

АНТЕННО-ФИДЕРНЫЕ
СИСТЕМЫ

УДК 621.396.677

СИНТЕЗ УПРАВЛЯЕМЫХ НУЛЕЙ В ДИАГРАММЕ НАПРАВЛЕННОСТИ
ПЛОСКОЙ ФАЗИРОВАННОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДИАГРАММ© 2019 г. В. А. Кашин¹, *, Ю. А. Хмеленко¹, И. С. Шурыгина¹¹ПАО “НПО “Алмаз”,

Российская Федерация, 125190 Москва, Ленинградский просп., 80/16

*E-mail: info@raspletin.com

Поступила в редакцию 04.09.2018 г.

После доработки 04.09.2018 г.

Принята к публикации 16.10.2018 г.

Для плоской фазированной антенной решетки предложен метод синтеза управляемых нулей в диаграмме направленности в направлениях помех. Показано, что для решения задачи достаточно считать амплитудно-фазовое распределение только для одной строки (или столбца) антенных элементов, располагаемых на раскрытии решетки в узлах сетки с прямоугольной либо гексагональной ячейками.

DOI: 10.1134/S0033849419080084

ВВЕДЕНИЕ

Работа [1] была одной из первых, в которой рассматривали формирование управляемых нулей в диаграмме направленности антенной решетки в направлениях помех путем одновременного управления фазами и амплитудами антенных элементов. Однако используемый в ней матричный метод для определения соответствующих амплитуд и фаз требует обращения матриц, размерность которых растет с ростом числа антенных элементов. В случае реализации данного метода на практике при большом числе элементов это приводит к проблеме обеспечения необходимого быстродействия используемых вычислительных средств.

В работе [2] для решения задачи об управляемых нулях путем одновременного управления амплитудами и фазами представлен иной подход, использующий метод парциальных диаграмм направленности. При этом в вычислительном отношении решение задачи гораздо проще, так как метод оперирует с матрицами, размерность которых соответствует числу формируемых нулей. В указанной работе была рассмотрена линейная антенная решетка и показано, что возмущенная диаграмма направленности представляется в виде суммы парциальных диаграмм линейного раскрытия.

В данной работе в отличие от [2] рассмотрена задача формирования нулей применительно к плоской эквидистантной фазированной антенной решетке (ФАР). Если в [2] направление на помеху задавали значением одного угла φ , отсчи-

тываемого от оси решетки, и задача рассматривалась в одномерном пространстве, то в случае плоской ФАР направление на помеху задается значениями двух углов, φ и θ , сферической системы координат, и задача синтеза нулей решается в двумерном пространстве углов. При этом используется формирование парциальных диаграмм плоского раскрытия.

1. ВЫБОР ВИДА
ПАРЦИАЛЬНЫХ ДИАГРАММ ДЛЯ ФАР
С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЯЧЕЙКОЙ

В теории антенн помимо углов φ и θ используются обобщенные углы u и v , связанные с φ и θ соотношениями

$$u = \sin \theta \cos \varphi, \quad v = \sin \theta \sin \varphi. \quad (1)$$

Как будет показано ниже, двумерную задачу синтеза управляемых нулей в пространстве углов u и v можно свести к одномерной. Метод решения задачи представлен для ФАР как с прямоугольной ячейкой расположения излучателей, так и для гексагонального расположения. В соответствии с предложенным методом формирования управляемых нулей достаточно определить амплитуды и фазы антенных элементов только для одной строки (столбца) решетки и присвоить те же значения амплитуд и фаз антенным элементам других строк (столбцов).

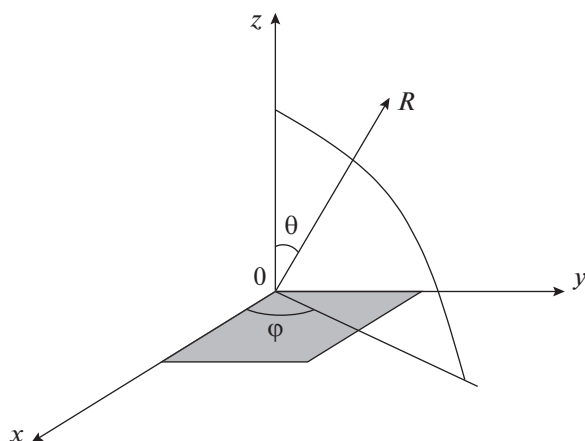


Рис. 1. Используемая система координат.

Сначала рассмотрим методологию формирования управляемых нулей для плоской решетки с прямоугольной ячейкой.

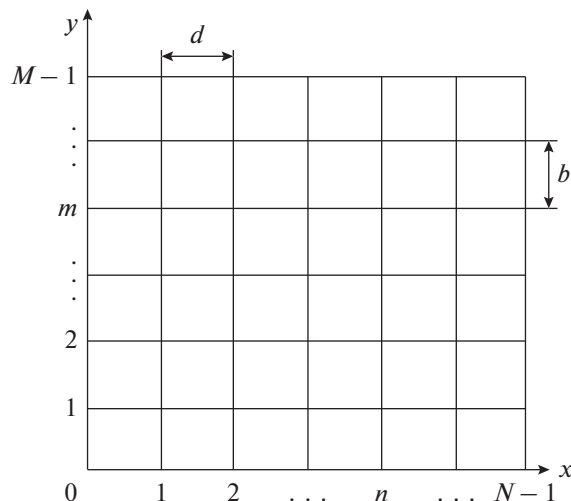
Введем декартову систему координат x, y, z и совмещенную с ней сферическую систему φ, θ, R (рис. 1). ФАР имеет N столбцов и M строк, нумерация которых соответствует изображению структуры решетки на рис. 2. Плоскость XOY декартовой системы (см. рис. 1) совмещаем с плоскостью раскрытия решетки. Расстояния между строками и столбцами равны b и d соответственно. Амплитудное возбуждение полагаем равномерным. Без нарушения общности предлагаемой методологии считаем излучатели антенных элементов изотропными.

Тогда невозмущенную (начальную) диаграмму направленности можем представить в виде двойного ряда:

$$F(u, v) = \frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[iknd(u - u_0)] \times \sum_{m=0}^{M-1} \exp[ikmb(v - v_0)], \quad (2)$$

где $u = \sin \theta \cos \varphi$, $v = \sin \theta \sin \varphi$, $u_0 = \sin \theta_0 \cos \varphi_0$, $v_0 = \sin \theta_0 \sin \varphi_0$, θ, φ — углы точки наблюдения, θ_0, φ_0 — углы, характеризующие направление отклонения луча от нормали к раскрытию антенны, k — волновое число $2\pi/\lambda$ (λ — длина волны). В соотношении (2) амплитуда возбуждения антенных элементов принята равной единице и введен нормирующий множитель $1/(NM)$.

Следуя методике, изложенной в [2], для формирования диаграммы $F_0(u, v)$ с нулями в направлении помех необходимо к диаграмме (2) добавить комбинацию парциальных диаграмм $f_q(u, v)$

Рис. 2. Расположение антенной решетки на плоскости XOY .

с максимумами, ориентированными в направлениях помех. В результате получим

$$F_0(u, v) = F(u, v) + \sum_{q=1}^Q a_q f_q(u, v), \quad (3)$$

где Q — число помех, a_q — весовой множитель.

В соответствии с выражением (2) парциальная диаграмма $f_q(u, v)$ плоского раскрытия описывается выражением

$$f_q(u, v) = \frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[iknd(u - u_q)] \times \sum_{m=0}^{M-1} \exp[ikmb(v - v_q)], \quad (4)$$

где значения обобщенных углов u_q, v_q , определяющих направление максимумов диаграмм, связаны соотношениями типа (1) с углами θ_q, φ_q , задающими направление на q -ю помеху.

Однако, как это будет показано ниже, для синтеза управляемых нулей достаточно формировать парциальные диаграммы, зависящие от одной из двух величин: либо от u_q , либо от v_q . Для определенности выбираем из двух вариантов выражение парциальной диаграммы, зависящей от величины u_q , в виде

$$f_q(u, v) = \frac{1}{NM} \sum_{n=0}^{N-1} \exp[iknd(u - u_q)] \times \sum_{m=0}^{M-1} \exp[ikmb(v - v_0)] \quad (5)$$

с заменой v_q на v_0 .

Подчеркнем, что выбор парциальной диаграммы направленности, зависящей только от одного из двух параметров, определяющих направление на помеху, имеет ключевое значение для предлагаемого метода формирования нулей.

2. ДИАГРАММА НАПРАВЛЕННОСТИ С СИНТЕЗИРОВАННЫМИ НУЛЯМИ В НАПРАВЛЕНИЯХ ПОМЕХ ДЛЯ ФАР С ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЯЧЕЙКОЙ

Результирующая диаграмма $F_0(u, v)$ (см. формулу (3)) описывается выражением

$$F_0(u, v) = \frac{1}{NM} \left[\sum_{n=0}^{N-1} \exp[iknd(u - u_0)] + \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{q=1}^Q a_q \exp[iknd(u - u_q)] \right] \times \sum_{m=0}^{M-1} \exp[ikmb(v - v_0)], \quad (6)$$

где величины a_q подлежат определению.

Входящие в соотношение (6) суммы по индексам n и m могут быть легко вычислены:

$$\sum_{n=0}^{N-1} \exp[iknd(u - u_0)] = \exp\left[\frac{ik(N-1)d(u - u_0)}{2}\right] \times \frac{\sin[Nkd(u - u_0)/2]}{\sin[kd(u - u_0)/2]}, \quad (7)$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} \exp[iknd(u - u_q)] = \exp\left[\frac{ik(N-1)d(u - u_q)}{2}\right] \times \frac{\sin[Nkd(u - u_q)/2]}{\sin[kd(u - u_q)/2]}, \quad (8)$$

$$\sum_{m=0}^{M-1} \exp[ikmb(v - v_0)] = \exp\left[\frac{ik(M-1)b(v - v_0)}{2}\right] \times \frac{\sin[Mkb(v - v_0)/2]}{\sin[kb(v - v_0)/2]}. \quad (9)$$

На основании выражений (6)–(9) можно получить (с точностью до несущественного фазового множителя) следующее соотношение:

$$F_0(u, v) = \left\{ \frac{\sin[Nkd(u - u_0)/2]}{N \sin[kd(u - u_0)/2]} + \sum_{q=1}^Q a_q \exp\left[\frac{ik(N-1)d(u_0 - u_q)}{2}\right] \times \frac{\sin[Nkd(u - u_q)/2]}{N \sin[kd(u - u_q)/2]} \right\} \frac{\sin[Mkb(v - v_0)/2]}{M \sin[kb(v - v_0)/2]}. \quad (10)$$

Введем обозначение:

$$A_q = a_q \exp\left\{\frac{ik(N-1)d(u_0 - u_q)}{2}\right\}. \quad (11)$$

Для обращения в нуль функции $F_0(u, v)$ в точках $u_q (q = 1, \dots, Q)$ необходимо, как это следует из (10), обращение в нуль в этих точках величины в круглых скобках этого выражения. В результате приходим к следующей системе линейных уравнений относительно A_q :

$$\begin{vmatrix} h_1(u_1) & h_2(u_1) & \dots & h_Q(u_1) \\ h_1(u_2) & h_2(u_2) & \dots & h_Q(u_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_1(u_Q) & h_2(u_Q) & \dots & h_Q(u_Q) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_Q \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} H(u_1) \\ H(u_2) \\ \vdots \\ H(u_Q) \end{vmatrix}, \quad (12)$$

где

$$H(u_r) = \frac{\sin[Nkd(u_r - u_0)/2]}{N \sin[kd(u_r - u_0)/2]}, \quad (13)$$

$$h_q(u_r) = \frac{\sin[Nkd(u_r - u_q)/2]}{N \sin[kd(u_r - u_q)/2]}.$$

Чтобы найти амплитудно-фазовое распределение, обеспечивающее диаграмме (6) формирование нулей в направлениях на помехи, представим сначала эту диаграмму в виде

$$F_0(u, v) = \frac{1}{NM} \left\{ \sum_{n=0}^{N-1} \exp[iknd(u - u_0)] \times \left[1 + \sum_{q=1}^Q a_q \exp[iknd(u_0 - u_q)] \right] \right\} \times \frac{\sin[Mkb(v - v_0)/2]}{\sin[kb(v - v_0)/2]}, \quad (14)$$

а затем учтем, что, как следует из (11),

$$a_q = A_q \exp\left\{-\frac{ik(N-1)d(u_0 - u_q)}{2}\right\}. \quad (15)$$

Выражение в квадратных скобках формулы (14) является амплитудно-фазовым распределением $P_n \exp(i\varphi_n)$, формирующим нули диаграммы (3) в направлениях помех. Для этого амплитудно-фазового распределения получим следующее выражение:

$$B_n = 1 + \sum_{q=1}^Q A_q \exp\left\{\frac{ik(N-1)d(u_q - u_0)}{2}\right\} \times \exp[iknd(u_0 - u_q)]. \quad (16)$$

Если ввести обозначение

$$\beta_q = \frac{(N-1)kd(u_q - u_0)}{2}, \quad (17)$$

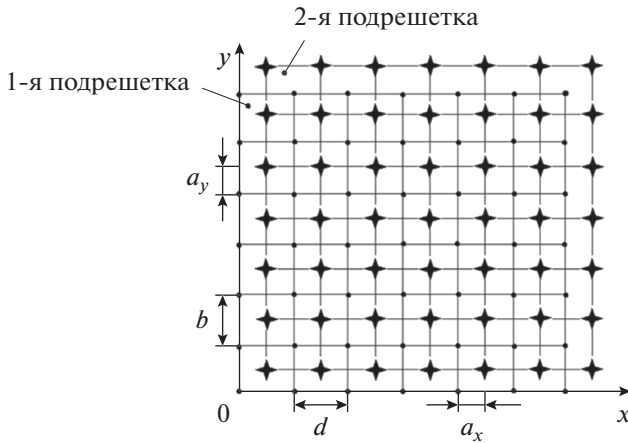


Рис. 3. Разбиение антенной решетки с гексагональным расположением элементов на две подрешетки с прямоугольной ячейкой.

то выражение (16) примет вид

$$B_n = 1 + \sum_{q=1}^Q A_q \exp[i(\beta_q - knd(u_q - u_0))]. \quad (18)$$

Величины B_n являются комплексными:

$$\begin{cases} B_n = \operatorname{Re} B_n + i \operatorname{Im} B_n, \\ \operatorname{Re} B_n = 1 + \sum_{q=1}^Q A_q \cos(\beta_q - knd(u_q - u_0)), \\ \operatorname{Im} B_n = \sum_{q=1}^Q A_q \sin(\beta_q - knd(u_q - u_0)). \end{cases} \quad (19)$$

Из соотношений (19) определяем нормированное амплитудное распределение по мощности

$$P_n = \frac{|B_n|^2}{|B_n^{\max}|^2} = \frac{|\operatorname{Re} B_n|^2 + |\operatorname{Im} B_n|^2}{|B_n^{\max}|^2} \quad (20)$$

($|B_n^{\max}|^2$ — максимальное значение амплитуды) и фазовое распределение

$$\varphi_n = \begin{cases} \arctg \frac{\operatorname{Im} B_n}{\operatorname{Re} B_n}, & \text{если } \operatorname{Re} B_n \geq 0, \\ \arctg \frac{\operatorname{Im} B_n}{\operatorname{Re} B_n} + \pi, & \text{если } \operatorname{Re} B_n < 0. \end{cases} \quad (21)$$

Амплитудное распределение (20) реализуется с помощью регулирования аттенуаторов в каждом канале ФАР, а фазовое распределение (21) — с помощью управления фазовращателями. К фазовой части выражения (18), описываемой соотношением (21), необходимо добавить фазовое распределение на поворот луча в направлении u_0, v_0 . Резуль-

тирующее фазовое распределение описывается выражением

$$\Psi_{nm} = \varphi_n + \gamma_{nm}, \quad (22)$$

где φ_n определяется выражением (21), а γ_m имеет вид

$$\gamma_m = -k(ndu_0 + mbv_0). \quad (23)$$

3. РАСПРОСТРАНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ФАР С ГЕКСАГОНАЛЬНЫМ РАСПОЛОЖЕНИЕМ АНТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрим особенности формирования нулей в ФАР с гексагональной сеткой узлов, где располагаются антенные элементы.

ФАР с гексагональной сеткой расположения элементов с расстоянием между столбцами и строками a_x и a_y соответственно можно представить в виде комбинации двух подрешеток, каждая из которых имеет сетку с прямоугольными ячейками. Подобное разбиение на две подрешетки поясняет рис. 3. Обе подрешетки имеют шаги расположения элементов $d = 2a_x$ и $b = 2a_y$ вдоль строк и столбцов. В каждой из подрешеток N столбцов и M строк.

Очевидно, что диаграмму направленности решетки с гексагональным расположением элементов $F(u, v)$ можно представить в виде суммы:

$$F(u, v) = F_1(u, v) + F_2(u, v), \quad (24)$$

где диаграммы направленности $F_1(u, v)$ и $F_2(u, v)$ первой и второй подрешеток имеют вид

$$F_1(u, v) = \frac{\sin[Nkd(u - u_0)/2]}{N \sin[kd(u - u_0)/2]} \times \frac{\sin[Mkb(v - v_0)/2]}{M \sin[kd(v - v_0)/2]}, \quad (25)$$

$$F_2(u, v) = \exp\left(\frac{ikdu}{2} + \frac{ikbv}{2}\right) F_1(u, v). \quad (26)$$

Здесь величины u_0, v_0 задают направление отклонения луча решетки от нормали, а $F_2(u, v)$ отличается от $F_1(u, v)$ фазовым множителем из-за сдвига столбцов и строк двух подрешеток на величины $d/2$ и $b/2$ соответственно.

Из соотношений (25) и (26) следует, что задача формирования управляемых нулей в решетке сводится к задаче формирования управляемых нулей в первой подрешетке с начальной диаграммой направленности $F_1(u, v)$.

Амплитудно-фазовое распределение, обеспечивающее формирование нулей в первой подрешетке в направлениях прихода Q помех u_q, v_q ($q = 1, 2, \dots, Q$), имеет вид (18), где для определения

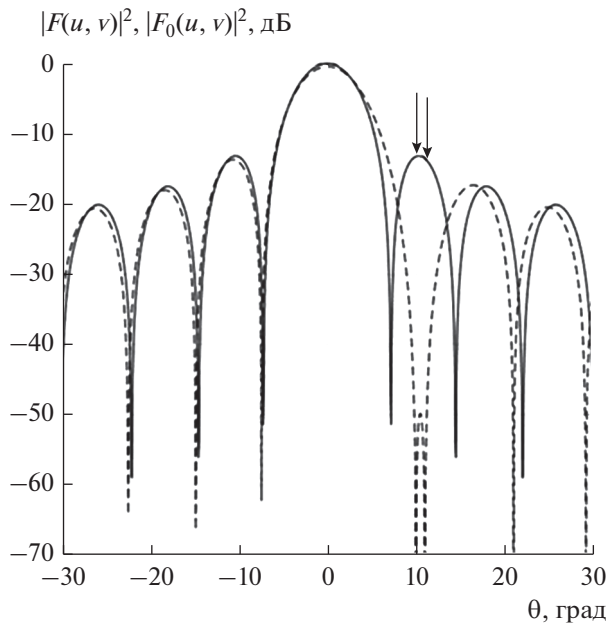


Рис. 4. Сечение диаграммы направленности до (сплошная кривая) и после (штриховая кривая) формирования управляемых нулей. Плоскость $\varphi = 0^\circ$, $\eta = 0.9524$.

величин A_q и β_q используются процедуры (12) и (17).

Амплитудно-фазовое распределение, формирующее управляемые нули для второй подрешетки то же самое, что и для первой, при этом учитывается, что нумерация антенных элементов по индексу n соответствует столбцам, сдвинутым на расстояние $d/2 = a_x$ по отношению к столбцам первой подрешетки.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты, представленные на рис. 4–9, относятся к антенной решетке, содержащей 256 изотропных антенных элементов, расположенных вдоль 16 строк и 16 столбцов в узлах квадратной ячейки с длиной стороны, равной $\lambda/2$ (λ –длина волны). Рисунок 4 соответствует случаю двух близко расположенных помех в плоскости $\varphi = 0^\circ$ с углами относительно нормали к раскрыву решетки $\theta_1 = 10^\circ$, $\theta_2 = 11^\circ$. Главный луч направлен вдоль нормали к раскрыву. На рисунке изображены сечения в плоскости $\varphi = 0^\circ$ диаграмм направленности решетки до (сплошная кривая) и после (штриховая кривая) формирования нулей в помеховых направлениях. Соответствующие амплитудное и фазовое распределения вдоль строк антенных элементов, формирующие нули в направлениях помех, представлены на рис. 5а, 5б. Значение коэффи-

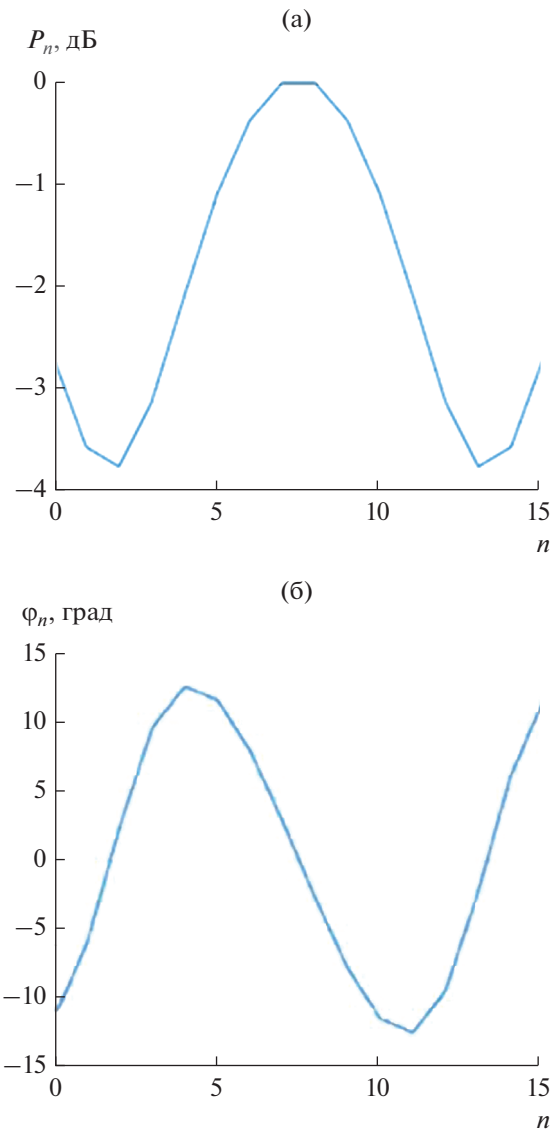


Рис. 5. Огибающая амплитудного (а) и фазового (б) распределений вдоль строк.

циента усиления после формирования нулей, нормированного к коэффициенту усиления равномерно возбужденной решетки, составило величину $\eta = 0.9524$. На рис. 6а изображена объемная диаграмма направленности ФАР до формирования управляемых нулей, а на рис. 6б–6е картографическая проекция на плоскость u, v . На рис. 6в приведена картографическая проекция объемной диаграммы после формирования управляемых нулей для случая углового расположения помех, соответствующего рис. 4. Значения координат помех на оси u есть $u_1 = 0.1736$, $u_2 = 0.1908$. Темный цвет на рис. 6б и 6в соответствует областям, где уровни диаграмм направленности превышают -50 дБ относительно максимума главного луча. Особенно-

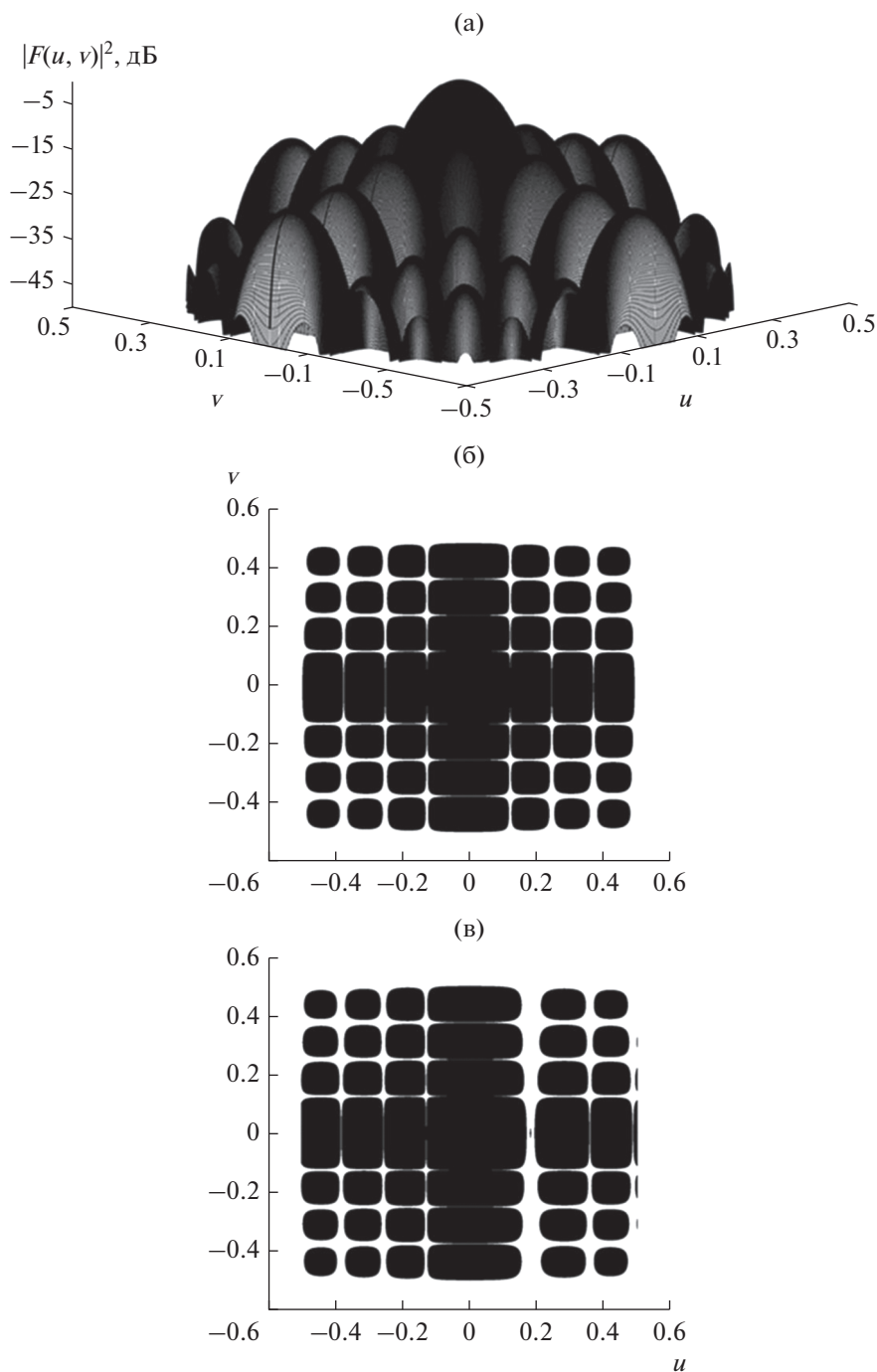


Рис. 6. Объемная диаграмма направленности ФАР до формирования управляемых нулей (а) и ее картографические проекции на плоскость (u, v) до формирования нулей (б) и после формирования управляемых нулей (в) в направлениях $u_1 = 0.1736$, $u_2 = 0.1908$.

стью предложенного метода синтеза управляемых нулей является то, что в результате синтеза формируются не точечные области нулевых значений диаграмм, а линии с нулевым значением боковых лепестков, параллельные координатной

оси v или u на плоскости углов u, v в зависимости от выбора вида парциальных диаграмм (4). Эти линии условно назовем нулевыми. Если парциальные диаграммы выбираются в виде (5), то нулевые линии параллельны оси v и будут соответ-

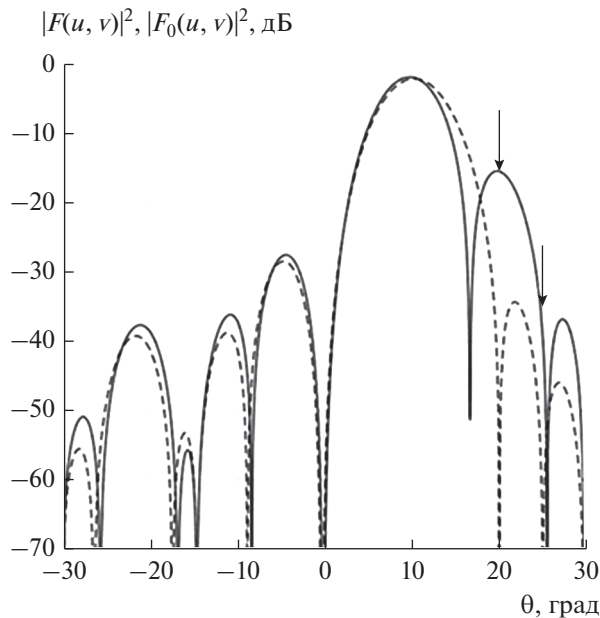


Рис. 7. Сечение диаграммы направленности до (сплошная кривая) и после (штриховая кривая) формирования управляемых нулей в плоскости расположения помех $\varphi = 30^\circ$, $\eta = 0.9396$.

ствовать одному из углов u_q помех. Вдоль нулевых линий формируются области боковых лепестков пониженного уровня. На рис. 6в области вблизи нулевых линий $u_1 = 0.1736$, $u_2 = 0.1908$ слились в довольно широкую зону пониженного значения боковых лепестков (она на рисунке не закрашена).

Рисунки 7–9 относятся к случаю луча, отклоненного на угол $\theta = 10^\circ$ от нормали в плоскости $\varphi = 45^\circ$. Две помехи были расположены в плоскости $\varphi = 30^\circ$ и имели значения полярных углов $\theta_1 = 20^\circ$ и $\theta_2 = 25^\circ$. На рис. 7 изображены сечения диаграммы направленности решетки в плоскости $\varphi = 30^\circ$ до (сплошная кривая) и после (штриховая кривая) формирования нулей в направлениях на помехи. На рис. 8а и 8б представлены соответствующие амплитудное и фазовое распределения вдоль строки антенных элементов. Нормированный коэффициент усиления $\eta = 0.9396$. На рис. 9а и 9б представлены картографические проекции объемных диаграмм на плоскость углов u , v до и после формирования нулей. Помехи на оси u имеют значения углов $u_1 = 0.2962$, $u_2 = 0.3660$. На рис. 9б видны проходящие через точки u_1 и u_2 на оси u вертикальные линии, в области которых боковые лепестки диаграммы направленности имеют пониженное значение.

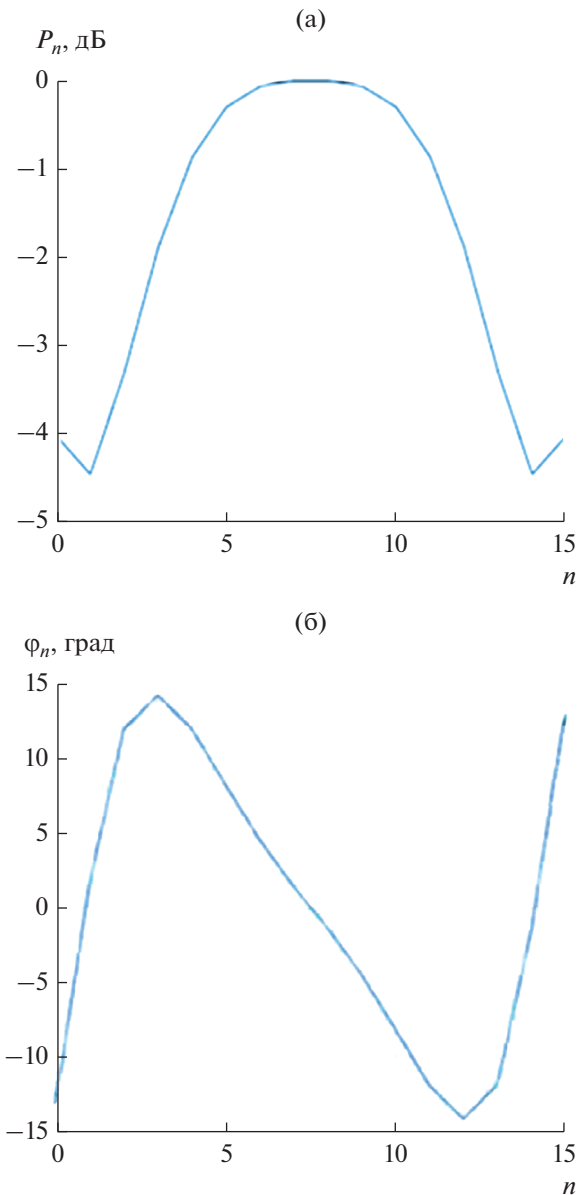


Рис. 8. Огибающая амплитудного (а) и фазового (б) распределений вдоль строк.

Расчеты, представленные на рис. 10–12, были выполнены для ФАР, содержащей 256 антенных элементов, расположенных в узлах гексагональной сетки вдоль 16 строк и 16 столбцов с одинаковым шагом вдоль строки и столбца, равным 0.5λ . Главный луч антенны был отклонен в плоскости $\varphi = 0^\circ$ на угол $\theta = 10^\circ$. Три помехи располагались в той же плоскости и имели значения полярных углов $\theta_1 = 19^\circ$, $\theta_2 = 21^\circ$, $\theta_3 = 23^\circ$.

На рис. 10 приведены сечения диаграммы направленности в плоскости $\varphi = 0^\circ$ до (сплошная

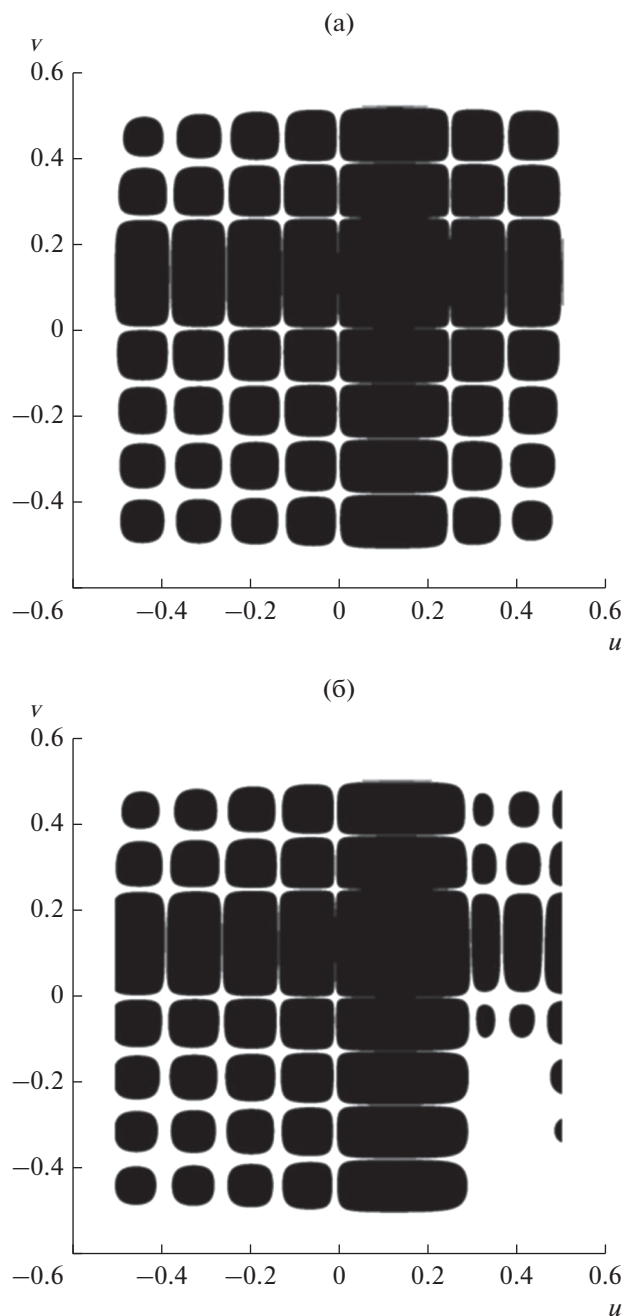


Рис. 9. Картографическая проекция объемной диаграммы направленности с отклоненным лучом до формирования нулей (а) и после формирования нулей (б) в направлениях $u_1 = 0.2962$, $u_2 = 0.3660$.

кривая) и после (штриховая кривая) формирования нулей. На рис. 11а и 11б даны амплитудное и фазовое распределения вдоль строки, обеспечивающие формирование нулей. Нормированный коэффициент усиления $\eta = 0.7394$. Рисунки 12а и 12б — это картографические проекции объемной диаграммы направленности решетки на плоскость углов u и v до и после формирования нулей. Значения

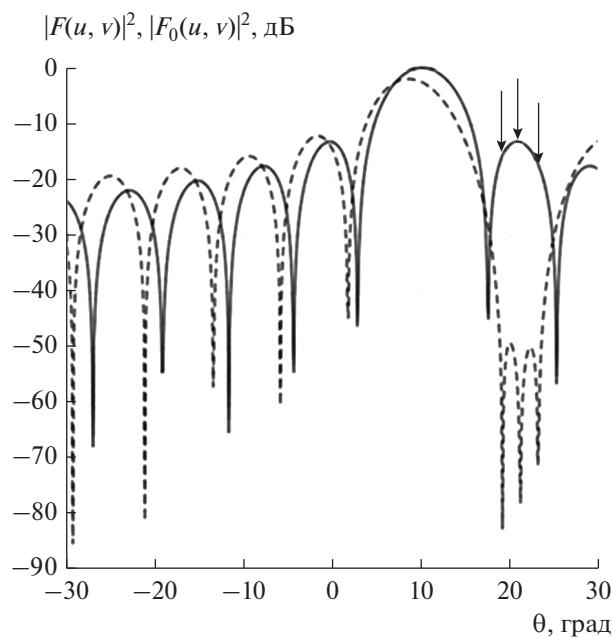


Рис. 10. Сечение диаграммы направленности до (сплошная кривая) и после (штриховая кривая) формирования управляемых нулей в плоскости расположения помех $\varphi = 0^\circ$, $\eta = 0.7394$.

ния углов помех были следующие: $u_1 = 0.3256$, $u_2 = 0.3584$ и $u_3 = 0.3907$. На рис. 12б видны области пониженных боковых лепестков вблизи вертикальных линий, проходящих через значения углов u_1 , u_2 , u_3 на оси u .

Заметим, что в выражении для начальной диаграммы направленности (2) было принято, что нулевое значение фазы имеет левый крайний элемент нижней строки (см. рис. 2). Если начало системы координат XOY перенести в центр нижней строки, то амплитудно-фазовое распределение, формирующее нули и определяемое выражением (18), будет описываться на симметричных относительно центра строки антенных элементах комплексно сопряженными величинами. В этом случае амплитудное распределение вдоль строки является симметричной функцией, а фазовое — антисимметричной. Результаты расчетов, представленные на рис. 5, 8, 11 подтверждают этот вывод.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод амплитудно-фазового синтеза нулей диаграммы направленности плоской антенной решетки, представленный в данной работе, характеризуется простотой алгоритма вычислений: достаточно определить амплитудно-фазовое распределение только для одной строки (столбца)

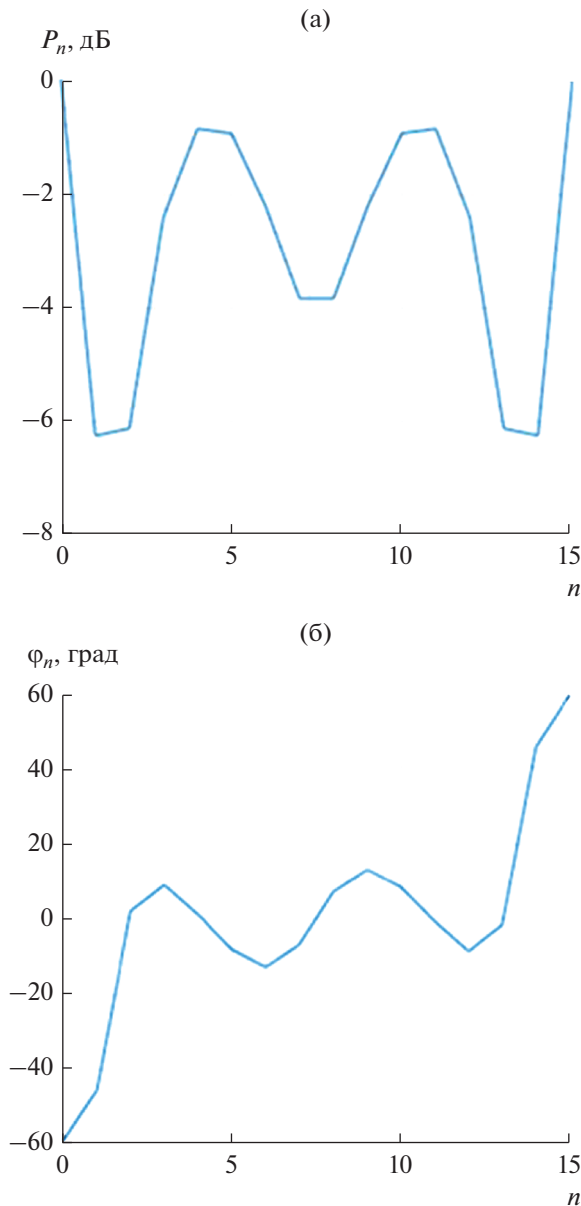


Рис. 11. Огибающая амплитудного (а) и фазового (б) распределений вдоль строк.

антенных элементов. Ввиду симметрии амплитудного распределения и антисимметрии фазового относительно центра строки (столбца) достаточно провести вычисления для половины антенных элементов одной строки (столбца).

Особенностью метода является то, что для формирования управляемых нулей достаточно использовать одно из двух значений обобщенных углов, определяющих направления на помехи. При этом формируется зона пониженных боковых лепестков вблизи прямых линий на плоско-

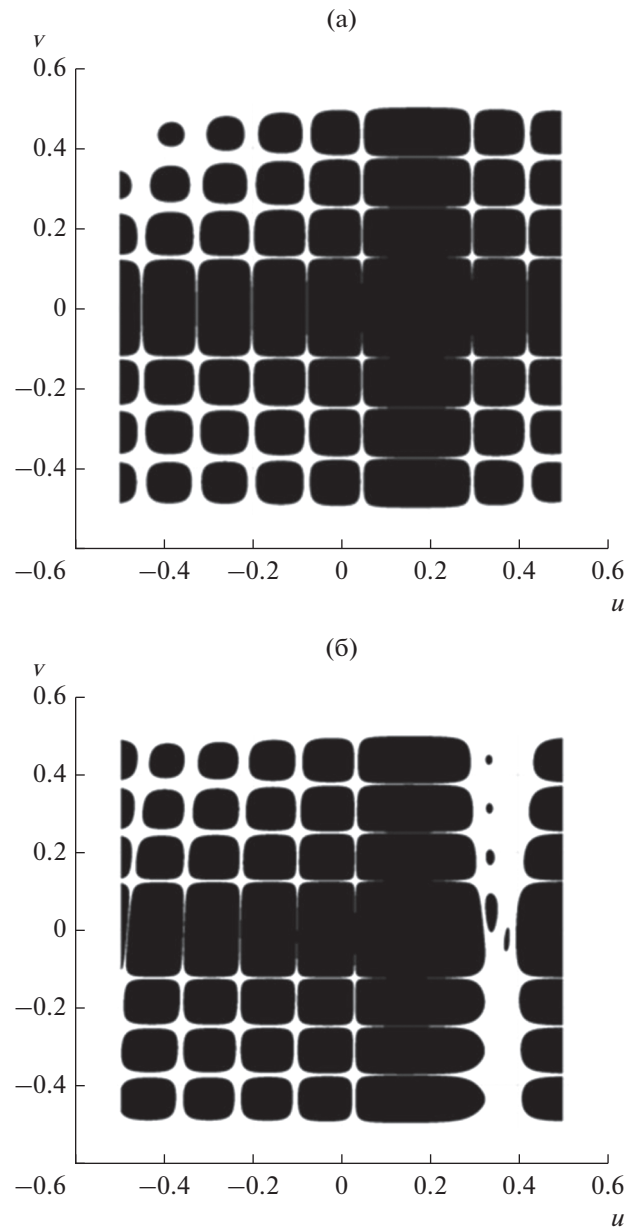


Рис. 12. Картографическая проекция объемной диаграммы направленности с отклоненным лучом до формирования нулей (а) и после формирования нулей (б) в направлениях $u_1 = 0.3256$, $u_2 = 0.3584$, $u_3 = 0.3907$.

сти u , v , задаваемых для каждой помехи одним из двух значений обобщенных углов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Drane C., McIlvenna J. // The Radio and Electronic Engineer. 1970. V. 39. № 1. P. 49.
2. Steyskal H. // IEEETrans. 1982. V. AP-30. № 2. P. 273.