

ФОРМИРОВАНИЕ СЕКТОРНЫХ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДИАГРАММ НАПРАВЛЕННОСТИ В ЛИНЕЙНОЙ РЕШЕТКЕ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН

© С.П.Скобелев

В некоторых больших антенных системах с фазированными решетками, используемых, например, для слежения за космическими объектами, сопровождение объекта осуществляется путем механического поворота всей антенны в сочетании с электронным сканированием луча в очень узком, порядка одного градуса, угловом секторе. Для обеспечения высокого коэффициента усиления во всем таком узком секторе при условии использования соответствующего минимального числа активных элементов решетка должна состоять из перекрывающихся подрешеток с амплитудными распределениями вида $\sin X/X$, дающими секторные диаграммы направленности, подавляющие побочные интерференционные максимумы множителя решетки. Такие подрешетки могут быть сформированы путем использования известных схем проходных многополюсников [1-4]. Однако так как в рассматриваемом случае межэлементные расстояния в решетке могут исчисляться десятками длин волн, то с точки зрения уменьшения длины передающих линий и упрощения конструкции представляет интерес применение альтернативного подхода, состоящего в пространственном возбуждении требуемых подрешеток, как это предложено в [5]. Этот новый подход основан на том факте, что полупрозрачные экраны типа диэлектрических пластин или проволочных сеток, облучаемые локально-плоской волной, в определенных случаях можно рассматривать как оптические аналоги направленных ответвителей. Используя этот факт, можно построить множество оптических схем формирования требуемых перекрывающихся подрешеток, состоящих из крупноапертурных зеркальных или линзовых антенн, причем такие подрешетки могут быть также использованы и как самостоятельные антенны, например в системах передачи энергии СВЧ-пучком [6]. Некоторые из таких схем без численного анализа их характеристик приведены в [5]. Цель настоящего сообщения состоит в том, чтобы продемонстрировать особенности и возможности предлагаемого подхода, используя

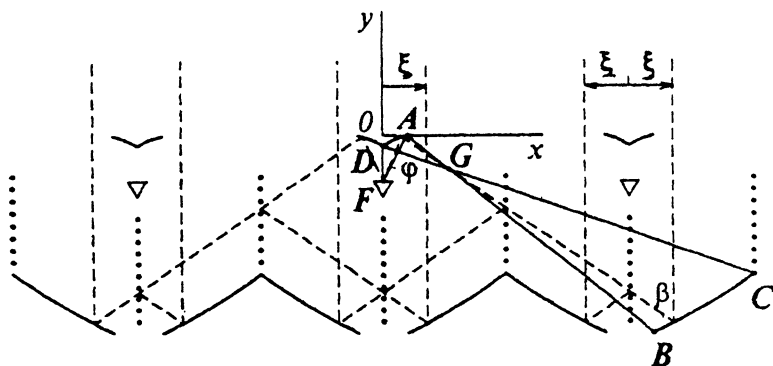


Рис. 1. Геометрия решетки связанных двухзеркальных антенн.

в качестве примера линейную решетку двухзеркальных антенн.

Решетка, сечение которой в плоскости сканирования показано на рис. 1 и геометрия которой считается не зависящей от переменной z , построена следующим образом. Каждая ее ячейка, отделенная от соседних ячеек вертикальными полупрозрачными экранами, называемыми ниже первичными, содержит основное параболическое зеркало, эллиптический контррефлектор, облучатель и полупрозрачный экран, расположенный в плоскости симметрии ячейки и называемый ниже вторичным. Особенностью данного построения является то, что основное зеркало образовано двумя параболой так, что фокус левой параболы расположен в правой соседней ячейке, а фокус правой параболы — в левой соседней ячейке. Эллиптический контррефлектор также состоит из двух частей, которые имеют общий фокус F , совпадающий с фазовым центром облучателя, и два других фокуса, совпадающие с фокусами левой и правой парабол левой и правой соседних ячеек соответственно. Волны от облучателя после отражения от контррефлектора направлены на указанные выше крайние параболы. Однако после их частичного отражения от экранов облученными оказываются параболы всех трех ячеек, что приводит к формированию трехэлементной подрешетки, являющейся оптическим аналогом однокаскадной подрешетки, рассмотренной в [4].

Геометрические параметры решетки рассчитываются следующим образом. Пусть полуширина контррефлектора a , полуширина ячейки b , подольный размер h и x -координата x_G фокуса G считаются заданными. Тогда, используя уравнение $\rho = 2f/(1 + \cos \beta)$, записанное для параболы BC в полярных координатах с центром в фокусе G

(рис. 1), а также уравнение $y - y_G = (x - x_G)^2/4f - f$, записанное для той же параболы в декартовых координатах, показанных на рис. 1, для фокусного расстояния параболы f и y -координаты ее конца C , получим

$$f = \left[y_G - y_B + \sqrt{(x_B - x_G)^2 + (y_G - y_B)^2} \right] / 2,$$

где

$$y_C = y_G + (x_C - x_G)^2/4f - f,$$

$$x_B = a + 2b,$$

$$y_B = -h, y_G = y_B(x_G - a)/2b, \text{ и } x_C = 3b.$$

Положение фокуса F контррефлектора определяется свойством эллипса, согласно которому

$$AG + AF = DG + DF, \quad (1)$$

где

$$AG = \sqrt{(x_G - a)^2 + y_G^2}, \quad AF = \sqrt{a^2 + y_F^2},$$

$$DG = \sqrt{x_G^2 + (y_D - y_F)^2},$$

$$DF = y_D - y_F \text{ и } y_D = y_G + x_G(y_G - y_C)/(x_C - x_G)$$

Решая (1), находим

$$y_F = 0.5 \left[(y_D - AG + DG)^2 - a^2 \right] / (y_D - AG + DG).$$

Парциальная диаграмма направленности (ПДН) решетки определяется интегрированием распределения поля по раскрытию подрешетки в плоскости $y = 0$. Делая соответствующие замены переменной интегрирования для каждой части раскрытия подрешетки (рис. 1), представим ПДН в виде

$$F(\theta) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=1}^3 \int_a^b A_n(\xi) \cos[k(\xi - \xi_n) \sin \theta] d\xi \right|, \quad (2)$$

где $A_1(\xi) = R_1(R_2 + T_2)A_0(\xi)$, $A_2(\xi) = T_1R_2A_0(\xi)$ и $A_3(\xi) = T_1T_2A_0(\xi)$ — комплексные амплитудные распределения по трем участкам раскрытия; $R_{1,2}(\beta)$ и $T_{1,2}(\beta)$ — коэффициенты отражения и прохождения локально-плоской волны (луча), падающей на экраны под углом β ; $A_0(\xi)$ — амплитудное распределение, которое имело бы место на участке раскрытия, соответствующем параболы BC в отсутствие экранов; $\xi_1 = 0$,

$\xi_2 = 2b$, $\xi_3 = -2b$, $k = 2\pi/\lambda$, λ — длина волны; θ — угол наблюдения, отсчитываемый от оси y , и

$$N = \sqrt{b \int_a^b |A_0(\xi)|^2 d\xi}$$

— нормировочный коэффициент, введенный в (2) для учета потерь коэффициента использования поверхности за счет неравномерности амплитудного распределения на каждом участке раскрыва, включая затенение контррефлектором.

Распределение поля по раскрыву подрешетки зависит от диаграммы направленности облучателя $F_0(\varphi)$, и согласно законам геометрической оптики для данного случая

$$A_0(\xi) = \sqrt{\frac{1 + \cos \beta}{2f} \frac{d\varphi}{d\beta}} F_0(\varphi),$$

где соотношения между ξ , β и φ определяются формулами

$$\beta(\xi) = 2 \arctg \left[(2b + \xi - x_G) / 2f \right],$$

$$\varphi(\beta) = -\alpha + \arcsin \frac{2e - (1 + e^2) \sin(\beta - \alpha)}{1 + e^2 - 2e \sin(\beta - \alpha)},$$

в которых $\alpha = \arctg[y_G - y_F]/x_G$, а $e = \sqrt{x_G^2 + (y_G - y_F)^2} / (AG + AF)$ — эксцентриситет эллипса.

Ниже в качестве примера приводятся результаты расчета характеристик решетки, полученные для $a = 3\lambda$, $b = 25\lambda$, $h = 40\lambda$ и $x_G = 8\lambda$. Диаграмма направленности облучателя была взята в виде $F_0(\varphi) = \sin(k\Delta \cos \varphi) \cos(ks \sin \varphi)$, что соответствует двум синфазным витям электрического тока, расположенным на высоте Δ над проводящим экраном на расстоянии $2s$ друг от друга. В качестве полупрозрачных экранов использовались диэлектрические пластины толщиной $t_{1,2}$ и относительной проницаемостью $\epsilon_{1,2}$ для которых коэффициенты отражения и прохождения плоской волны E -поляризации рассчитывались по формулам

$$R_j(\beta) = i(\psi_{1,j}^2 - \psi_{0,j}^2) Q_j^{-1} \sin \psi_{1,j}, \quad T_j(\beta) = 2\psi_0 \psi_{1,j} Q_j^{-1},$$

где

$$Q_j = \left[2\psi_{0,j} \Psi_{1,j} \cos \psi_{1,j} - i(\psi_{0,j}^2 + \psi_{1,j}^2) \sin \psi_{1,j} \right] \exp(i\psi_{0,j}),$$

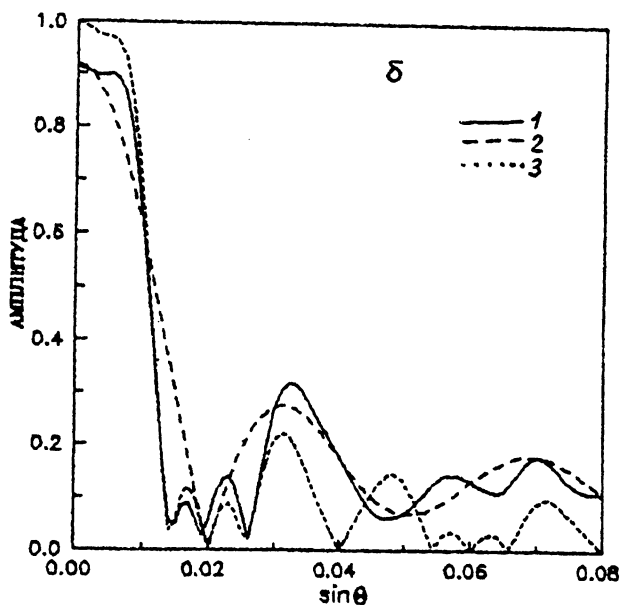
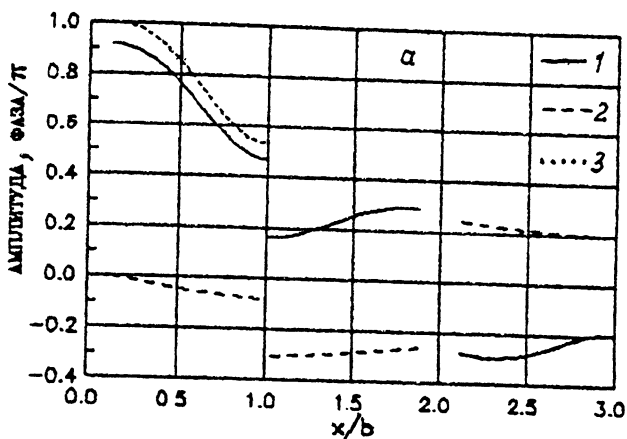


Рис. 2. Характеристики подрешетки: а — амплитудные (1) и фазовые (2) распределения для случая полупрозрачных экранов и амплитудное распределение для случая проводящих экранов (3); б — диаграммы направленности для случаев полупрозрачных (1) и проводящих (2) экранов и подрешетки с ответвлениями [4] (3).

$$\psi_{0j} = kt_j \sin \beta,$$

$\psi_{1j} = kt_j \sqrt{\varepsilon_j - \cos^2 \beta}$ и $j = 1, 2$ для первичных и вторичных экранов соответственно. Параметры экранов $t_1 = 0.07\lambda$, $\varepsilon_1 = 14.5$ и $t_2 = 0.13\lambda$, $\varepsilon_2 = 4.2$ подобраны так, что $|T_1|$ и $|T_2|$ для среднего угла облучения экранов близки к величинам 0.438 и 0.74 соответственно, полученным в [4] в результате оптимизации параметров направленных ответвителей. Параметры облучателя $\Delta = 0.48\lambda$ и $s = 0.3\lambda$ подобраны из условия обеспечения минимального уровня бокового излучения.

Амплитудные распределения поля по раскрытию подрешетки показаны на рис. 2, а сплошными кривыми, нормированными на максимум амплитудного распределения, рассчитанного для случая тонких идеально проводящих экранов и показанного на рис. 2, а пунктирной кривой. Для удобства сравнения амплитудного распределения с кривой $\sin X/X$ амплитуда на крайнем участке взята со знаком минус, а фаза соответственно увеличена на π . Фазовые распределения, показанные штриховыми линиями, построены относительно значения фазы в точке $x = a$ и нормированы на π .

ПДН решетки (2) показана сплошной кривой на рис. 2, б, где для сравнения также показана ПДН для случая тонких проводящих экранов (штриховая линия), когда излучает только центральная ячейка, и ПДН решетки [4] (пунктирная кривая) для случая равномерных амплитудных распределений поля по раскрытию каждого излучателя.

Полученные результаты показывают, что рассмотренная оптическая схема обеспечивает такую же высококачественную форму секторного луча, как и схема [4] с ответвителями. Несколько повышенный уровень бокового излучения и соответствующее снижение коэффициента использования поверхности здесь обусловлено эффектом затенения контррефлектром. Этот эффект здесь пропорционален величине a/b . В двумерно-периодических системах эффект затенения, пропорциональный $(a/b)^2$, будет существенно менее заметен, однако это уже является предметом другого исследования.

Список литературы

- [1] Mailloux R.J., Franchi P.R. // US Patent N 3938160, Int. Cl. H01Q 3/26, 1976.
- [2] Frazita R.F., Lopez A.R., Giannini R.J. // US Patent N 4041501, Int. Cl. H01Q 3/26, 1977.
- [3] DuFort E.C. // US Patent N 4228436, Int. Cl. H01Q 3/26, 1980.

- [4] Скобелев С.П. // Радиотехника. 1990. № 10. С. 44-47.
- [5] Скобелев С.П. // Труды X школы-семинара по дифракции и распространению волн. Москва, 7-15 февраля 1993 г. М.: НИИРФ, 1993. С. 369-395.
- [6] Ванке В.А., Запорожец А.А. // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36. № 5. С. 869-875.

Поступило в Редакцию
28 ноября 1995 г.
В окончательной редакции
27 февраля 1996 г.
