

---

**АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ  
СИСТЕМЫ**

---

УДК 621.396.677

**МЕТОД КОНСТРУКТИВНОГО СИНТЕЗА ПЛОСКИХ АНТЕННЫХ  
РЕШЕТОК С УЧЕТОМ ВЗАИМНОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ**© 2021 г. С. Е. Мищенко<sup>а, \*</sup>, В. В. Шацкий<sup>а</sup>, А. В. Литвинов<sup>а</sup>, Д. Ю. Елисеев<sup>а</sup><sup>а</sup>Ростовский научно-исследовательский институт радиосвязи,  
ул. Нансена, 130, Ростов-на-Дону, 344038 Российская Федерация

\*E-mail: mihome@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.10.2019 г.

После доработки 21.07.2020 г.

Принята к публикации 07.08.2020 г.

Предложен метод конструктивного синтеза плоских антенных решеток (АР) с учетом взаимной связи между элементами на основе нейросетевого подхода. В математической модели АР принято, что при обосновании конфигурации АР антенные элементы могут быть разделены на группы активных, неиспользуемых или пассивных элементов, токи в которых наводятся соседними элементами. Проведено обоснование структуры нейронной сети, включающей классифицирующую нейронную сеть и несколько аппроксимирующих сетей. Процесс обучения нейронной сети разделен на два этапа: этап предварительной отдельной настройки каждой части и этап совместного обучения всех частей нейронной сети. Получено решение задачи конструктивного синтеза АР по требованиям к форме диаграммы направленности, подтвердившее работоспособность метода и перспективность нейросетевого подхода.

DOI: 10.31857/S0033849421040082

**ВВЕДЕНИЕ**

Задачи конструктивного синтеза антенных решеток (АР) сводятся к решению системы нелинейных уравнений относительно координат фазовых центров антенных элементов (АЭ) и комплексных амплитуд АЭ.

Для решения таких систем уравнений в [1] были предложены различные методы, большая часть которых применима только для линейных решеток. Исключение составил метод моментов [1, 2], в соответствии с которым формировали разреженный плоский раскрыв с равномерным возбуждением АЭ. При этом плотность размещения излучателей соответствовала амплитудному распределению заполненного раскрыва при формировании заданной диаграммы направленности (ДН). Однако на практике чаще возникают задачи конструктивного синтеза плоских АР, в которых АЭ расположены в узлах регулярной сетки, а неизвестными являются форма границы раскрыва и комплексные амплитуды АЭ.

В монографии [3] сформулирован общий алгоритм решения подобных задач. Он состоит в том, что сначала находят множество допустимых конфигураций раскрывов. Затем для каждого раскрыва решают задачу амплитудно-фазового синтеза и на заключительном этапе принимают решение о выборе наилучшей конфигурации раскрыва в смысле за-

данного критерия. Реализация данного алгоритма указывает на то, что сформулированная задача синтеза относится к классу многокритериальных задач оптимизации, при этом между критериями выбора множества допустимых конфигураций раскрыва, определения комплексных амплитуд АЭ для каждой из конфигураций АР и отбора единственного решения установлен определенный лексикографический порядок. Этот порядок позволяет решить проблему скаляризации задачи многокритериального конструктивного синтеза АР. В работах [4, 5] предложен метод конструктивного синтеза плоской АР, при реализации которого авторы использовали нейронную сеть (НС) для формирования конфигурации раскрыва, а затем для этой конфигурации решали задачу амплитудно-фазового синтеза. При этом на вход НС поступали сигналы, соответствующие нормированным значениям координат АЭ в узлах регулярной сетки.

Перечисленные методы конструктивного синтеза плоских АР, в которых положения АЭ заданы в узлах регулярной сетки, объединяет то, что набор искомого параметров содержит вектор комплексных амплитуд элементов АР, координаты фазовых центров, а также вектор дискретных значений, определяющий дискретные состояния АЭ. В простейшем случае каждый АЭ может находиться в двух дискретных состояниях: актив-

ный АЭ (ААЭ) и неиспользуемый АЭ (НАЭ). В более общем случае таких дискретных состояний может быть значительно больше. В [6] предложен нейросетевой подход к решению задач конструктивного синтеза активных фазированных АР, в которых число дискретных состояний ААЭ соответствовало числу номиналов усилителей мощности СВЧ, используемых в составе АР. С практической и теоретической точек зрения представляет интерес задача конструктивного синтеза АР, в которой каждый АЭ может относиться к классу ААЭ, НАЭ и пассивных АЭ (ПАЭ). Будем считать, что токи в ПАЭ наводятся соседними ААЭ. Подобные задачи в известной литературе прежде не рассматривались.

Цель работы – обоснование конфигурации АР, которая содержит ААЭ и ПАЭ.

### 1. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА КОНСТРУКТИВНОГО СИНТЕЗА АР

Пусть имеется  $M$ -элементная АР. Все АЭ в составе АР влияют друг на друга, это взаимное влияние отражает нормированная матрица сопротивлений  $\mathbf{Z}$ . С учетом взаимного влияния ДН АР может быть рассчитана по формуле

$$F(u, v) = \mathbf{A}^T \mathbf{Z} \mathbf{f}(u, v), \quad (1)$$

где

$$\mathbf{f}(u, v) = (f_0(u, v) \exp(ik(x_m u + y_m v)))_{m=1,2,\dots,M} \quad (2)$$

– вектор-функция, описывающая комплексные ДН одиночных элементов в составе АР;  $f_0(u, v)$  – ДН одиночного АЭ;  $(x_m, y_m)$  – координаты фазового центра  $m$ -го АЭ ( $m = 1, 2, \dots, M$ );  $\mathbf{A} = (A_m)$  – вектор-столбец комплексных амплитуд АЭ, нормированных к максимальной амплитуде элемента;  $T$  – символ транспонирования;  $(u, v)$  – вектор направляющих косинусов.

Введем матрицу  $\mathbf{B}$  размером  $M \times M$ , все элементы которой равны 1, и оператор “ $\circ$ ”, обозначающий поэлементное перемножение матриц (произведение Адамара). С учетом данных обозначений выражение (1) не изменится, если его переписать в виде

$$F(u, v) = \mathbf{A}^T (\mathbf{B} \circ \mathbf{Z}) \mathbf{f}(u, v). \quad (3)$$

Предположим, что из состава АР необходимо полностью исключить  $n$ -й АЭ. Этого можно добиться, если обнулить  $A_n = 0$ , а также все элементы  $n$ -й строки и  $n$ -го столбца матрицы  $\mathbf{B}$ . Чтобы  $n$ -й элемент АР стал пассивным, необходимо присвоить  $A_n = 0$ , а элементы матрицы  $\mathbf{B}$  в соответствующих строке и столбце оставить без изменений. При этом поэлементное произведение  $\mathbf{A} \circ \text{diag}(\mathbf{B})$  будет соответствовать вектору ком-

плексных амплитуд в активной части раскрыва (операция  $\text{diag}(\mathbf{B})$  обозначает формирование вектора из элементов, лежащих на главной диагонали матрицы  $\mathbf{B}$ ).

С учетом выражения (3) множество  $\mathbf{P} = (x_1, y_1; x_2, y_2; \dots, x_M, y_M)$  координат фазовых центров АЭ в составе АР может быть разделено на три подмножества:

– подмножество ААЭ  $\mathbf{P}^{(A)}$  мощностью  $|\mathbf{P}^{(A)}|$ , каждой  $n$ -й координатной паре которого соответствует ненулевое значение комплексной амплитуды и ненулевые строка и столбец матрицы  $\mathbf{B}$ ;

– подмножество ПАЭ  $\mathbf{P}^{(P)}$  мощностью  $|\mathbf{P}^{(P)}|$ , каждой  $n$ -й координатной паре которого соответствует нулевое значение комплексной амплитуды и ненулевые строка и столбец матрицы  $\mathbf{B}$ ;

– подмножество НАЭ  $\mathbf{P}^{(O)}$  мощностью  $|\mathbf{P}^{(O)}|$ , каждой  $n$ -й координатной паре которого соответствует нулевое значение комплексной амплитуды и нулевые строка и столбец матрицы  $\mathbf{B}$ ;

Очевидно, что  $|\mathbf{P}^{(A)}| + |\mathbf{P}^{(P)}| + |\mathbf{P}^{(O)}| = M$ .

Введенные обозначения позволяют сформулировать задачу конструктивного синтеза АР в следующей постановке.

Пусть известны:

– действительная нормированная функция  $F_0(u, v)$ , описывающая форму заданной ДН;

– матрица нормированных сопротивлений  $\mathbf{Z}$   $M$ -элементной АР.

Найти матрицу  $\mathbf{B}_0$  и нормированный вектор  $\mathbf{A}_0$  комплексных амплитуд АЭ  $M$ -элементной АР, которые удовлетворяют следующим требованиям:

$$g_1(\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0) = \min_{(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \in \mathbf{D}} g_1(\mathbf{A}, \mathbf{B}); \quad (4)$$

$$g_2(\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0) = \max_{(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \in \mathbf{D}} g_2(\mathbf{A}, \mathbf{B}); \quad (5)$$

$$|\mathbf{P}^{(A)}| \leq M^{(A)}. \quad (6)$$

Здесь  $\mathbf{D}$  – множество допустимых решений;

$$g_1(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \iint_{u^2+v^2 \leq 1} \rho(u, v) \times \left( F_0(u, v) - \frac{|\mathbf{A}^T (\mathbf{B} \circ \mathbf{Z}) \mathbf{f}(u, v)|}{|\mathbf{A}^T (\mathbf{B} \circ \mathbf{Z}) \mathbf{f}(u_0, v_0)|} \right)^2 dudv; \quad (7)$$

$$g_2(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = (\mathbf{A} \circ \text{diag}(\mathbf{B}))^T (\mathbf{A} \circ \text{diag}(\mathbf{B})) * |\mathbf{P}^{(A)}|^{-1} \quad (8)$$

– частные целевые функции;  $M^{(A)}$  – допустимое число активных каналов;  $\rho(u, v)$  – весовая функция;  $(u_0, v_0)$  – направление максимума формируе-

мой ДН; \* обозначает операцию комплексного сопряжения элементов вектора.

Частная целевая функция (7) позволяет оценить качество приближения формы амплитудной ДН АР к заданной ДН.

Значение частной целевой функции (8) по отношению к передающей АР пропорционально излучаемой мощности АР. В случае приемной АР частная целевая функция (8) пропорциональна мощности принимаемого сигнала. В обоих случаях максимальное значение частной целевой функции (8) достигается в том случае, когда коэффициент использования поверхности (КИП) активной части раскрыва равен единице.

Формирование ДН АР, близкой к заданной, обычно связано со снижением КИП активной части раскрыва. В связи с этим требования (4) и (5) являются противоречивыми. Ограничение (6) позволяет при одном и том же значении показателя (8) и разных компоновках ААЭ и ПАЭ получать различные формы ДН и соответствующие им значения частной целевой функции (7). В связи с этим решение сформулированной задачи конструктивного синтеза сопряжено с достижением компромисса между требованиями к КИП и форме ДН АР.

Конструктивный синтез передающей АР с неуправляемым фидерным трактом при реализации предлагаемого метода позволяет получить форму границы активной части раскрыва и компоновку ПАЭ. Амплитуды вектора  $\mathbf{A} \circ \text{diag}(\mathbf{B})$  могут быть использованы при проектировании фидерного тракта, а его фазы реализованы при помощи фазовращателей.

Конструктивный синтез передающей АР с управляемыми амплитудами каналов может быть рассмотрен при проектировании передающих пассивных и активных АР с управляемыми аттенюаторами или усилителями СВЧ с изменяемыми коэффициентами передачи. Однако в этом случае на диапазон регулировки амплитуд следует накладывать дополнительные ограничения. Эти ограничения выходят за рамки данной статьи, но могут быть введены согласно работе [6].

Задачи конструктивного синтеза приемной АР с неуправляемым фидерным трактом и приемной цифровой АР эквивалентны задаче конструктивного синтеза АР с неуправляемым фидерным трактом. Однако в случае приемной цифровой АР реализация решения в части формирования вектора комплексных амплитуд активной части раскрыва значительно проще, поскольку не требует проектирования схемы деления и использования фазовращателей.

В связи с этим будем полагать, что сформулированная задача конструктивного синтеза относится к задачам проектирования передающих и

приемных пассивных АР с неуправляемым фидерным трактом и приемных цифровых АР.

Критерии (4)–(6) могут вступать между собой в противоречие, поэтому будем считать, что критерий (4) является наиболее, а критерии (5) и (6) – наименее предпочтительными.

Главная особенность сформулированной задачи синтеза состоит в том, что значения компонентов искомого комплексного вектора и двоичной матрицы могут быть связаны с принадлежностью антенного элемента одному из трех дискретных множеств. Для решения подобных задач в работе [6] был предложен нейросетевой подход. В соответствии с данной работой искомые параметры задачи конструктивного синтеза АР определяются по выходным сигналам НС. При этом НС должна содержать классифицирующую часть и несколько аппроксимирующих частей. Число выходов классифицирующей части зависит от дискретного числа состояний антенных элементов, а число аппроксимирующих частей, каждая из которых содержит один выход, определяется набором параметров, значения которых выбирают из множества действительных значений.

Применительно к сформулированной задаче рассмотрим НС, которая содержит классифицирующую часть с тремя выходами и две аппроксимирующие части. На вход НС поступает вектор сигналов  $\xi$ , элементы которого соответствуют нормированным значениям координат антенных элементов:

$$\xi_1 = x \left( \max_{m=1,2,\dots,M} (x_m) \right)^{-1}; \quad \xi_2 = y \left( \max_{m=1,2,\dots,M} (y_m) \right)^{-1}. \quad (9)$$

Эти сигналы поступают на входы слоев инициализации классифицирующей и аппроксимирующих частей. Все части НС будем считать изолированными друг от друга. Каждую часть НС представим в виде полносвязной сети с коэффициентами смещения. Выходной сигнал первой аппроксимирующей части соответствует амплитуде  $|A(x, y)|$ , а сигнал второй части  $\psi(x, y)$  свяжем с фазовым распределением в раскрыве АР  $\arg A(x, y)$  соотношением

$$\arg A(x, y) = 2\pi\psi(x, y) - \pi.$$

Принадлежность АЭ к одному из трех рассматриваемых подмножеств будем определять по номеру выходного сигнала с наибольшей амплитудой. При этом первый выходной сигнал будет соответствовать подмножеству ААЭ, второй – ПАЭ, а третий – НАЭ.

Предлагаемая структура НС для решения рассматриваемой задачи приведена на рис. 1. Все части НС состоят из трех скрытых слоев (Скрытый слой 1...Скрытый слой 3), в каждом из которых в качестве функции активации используется

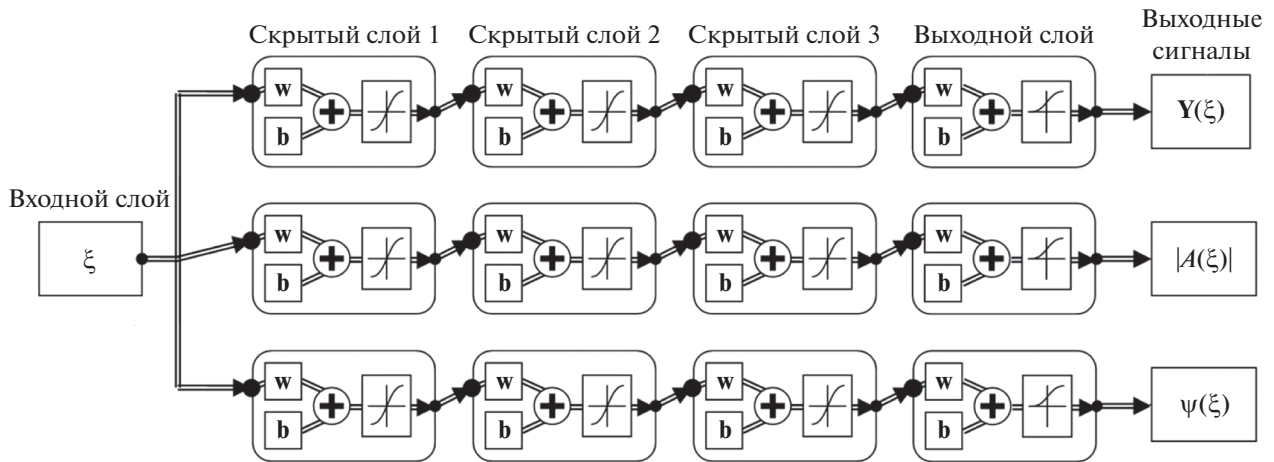


Рис. 1. Структура НС, предложенная в данной работе.

$a_1(x) = \text{th } x$ . Функции активации выходного слоя зависят от назначения части НС. Выходные сигналы НС формируются при помощи функции активации, описываемой сигмоидной функцией

$$a_2(x) = (1 + \exp(-x))^{-1}.$$

С учетом предлагаемой структуры НС (см. рис. 1) выходные сигналы каждой из частей НС можно представить в виде

$$Y(\xi) = a_2(\mathbf{w}_4^{(1)} a_1(\mathbf{w}_3^{(1)} a_1 \times \times (\mathbf{w}_2^{(1)} a_1 (\mathbf{w}_1^{(1)} \xi + \mathbf{b}_1^{(1)}) + \mathbf{b}_2^{(1)}) + \mathbf{b}_3^{(1)}) + \mathbf{b}_4^{(1)}); \quad (10)$$

$$|A(\xi)| = a_2(\mathbf{w}_4^{(2)} a_1(\mathbf{w}_3^{(2)} a_1 \times \times (\mathbf{w}_2^{(2)} a_1 (\mathbf{w}_1^{(2)} \xi + \mathbf{b}_1^{(2)}) + \mathbf{b}_2^{(2)}) + \mathbf{b}_3^{(2)}) + \mathbf{b}_4^{(2)}); \quad (11)$$

$$\psi(\xi) = a_2(\mathbf{w}_4^{(3)} a_1(\mathbf{w}_3^{(3)} a_1 \times \times (\mathbf{w}_2^{(3)} a_1 (\mathbf{w}_1^{(3)} \xi + \mathbf{b}_1^{(3)}) + \mathbf{b}_2^{(3)}) + \mathbf{b}_3^{(3)}) + \mathbf{b}_4^{(3)}), \quad (12)$$

где  $\mathbf{w}_j^{(i)}$  и  $\mathbf{b}_j^{(i)}$  – матрицы коэффициентов связи и векторы коэффициентов смещения  $i$ -й части и  $j$ -го слоя НС соответственно.

Нейронная сеть, представленная на рис. 1, позволяет сопоставить каждой координатной паре значение комплексной амплитуды АЭ по правилу

$$A_m = \begin{cases} |A(\xi_m)| \exp(i\psi(\xi_m)), & Y_1(\xi_m) = \max Y(\xi_m); \\ 0, & Y_1(\xi_m) \neq \max Y(\xi_m). \end{cases} \quad (13)$$

Здесь элементы вектора  $\xi_m$  рассчитываются по формуле (9) для координатной пары  $(x_m, y_m)$ .

Элементы двоичной матрицы  $\mathbf{B}$  могут быть вычислены при помощи двух соотношений

$$B_{m,n} = B_{n,m} = \begin{cases} 1, & Y_3(\xi_m) \neq \max Y(\xi_m); \\ 0, & Y_3(\xi_m) = \max Y(\xi_m); \end{cases} \quad (14)$$

$n = 1, 2, \dots, M;$

$$B_{m,m} = \begin{cases} B_{m,m}, & Y_2(\xi_m) \neq \max Y(\xi_m); \\ 0, & Y_2(\xi_m) = \max Y(\xi_m). \end{cases} \quad (15)$$

Произвольные наборы коэффициентов  $\mathbf{w}_j^{(i)}$  и  $\mathbf{b}_j^{(i)}$  приводят к формированию параметров  $\mathbf{A}, \mathbf{B}$ , относящихся к множеству допустимых решений задачи конструктивного синтеза. Для того чтобы НС приводила к формированию искомых параметров  $\mathbf{A}_0, \mathbf{B}_0$ , необходимо обучить НС.

Процесс обучения НС разделим на два этапа. Первый этап соответствует предварительной раздельной настройке каждой части НС, а второй – совместному обучению всех частей НС. Предварительную настройку частей НС можно выполнить на основании следующих соображений.

Все реально существующие АР, которые содержат активные и пассивные элементы, строят таким образом, что активные элементы располагаются в центре раскрыва, а пассивные распределяются за пределами активной области. Это позволяет выполнить предварительную настройку классифицирующей части НС по критерию минимума среднеквадратического отклонения:

$$g_3(\mathbf{w}_j^{(1)}, \mathbf{b}_j^{(1)}) = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 (\mathbf{Y}(\xi_1, \xi_2, \mathbf{w}_j^{(1)}, \mathbf{b}_j^{(1)}) - \hat{\mathbf{Y}}(\xi_1, \xi_2))^T \times \times (\mathbf{Y}(\xi_1, \xi_2, \mathbf{w}_j^{(1)}, \mathbf{b}_j^{(1)}) - \hat{\mathbf{Y}}(\xi_1, \xi_2)) d\xi_1 d\xi_2, \quad (16)$$

где

$$\hat{\mathbf{Y}}(\xi) = \hat{\mathbf{Y}}(\xi_1, \xi_2) = \begin{cases} (1, 0, 0)^T, & \xi^T \xi < U_1; \\ (0, 1, 0)^T, & U_1 \leq \xi^T \xi < U_2; \\ (0, 0, 1)^T, & U_2 \leq \xi^T \xi \leq 1; \end{cases} \quad (17)$$

$0 < U_1 < U_2 < 1$  – заданные параметры, определяющие размеры областей ААЭ и ПАЭ.

Для предварительной настройки аппроксимирующих частей НС может быть использовано амплитудно-фазовое распределение  $\hat{\mathbf{A}} = (\hat{A}_m | m = 1, 2, \dots, M)$  в раскрыве  $M$ -элементной АР, полученное методом наименьших квадратов [7]. В этом случае получим

$$\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{S}^{-1} \boldsymbol{\eta}, \quad (18)$$

где

$$\boldsymbol{\eta} = \iint_{u^2+v^2 \leq 1} F_0(u, v) \mathbf{f}^H(u, v) dudv; \quad (19)$$

$$\mathbf{S} = \iint_{u^2+v^2 \leq 1} \mathbf{f}(u, v) \mathbf{f}^H(u, v) dudv;$$

$H$  обозначает эрмитово сопряжение.

После этого для настройки соответствующих частей НС следует использовать критерии минимума целевых функций:

$$g_4(\mathbf{w}_j^{(2)}, \mathbf{b}_j^{(2)}) = \sum_{m=1}^M \left( |A(\xi_m, \mathbf{w}_j^{(2)}, \mathbf{b}_j^{(2)})| - |\hat{A}_m| \right)^2; \quad (20)$$

$$g_5(\mathbf{w}_j^{(3)}, \mathbf{b}_j^{(3)}) = \sum_{m=1}^M \left( \frac{\arg A(\xi_m, \mathbf{w}_j^{(2)}, \mathbf{b}_j^{(2)}) + \pi}{2\pi} - \frac{\arg \hat{A}_m + \pi}{2\pi} \right)^2. \quad (21)$$

Для предварительной настройки всех частей НС может быть использован широко известный метод обратного распространения ошибки.

Предварительная настройка НС позволяет существенно ускорить решение задачи конструктивного синтеза за счет обоснованного выбора начального состояния коэффициентов НС. Дальнейшее обучение НС связано с совместной настройкой коэффициентов НС в соответствии с критериями (4)–(6). Обучение НС будем осуществлять на основе генетического алгоритма [8, 9].

Сходимость любого алгоритма поисковой оптимизации, к которым относится и генетический алгоритм, зависит от порядка решаемой задачи. В связи с этим для обучения НС необходимо использовать прием, рассмотренный, например, в монографии [9]. Он состоит в том, что процесс обучения разделяют на несколько эпох, в каждой из которой происходит обучение относительно небольшого числа коэффициентов НС. Условием

выхода из генетического алгоритма в конце эпохи обучения обычно является достижение заданного числа поколений. Это связано с тем, что при обучении фрагмента НС отсутствует необходимость реализации длительного процесса. Число итераций генетического алгоритма выбирают таким образом, чтобы в течение каждой эпохи обучения при ограниченной длине популяции получать улучшение качества обучения. Число эпох обучения определяет соотношение между размерами НС и числом одновременно обучаемых коэффициентов.

После инициализации генетического алгоритма оценивают качество текущей популяции. Для оценки качества популяции в случае задания системы критериев (4)–(6) необходимо сначала выполнить скаляризацию векторной задачи. Эту процедуру сведем к следующему несложному алгоритму. На первом шаге оценим значения частных целевых функций (7) и (8), а также число активных элементов в раскрыве для текущего элемента популяции допустимых решений. На втором шаге выполним следующие преобразования:

$$g(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \begin{cases} g_1(\mathbf{A}, \mathbf{B}), & (g_2(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \geq G_2) \wedge (|\mathbf{P}^{(A)}| \leq M^{(A)}); \\ 2g_1(\mathbf{A}, \mathbf{B}), & (g_2(\mathbf{A}, \mathbf{B}) < G_2) \wedge (|\mathbf{P}^{(A)}| \leq M^{(A)}); \\ 2g_1(\mathbf{A}, \mathbf{B}), & (g_2(\mathbf{A}, \mathbf{B}) \geq G_2) \wedge (|\mathbf{P}^{(A)}| > M^{(A)}); \\ 4g_1(\mathbf{A}, \mathbf{B}), & (g_2(\mathbf{A}, \mathbf{B}) < G_2) \wedge (|\mathbf{P}^{(A)}| > M^{(A)}), \end{cases} \quad (22)$$

где  $G_2$  – пороговое значение.

Оценки качества вида (22) для каждого элемента популяции позволяют выбрать наиболее жизнеспособные решения текущей популяции и сформировать родительское множество, используемое для формирования новой популяции решений. Предлагаемый алгоритм позволяет учесть предпочтения между критериями, избежать формирования пустого множества допустимых решений и варьировать значимость требований.

Действительно, на этапе инициализации генетического алгоритма порог  $G_2$  может быть задан несколько ниже значения частной целевой функции  $g_2(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ , получаемой после предварительной настройки НС. Это позволит гарантировать, что качество предварительной настройки НС будет оцениваться при помощи первой строки выражения (22). Изменение коэффициентов НС будет приемлемым, если достигнутое качество аппроксимации заданной ДН будет несколько улучшено при некотором компромиссе с критерием (5) или качественно улучшено при нарушении требования (6) или заметном ухудшении значения частной целевой функции (8).

Реализация остальных этапов генетического алгоритма не содержит каких-либо особенностей и не требует подробного рассмотрения.

После окончания ряда шагов генетического алгоритма осуществляют изменение списка обучаемых коэффициентов НС и регулируют значение порога  $G_2$ , увеличивая его вслед за значением частной целевой функции  $g_2(\mathbf{A}, \mathbf{B})$ , соответствующим наилучшему решению по результатам работы генетического алгоритма.

Процесс обучения НС можно считать законченным после достижения необходимого качества решения с точки зрения значений частных целевых функций или после выполнения заданного числа эпох обучения.

В связи с этим предлагаемый метод конструктивного синтеза АР с учетом взаимного влияния элементов сводится к использованию нейросетевого подхода и выполнению следующих операций:

- формированию структуры НС, соответствующей рис. 1;
- предварительной независимой настройке частей НС;
- обучению НС фрагментов общей НС на основе методов поисковой оптимизации по заданным критериям. При этом взаимное влияние элементов в составе АР учитывает математическая модель АР вида (3) с разделением АЭ на три класса: ААЭ, ПАЭ и НАЭ.

Новизна предлагаемого метода конструктивного синтеза АР состоит в использовании соответствующей структуры НС, математической модели АР вида (3) и совокупности критериев (4)–(6) выбора решения.

## 2. ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

В качестве примера рассмотрим решение задачи конструктивного синтеза АР тонких полуволновых вибраторов, расположенных в узлах прямоугольной сетки с горизонтальным шагом  $d_x = 0.52\lambda$  и вертикальным шагом  $d_y = 0.48\lambda$  и ориентированных вдоль оси  $Ox$ . Будем считать, что синтезируемая АР должна вписываться в прямоугольный раскрыв, состоящий из  $40 \times 40$  элементов.

Для расчета матрицы взаимных сопротивлений  $\mathbf{Z}$  использовались соотношения метода наводимых ЭДС и выражения для расчета электромагнитного поля в ближней зоне вибратора, приведенные в [10].

Представим заданную амплитудную ДН  $F_0(u, v)$  в виде произведения двух функций  $F_1(u)$  и  $F_2(v)$ , которые определим с помощью выражений

$$F_1(u) = \begin{cases} \cos\left(45^\circ \frac{u}{\sin(3^\circ)}\right), & |u| \leq \sin 6.1^\circ; \\ 0, & |u| > \sin 6.1^\circ; \end{cases} \quad (23)$$

$$F_2(v) = \begin{cases} 0.707 \frac{\sin^2 2^\circ}{v^2}, & v \geq \sin 2^\circ; \\ \cos\left(45^\circ \frac{v}{\sin 2^\circ}\right), & |v| < \sin 2^\circ; \\ 0, & v \leq -\sin 2^\circ, \end{cases} \quad (24)$$

где  $u$  и  $v$  – направляющие косинусы, связанные со сферической системой координат соотношениями  $u = \sin \theta \cos \phi$ ,  $v = \sin \theta \sin \phi$ .

Весовая функция  $\rho(u, v) = 2$  при  $F_0(u, v) = F_1(u) F_2(v) > 0$ , в остальных направлениях  $\rho(u, v) = 1$ .

Требуется найти решение задачи конструктивного синтеза, являющееся наилучшим в смысле критериев (4)–(6) при условии, что  $M^{(A)} = 1300$ .

Для решения задачи использовалась НС, представленная на рис. 1. При этом число нейронов в скрытых слоях выбрано равным  $N1 = 100$ ,  $N2 = 300$ ,  $N3 = 100$ . Начальные значения коэффициентов связи и смещения сформированы при помощи датчика случайных чисел, распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием. Величина дисперсии для первых двух частей НС выбрана близкой к единице, поскольку динамический диапазон выходных сигналов НС должен быть большим. Дисперсия случайной величины при формировании коэффициентов НС третьей части выбрана значительно меньше, поскольку при предварительной настройке на выходе данной части НС должно формироваться синфазное распределение в раскрыве АР.

Предварительная настройка классифицирующей части НС была выполнена при использовании параметров  $U_1 = 0.6$  и  $U_2 = 0.8$ , входящих в выражение (17).

Предварительная настройка всех частей НС осуществлялась в течение 500 итераций. При этом временные затраты на предварительное обучение составили около 5 мин.

На рис. 2 представлена конфигурация раскрыва, а на рис. 3а, 3б – распределения амплитуд и фаз в раскрыве АР после предварительной настройки. Значения частных целевых функций (7) и (8) после предварительной настройки НС составили 0.0093 и 0.1516 соответственно. Распреде-

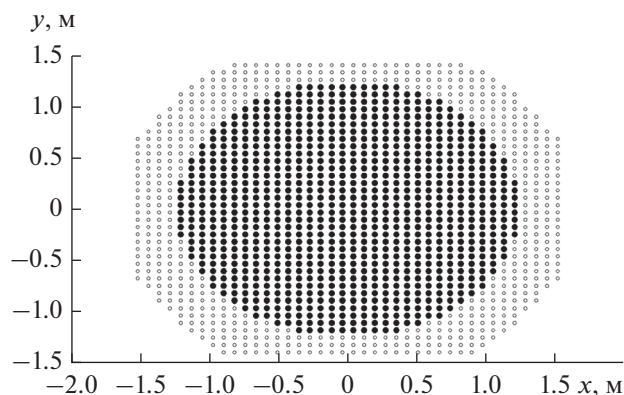


Рис. 2. Распределение групп ААЭ (в центре) и ПАЭ в раскрыве плоской АР после предварительной настройки НС.

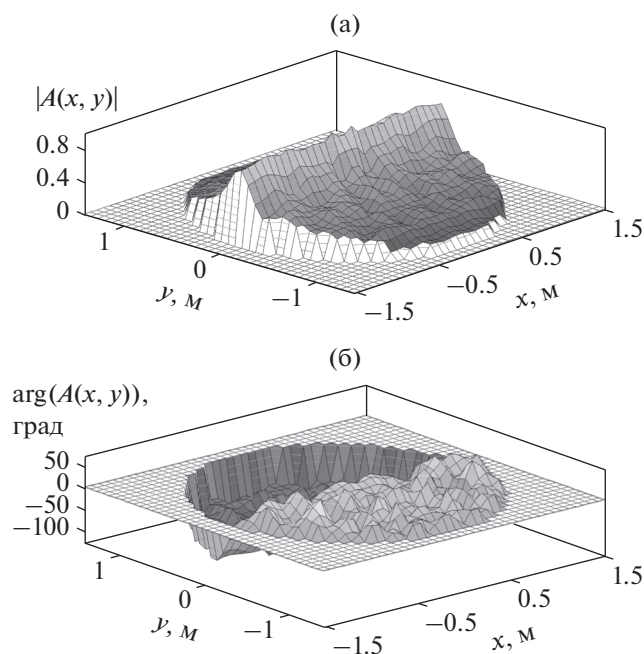


Рис. 3. Амплитудное (а) и фазовое (б) распределения в раскрыве АР после предварительной настройки НС.

ление числа элементов в группах ААЭ, ПАЭ и НАЭ составило 868, 279 и 453 соответственно.

Качество формируемой ДН после предварительной настройки отражает рис. 4, на котором приведены вертикальные сечения заданной и формируемой ДН и горизонтальное сечение формируемой ДН.

Общая настройка НС осуществлялась по 30 спискам коэффициентов НС. Каждый список состоял из 300 номеров коэффициентов в каждой части НС (т.е. общее число одновременно обучаемых коэффициентов НС составляло 900). Список содержал коэффициенты смещения выходного слоя и последнего скрытого слоя. Номера

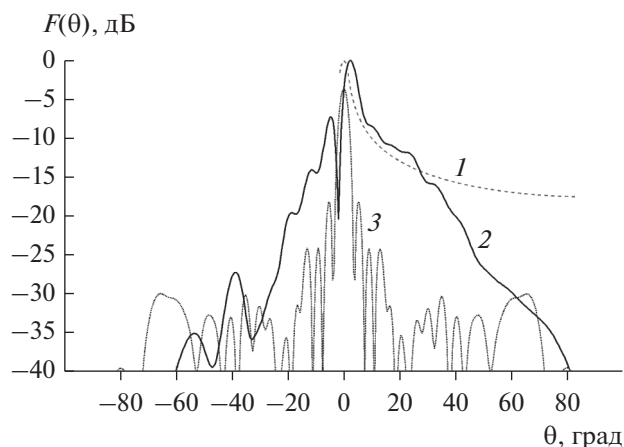


Рис. 4. Вертикальные сечения заданной (1) и формируемой ДН (2) и горизонтальное сечение формируемой ДН (3) после предварительной настройки НС.

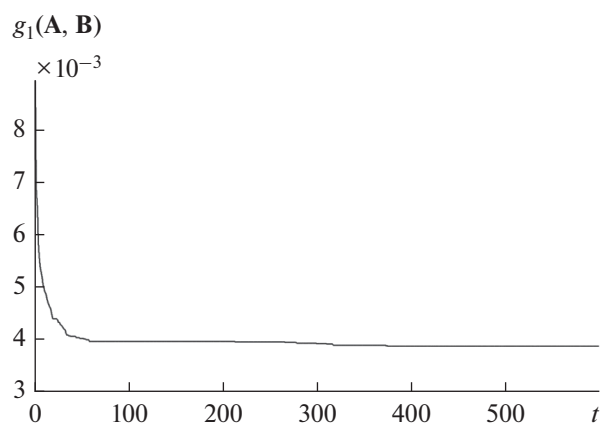
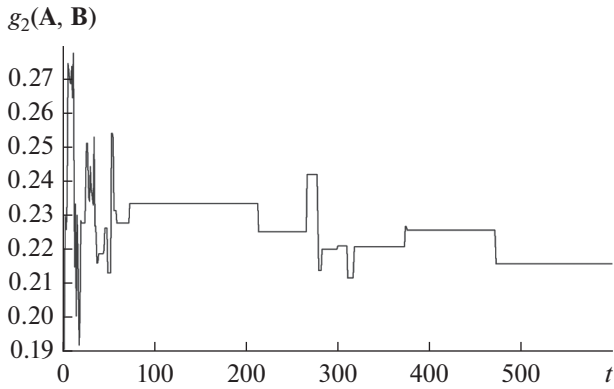


Рис. 5. Сходимость решения по критерию минимума СКО ДН АР от заданной ДН.

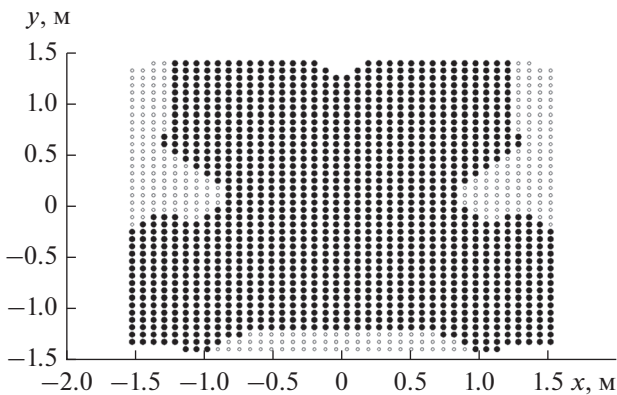
остальных обучаемых коэффициентов выбирали с помощью датчика случайных чисел.

Для определения коэффициентов НС из сформированного списка был использован генетический алгоритм. Длина популяции выбрана равной 200, длина родительского множества – равной 5. При формировании новой популяции использовали стандартные параметры генетического алгоритма:  $p_c = 0.2$  – вероятность скрещивания (вероятность того, что хромосома будет содержать ген не самого лучшего родителя) и  $p_m = 0.1$  – вероятность мутации текущего гена. Каждая популяция включала в свой состав элементы родительского множества, чтобы обеспечить преемственность качества решения от одного поколения к другому.

В течение одной эпохи обучения число шагов генетического алгоритма было равно 20. При этом общее число итераций процесса обучения с учетом 30 эпох обучения составило 600. На рис. 5 и 6 представлены зависимости значений частных



**Рис. 6.** Изменение частной целевой функции  $g_2(A, B)$  в зависимости от номера шага  $t$  итерационного процесса обучения.



**Рис. 7.** Распределение групп ААЭ и ПАЭ в раскрыве АР.

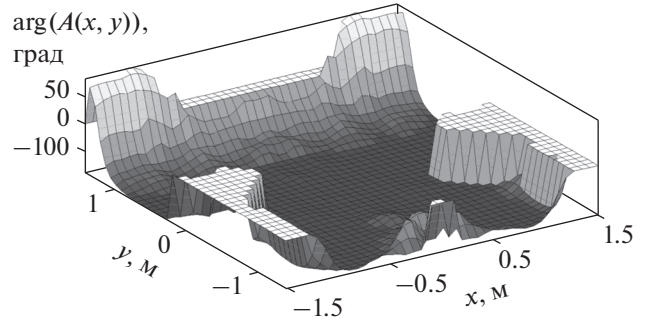
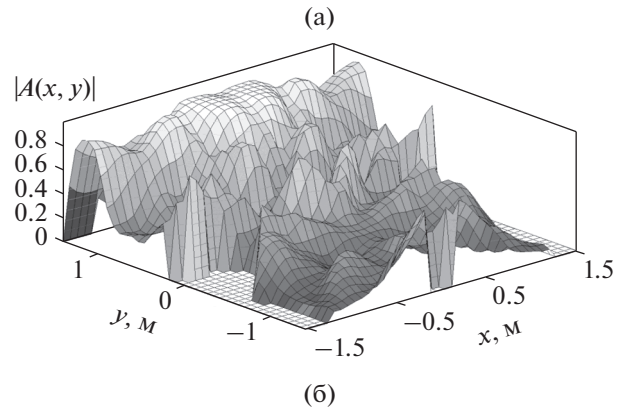
целевых функций (7) и (8) от номера шага  $t$  процесса обучения.

На рис. 7, 8а и 8б приведены результаты решения задачи конструктивного синтеза АР предлагаемым методом: размещение ААЭ и ПАЭ в раскрыве, амплитудное и фазовое распределение в активной части раскрыва после обучения НС.

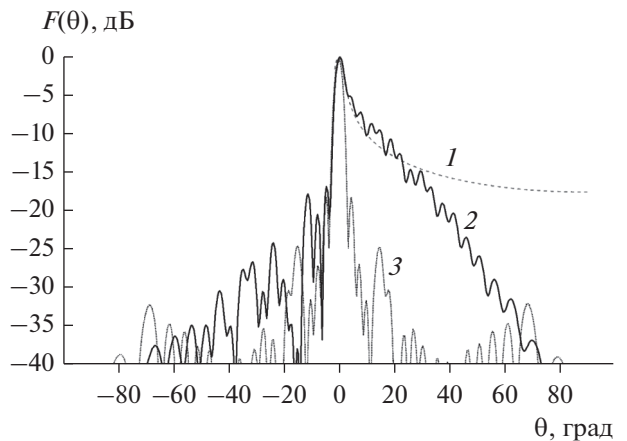
В результате обучения значение частной целевой функции (7) было снижено до 0.0039. Значение частной целевой функции (8) выросло до 0.2158. Число ААЭ, ПАЭ и НАЭ стало равно 1288, 292 и 20 соответственно.

На рис. 9 приведены главные сечения ДН АР после обучения НС.

Анализ полученных результатов показывает, что применение нейросетевого подхода позволяет получать решения задач многокритериального конструктивного синтеза АР с учетом взаимной связи между элементами. При этом получаемое решение позволяет оценивать не только координаты ААЭ, но и формировать конфигурацию раскрыва, включающего ПАЭ.



**Рис. 8.** Амплитудное (а) и фазовое (б) распределения в раскрыве АР после обучения НС.



**Рис. 9.** Вертикальные сечения заданной (1) и формируемой ДН (2) и горизонтальное сечение формируемой ДН (3) после решения задачи конструктивного синтеза.

Результаты решения задачи синтеза значительно зависят от совокупности заданных критериев. Так, если исключить ограничение на число элементов АР (критерий (6)), то число ААЭ будет соизмеримо с заданным значением  $M$ . Если отказаться от критерия (5), то ААЭ могут быть распределены в раскрыве АР в виде нескольких изолированных областей. Сопоставление ДН, представленных на



рис. 4 и рис. 9, позволяет сделать вывод, что при решении задачи синтеза в число частных целевых функций следует добавить показатель, отражающий гладкость ДН на косекансном участке. В связи с этим при реализации предлагаемого метода необходимо особое внимание уделять формализации требований к решению задачи конструктивного синтеза АР и используемому подходу к скаляризации векторной задачи оптимизации.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложенный метод конструктивного синтеза АР отличается от известных учетом взаимного влияния антенных элементов и применением нейросетевого подхода для выбора координат активных и пассивных АЭ.

2. Полученные результаты подтвердили работоспособность разработанного метода многокритериального конструктивного синтеза АР с учетом взаимной связи между элементами по требованиям к форме ДН, энергетическим характеристикам и числу активных элементов в раскрыве.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зелкин Е.Г., Соколов В.Г.* Методы синтеза антенн: фазированные антенные решетки и антенны с непрерывным раскрывом. М.: Сов. радио, 1980.
2. *Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф., Гусевский В.И.* Конструктивные методы аппроксимации в теории антенн. М.: Сайнс-Пресс, 2005.
3. *Войтович Н.Н., Кацеленбаум Б.З., Сивов А.Н. и др.* Электродинамика антенн с полупрозрачными поверхностями: Методы конструктивного синтеза. М.: Наука, 1989.
4. *Безуглов А.А., Мищенко С.Е., Шацкий В.В.* // Труды 3-й Всерос. микроволн. конф. Москва, 25–27 ноября 2015. С. 100.
5. *Безуглов А.А., Мищенко С.Е., Шацкий В.В.* // Антенны. 2015. № 12. С. 3.
6. *Mishchenko S.E., Shatskij V.V., Eliseev D.Y. et al.* // Proc. Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), Divnomorsk, Russia, 2019. P. 256. <https://doi.org/10.1109/RSEMW.2019.8792730>
7. *Бахрах Л.Д., Кременецкий С.Д.* Синтез излучающих систем. Теория и методы расчета. М.: Сов. радио, 1974.
8. *Карпенко А.П.* Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014.
9. *Назаров А.В., Лоскутов А.И.* Нейросетевые алгоритмы прогнозирования и оптимизации. СПб.: Наука и техника, 2003.
10. *Марков Г. Т., Сазонов Д.М.* Антенны. М.: Энергия, 1975.