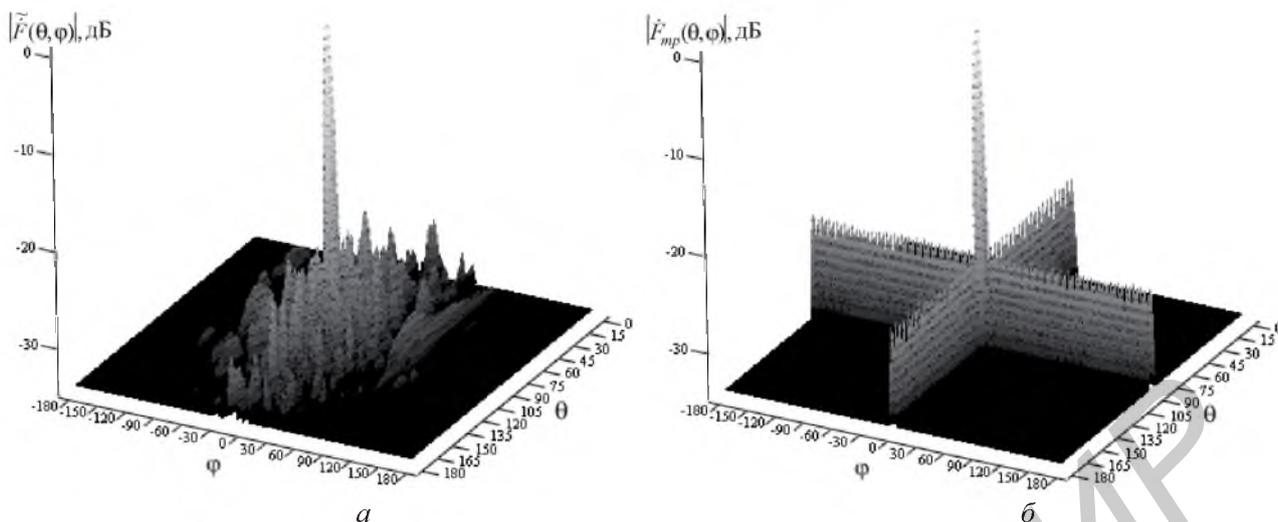
Для проверки работоспособности данного метода синтеза конформной антенной решетки проводилось моделирование активной области сферической антенной решетки с параметрами ($2\varphi_{0,5} = 130^\circ$; $2\theta_{0,5} = 130^\circ$) и размещением излучателей в узлах квазиравносторонней треугольной (произвольной) сетки. В качестве одиночного излучателя использовался элемент с направленными свойствами (15). Результаты моделирования приведены на рисунках 6 и 7.



a – плоскость φ ; b – плоскость θ

Рисунок 6. – Нормированные ДН САР с заданными параметрами $F_B = 25$ дБ и $2\varphi_{0,5} = 2\theta_{0,5} = 4^\circ$ (непрерывная линия – заданная, штриховая линия – результат моделирования)

Из рисунка 6 видно, что требования к F_B и $2\varphi_{0,5}$ ($2\theta_{0,5}$) синтезируемой ДН сферической антенной решетки практически полностью выполнены.



а – синтезируемая ДН; *б* – требуемая ДН

Рисунок 7. – Нормированные ДН САР

Таким образом, в работе предложен метод синтеза КАР с произвольным расположением излучателей, который позволяет учитывать направленные свойства элементов антенной решетки и проводить расчет АФР в пределах выбранной активной области. В отличие от известных методов синтеза предложенный метод не имеет ограничений на геометрию излучающего раскрыва. Метод синтеза антенной решетки позволяет учитывать требования к заданной диаграмме направленности как по уровню бокового излучения, так и по ширине главного лепестка диаграммы направленности. Предлагаемый метод может быть использован в активных конформных антенных решетках с цифровым способом формирования ДН.

Список литературы

1. Josefsson, L. Conformal array antenna theory and design / L. Josefsson, P. Persson. – New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2006. – 488 p.
2. Калинин, А. А. Метод численного синтеза чебышевских кольцевых антенных решеток / А. А. Калинин, А. Г. Романович // Докл. БГУИР. – 2010. – № 7 (53). – С. 5–11.
3. Зелкин, Е. Г. Методы синтеза антенн / Е. Г. Зелкин, В. Г. Соколов. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с.
4. Бахрах, Л. Д. Синтез излучающих систем / Л. Д. Бахрах, С. Д. Кременецкий. – М.: Сов. радио, 1974. – 232 с.
5. Минкович, В. М. Теория синтеза антенн / В. М. Минкович, В. П. Яковлев. – М.: Сов. радио, 1969. – 296 с.
6. Хансен, Р. С. Фазированные антенные решетки / Р. С. Хансен. – М.: Техносфера, 2012. – 560 с.
7. Марков, Г. Т. Антенны / Г. Т. Марков, Д. М. Сазонов. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.
8. Проектирование фазированных антенных решеток / Д. И. Воскресенский [и др.]. – М.: Радиотехника, 2012. – 744 с.
9. Романович, А. Г. Результаты численных исследований кольцевых антенных решеток, синтезированных с учетом направленных свойств излучателей / А. Г. Романович, А. А. Калинин, М. О. Бусел // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2013. – № 4 (41). – С. 101–105.
10. Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М.: Наука, 1964. – 772 с.

*Сведения об авторах:

Бусел Михаил Олегович,
 УО «Военная академия Республики Беларусь»;
 Калинин Александр Александрович,
 НПОО (ОКБ ТСП);
 Романович Александр Геннадьевич,
 УО «Белорусский государственный университет
 информатики и радиоэлектроники».
 Статья поступила в редакцию 28.03.2016 г.