



УДК 621.396.67

А. Д. Французов

ООО «Научно-производственное предприятие  
"Цифровые радиотехнические системы"» (Санкт-Петербург)

## Метод неортогональных парциальных диаграмм синтеза линейных антенных решеток

*Разработан метод неортогональных парциальных диаграмм для синтеза линейных антенных решеток со специальными диаграммами направленности. Определены требования к отдельному излучателю антенной решетки и к шагу решетки в зависимости от формы синтезируемой диаграммы. Синтезирован параметрический ряд антенн длиной от двух до десяти длин волн.*

**Неортогональные парциальные диаграммы направленности, синтез линейных антенных решеток, специальная диаграмма направленности, излучатель антенной решетки, параметрический ряд антенн**

Проблема синтеза амплитудно-фазового распределения (АФР) линейной антенной решетки (АР) существует в технике антенн с 50-х гг. прошлого столетия. Имеется обширная специальная, в том числе учебная, литература по проблемам синтеза линейных АР [1]. Тем не менее, считать проблему синтеза решенной окончательно не представляется возможным.

В [1] подробно разработан метод синтеза непрерывного раскрыва с помощью ортогональных парциальных диаграмм, в качестве которых выбраны классические функции типа  $A_m \sin(\eta + \varphi_p) / (\eta + \varphi_p)$ , где  $A_m$  – амплитуда  $m$ -й парциальной диаграммы;  $\eta$  – обобщенная угловая координата;  $\varphi_p$  – фазовый сдвиг на краю раскрыва по сравнению с его серединой, определяющий наклон максимума диаграммы. Для решеток излучателей аналогичной ортогональной системы парциальных диаграмм не существует. Для больших АР с длиной не менее  $20\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны) амплитудно-фазовое распределение возбуждения в решетке в [1] предложено синтезировать, как для непрерывного раскрыва.

Проблема усложняется при синтезе малоразмерных решеток с малым количеством излучателей. Для этого случая в настоящей статье предложен метод синтеза, использующий неортогональную систему парциальных диаграмм. Суть метода заключается в поэтапном решении поставленной задачи: на первом этапе определяется тип пер-

вичного излучателя; на втором этапе выполняется начальное приближение АФР, не учитывающее взаимное влияние выбранных излучателей в решетке; наконец, завершающий третий этап синтеза учитывает реальную геометрию излучателей, их взаимное расположение и геометрию АР в целом.

Наиболее ответственный, если не самый ответственный, этап синтеза АР – выбор первичного излучателя. Правильный выбор излучателя во многом предопределяет результат указанного синтеза. Главными требованиями к излучателю следует считать:

- малые габариты, особенно в плоскости синтезируемой диаграммы направленности (ДН);
- полосу частот, в которой излучатель хорошо согласован с волновым сопротивлением фидера 50 Ом;
- форму ДН, которая позволяет синтезировать заданную форму диаграммы антенной решетки.

В качестве излучателя для АР с секторной ДН в горизонтальной плоскости разумно использовать рупорно-полосковые антенны [2], [3], которые хорошо согласуются с фидером питания в широкой полосе частот и могут изготавливаться методами, используемыми при производстве печатных плат, что, в свою очередь, обеспечивает высокую повторяемость характеристик антенн.

Разработанная модель полоскового рупорного излучателя показана на рис. 1. Излучатель выполнен в виде печатного рупора на двух подложках из диэлектрического материала типа Rogers

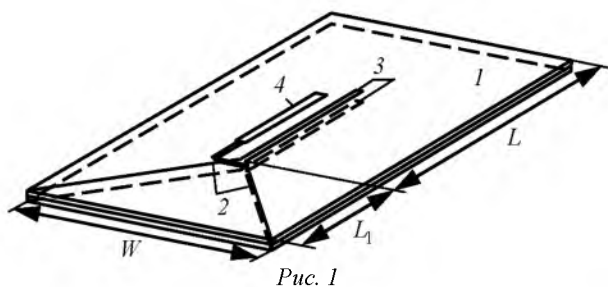


Рис. 1

R04003 толщиной 1.524 мм с диэлектрической проницаемостью 3.55 и тангенсом угла диэлектрических потерь 0.0027.

На плате 1 нанесен слой медной фольги толщиной 0.035 мм, образующий плоский рупор 2 с короткозамкнутой щелью 3. На другой стороне этой же платы выполнена полосковая линия питания 4 рупора 2. На другой плате выполнен плоский рупор, идентичный рупору первой платы. Размер раскрытов рупоров в *E*-плоскости  $W = 0.29\lambda$ , его длина  $L_1 = 0.19\lambda$ . Длина платы от кромки до горловины рупора  $L = 0.41\lambda$ . Для обеспечения однонаправленного излучения рупор снабжен экраном, расположенным на расстоянии половины длины волны от его раскрыва.

КСВ рупора показан на рис. 2. Рупор очень хорошо согласован. КСВ не превышает 1.25 в более чем 10-процентной полосе частот (относительно средней частоты рабочей полосы устройства). Такое широкополосное согласование говорит о том, что излучатель имеет малую амплитуду реактивных ближних полей. Этот факт обеспечивает слабое взаимное влияние излучателей в решетке.

На рис. 3 показаны ДН рупорного полоскового излучателя в *E*- и *H*-плоскостях ( $\alpha$  – угол, отсчитываемый от оси рупора). Ширина ДН по уровню половинной мощности в *E*-плоскости превышает  $60^\circ$ , в *H*-плоскости составляет  $100^\circ$ . Такие характеристики ДН отдельного излучателя создают хорошие возможности для конструирования АР.

Перейдем ко второму этапу – синтезу начального приближения АФР для линейной АР. В ли-

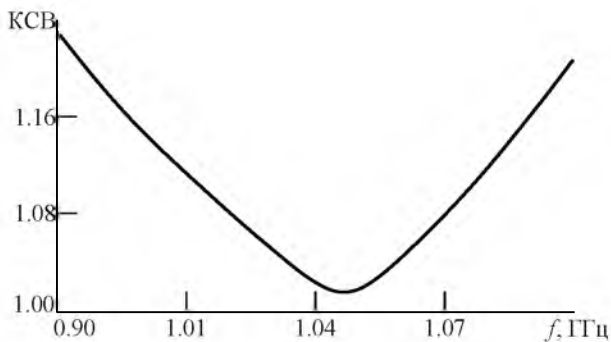


Рис. 2

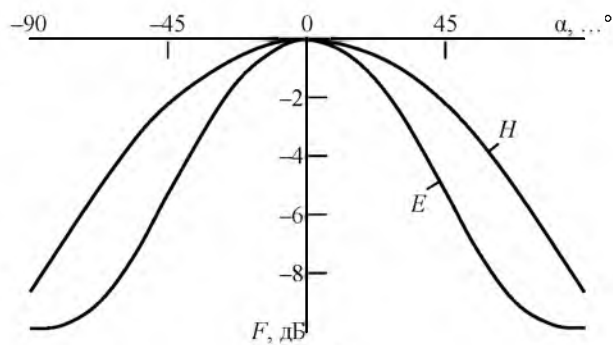


Рис. 3

тературе [1] по синтезу антенн рассматривается только этот этап синтеза.

Рассмотрим линейную решетку *N* точечных излучателей (рис. 4). ДН такой АР имеет вид [1]

$$F_N(\theta) = \sum_{n=1}^N \dot{I}_n \dot{F}_n(\theta) \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda} z_n \cos \theta\right),$$

где  $\dot{I}_n$  – комплексная амплитуда тока в *n*-м излучателе;  $\dot{F}_n(\theta)$  – комплексная ДН *n*-го излучателя;  $z_n = (d/2)(2n - N - 1)$  – координата *n*-го излучателя (*d* – шаг расположения излучателей).

Формальное решение задачи синтеза АФР заключается в определении комплексных амплитуд тока в излучателях решетки, например с помощью системы виртуальных ортогональных диаграмм [1]. Однако остается неясным, каким образом грамотно задать комплексную ДН. Реально можно задать некоторые требования к модулю ДН в рабочей зоне и некоторые ограничения в области бокового излучения. Как показывает практика [4], от заданных конкретных требований к синтезируемой ДН может существенно измениться результат синтеза.

При синтезе АФР в качестве парциальных диаграмм примем ДН равноамплитудной решетки из *N* излучателей с линейным законом фазового распределения по излучателям [4]:

$$f_m(\theta) = \exp\left[j \frac{N-1}{2} \left(\frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta + \psi_m\right)\right] \times A_m \frac{\sin\left\{N \left[\left(\frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta + \psi_m/2\right)\right]\right\}}{\sin\left[\left(\frac{\pi d}{\lambda} \cos \theta + \psi_m/2\right)\right]},$$

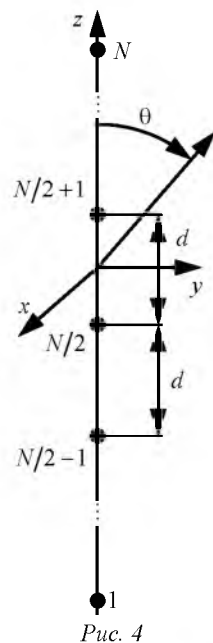


Рис. 4

где  $\psi_m$  – разность фаз токов в двух соседних излучателях, определяющая наклон  $m$ -й парциальной диаграммы. Поскольку фазовый центр равноамплитудной решетки с линейным законом фазового распределения по излучателям всегда находится в ее геометрическом центре, результирующую ДН можно представить в виде суммы  $M$  парциальных диаграмм:

$$F_N(\theta, A_m, \psi_m) = \sum_{m=1}^M f_m(\theta).$$

При этом результирующее АФР можно записать в следующем виде:

$$|I_{n\Sigma}| = \left( \left\{ \sum_{m=1}^M A_m \cos \left[ \frac{\psi_m}{2} (2n - N - 1) \right] \right\}^2 + \left\{ \sum_{m=1}^M A_m \sin \left[ \frac{\psi_m}{2} (2n - N - 1) \right] \right\}^2 \right)^{0.5}; \quad (1)$$

$$\varphi_{n\Sigma} = \arctg \frac{\sum_{m=1}^M A_m \sin \left[ \frac{\psi_m}{2} (2n - N - 1) \right]}{\sum_{m=1}^M A_m \cos \left[ \frac{\psi_m}{2} (2n - N - 1) \right]}, \quad (2)$$

где  $|I_{n\Sigma}|$ ,  $\varphi_{n\Sigma}$  – амплитуда и фаза результирующего тока  $n$ -го излучателя соответственно.

Рассмотрим предлагаемый метод на примере синтеза линейной решетки с так называемой косекансной ДН в вертикальной плоскости, главный лепесток которой в пределах угла  $\theta_{\min} \leq \theta \leq \theta_{\max}$  задается формулой  $F_3(\theta) = A/[\sin(90 - \theta)]$ , где  $A = \sin(90 - \theta_{\max}) = 0.0767$  определяет максимальный угол  $\theta_{\max} = 85.6^\circ$ , при котором заданная диаграмма равна единице. Такая диаграмма широко используется в радиосистемах, в которых либо отраженный, либо принятый сигнал не зависит от наклонной дальности до летательного аппарата.

Степень близости к заданной диаграмме определяется функционалом

$$Q_M(A_m, \psi_m) = \left\{ \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \|F_3(\theta)\| - |F_N(\theta, A_m, \psi_m)|^L q(\theta) d\theta \right\}^{1/L}, \quad (3)$$

где  $\theta_{\max} \dots \theta_{\min}$  – сектор углов, в котором синтезируется диаграмма<sup>1</sup>;  $L$  – целое неотрицательное

число;  $q(\theta) \leq 1$  – весовая функция, устанавливающая разную степень аппроксимации для различных углов сектора.

Показатель степени  $L$  позволяет менять характер приближения, выполняя его, например, в среднеквадратическом смысле ( $L=2$ ) или в смысле максимального отклонения ( $L \rightarrow \infty$ )<sup>2</sup>. Как правило, при синтезе используется среднеквадратическое отклонение. Весовые коэффициенты задаются исходя из значимости того или другого участка заданной диаграммы.

Рассмотрим синтез 16-элементной решетки с шагом  $d/\lambda = 0.65$  с "косекансной" формой ДН в вертикальной плоскости. Метод неортогональных парциальных диаграмм привлекателен тем, что он позволяет визуализировать процесс синтеза, что удобно выполнить в среде Mathcad.

Известно [1], что наименьшую ширину ДН имеет равноамплитудная синфазная решетка излучателей. Другими словами, такая решетка имеет максимальную крутизну склона главного лепестка ДН. Следовательно, в качестве первой парциальной диаграммы необходимо выбрать диаграмму равноамплитудной синфазной решетки, имеющую единичную амплитуду возбуждения. Фазовое распределение должно отклонить максимум диаграммы  $f_1(\theta)$  так, чтобы нижний склон главного лепестка диаграммы пересекал горизонтальное направление на уровне  $0.63 \pm 0.07$  ( $-4 \pm 1$  дБ) от максимального значения электрического поля, что достигается при фазовом угле  $\psi_1 = -13^\circ$ . При вертикальной поляризации поля это обеспечивает увеличение амплитуды поля вдоль поверхности Земли до максимального значения за счет интерференции прямого поля и поля, отраженного от земной поверхности [4]. В результате получаем первую парциальную диаграмму  $f_1$  (рис. 5). Вторая парциальная диаграмма ( $f_2$ ) определяется из условий компенсации отрицательного лепестка первой парциальной диаграммы в области угла  $\theta \approx 79^\circ$  от вертикали, что достигается при параметрах этой парциальной диаграммы  $A_2 = 0.55$ ,  $\psi_2 = -45^\circ$ . Следующие две парциальные диаграммы ( $f_3$  и  $f_4$ ) должны компенсировать первый отрицательный лепесток второй парциальной диаграммы при  $\theta \approx 71^\circ$  от верти-

<sup>1</sup> Минимальный угол обычно задается равным  $40^\circ$ , хотя он может быть задан и меньшим значением.

<sup>2</sup> На практике для приближения в смысле максимального отклонения достаточно полагать  $L = 7$ .

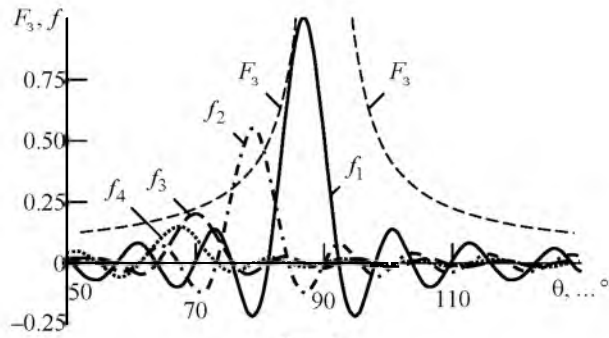
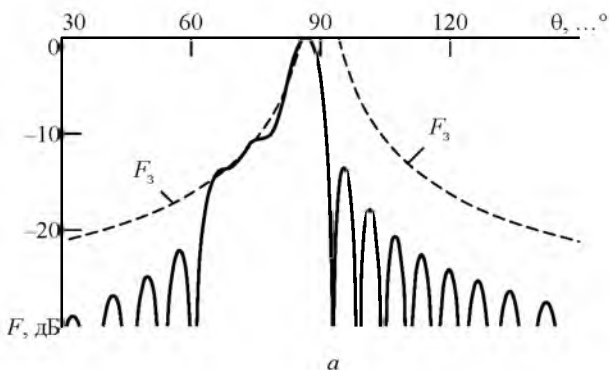


Рис. 5

кали и второй отрицательный лепесток первой парциальной диаграммы в области  $\theta \approx 67^\circ$  от вертикали. В итоге для третьей и четвертой парциальных диаграмм имеем следующие параметры:  $A_3 = 0.2$ ,  $\psi_3 = -80^\circ$  и  $A_4 = 0.15$ ,  $\psi_4 = -90^\circ$ .

Количество парциальных диаграмм, участвующих в синтезе, можно установить заранее. Однако вследствие неортогональности этих диаграмм на интервале углов синтеза не существует уверенности, что полученный в процессе оптимизации минимум функционала (3) является глобальным, а не локальным. Поэтому вначале в ручном режиме при визуальном контроле синтезируемой ДН необходимо приблизительно подобрать параметры парциальных диаграмм. После этого можно запустить процесс оптимизации в автоматическом режиме.

На рис. 6, а приведена результирующая ДН, построенная по четырем парциальным диаграммам направленности. Необходимое распределение амплитуд и фаз поля в отдельных элементах АР показано на рис. 7, а и в соответственно. Синтезированная диаграмма отличается от заданной ДН  $F_3$  не более чем на  $\pm 1.5$  дБ, а боковые лепестки по мере удаления от основного косекансного лепестка  $F_3$  быстро приближаются к уровню  $-30$  дБ. Это особенно важно, поскольку боковые лепестки в направлении поверхности Земли после отражения, интерферируя с основным лепестком ДН, могут сильно его исказить.



а

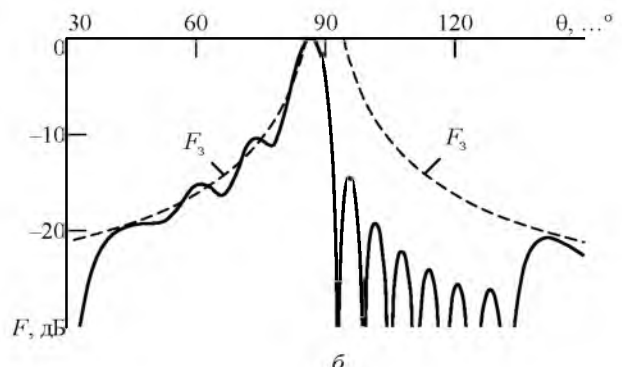
Привлекая к синтезу еще четыре парциальные диаграммы, удается расширить главный лепесток синтезированной ДН в вертикальной плоскости до угла  $\theta_{\min} = 40^\circ$  (рис. 6, б). Действуя описанным ранее способом, получим амплитуды возбуждения этих диаграмм и шаг фазового распределения каждой диаграммы:

$$A_5 = 0.18, \psi_5 = -121^\circ; A_6 = 0.13, \psi_6 = -140^\circ;$$

$$A_7 = 0.1, \psi_7 = -170^\circ; A_8 = 0.1, \psi_8 = -175^\circ.$$

Амплитудное распределение по излучателям решетки приведено на рис. 7, б, фазовое – на рис. 7, з.

Отклонение синтезированной диаграммы от заданной не превышает  $\pm 2$  дБ, но уровень бокового излучения в направлении земной поверхности под углом  $140^\circ$  составляет  $-21.5$  дБ, что сравнимо с уровнем синтезированной "косекансной" диаграммы под углом  $40^\circ$ . Интерференция сигнала, отраженного от земной поверхности под углом  $140^\circ$ , может существенно ослабить излучение основного лепестка синтезированной диаграммы под углом  $40^\circ$  от вертикали. Это явление предопределено большим шагом размещения излучателей в решетке. Из [1] известно, что погрешность синтеза АР с шагом, превышающим  $\lambda/2$ , увеличивается при превышении шириной синтезируемого лепестка определенной величины. Согласно [4] угол отклонения максимума парциальной диаграммы от нормали к решетке для отсутствия дифракционного лепестка не должен превышать величины  $\Delta\theta \leq \arcsin[(1 - d/\lambda)/(d/\lambda)]$ , однако все введенные на втором шаге синтеза дополнительные парциальные диаграммы не удовлетворяют этому требованию. Это несоответствие и привело к возникновению дифракционного лепестка под углом  $140^\circ$ . Можно показать, что для устранения паразитного дифракционного лепестка шаг решетки необходимо выбирать из условия [4]



б

Рис. 6

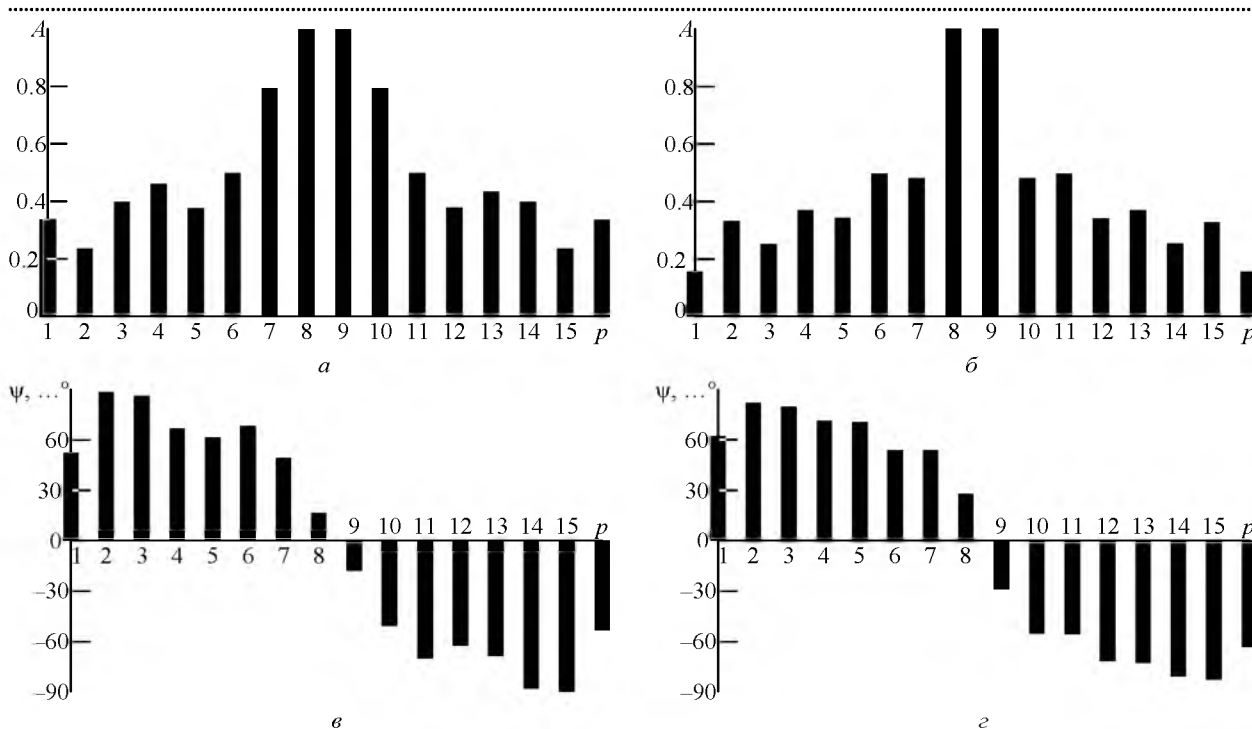


Рис. 7

$$d/\lambda \leq 1/[1 + \sin(90^\circ - \theta)].$$

Третий этап синтеза заключается в моделировании АР в среде CST Microwave Studio [5]. Это позволяет определить ДН каждого излучателя с учетом его положения в АР и по результатам моделирования уточнить синтезированное АФР по выбранному на втором этапе критерию оптимальности.

Была промоделирована 8-элементная решетка из плоских рупорных излучателей (см. рис. 1). На рис. 8 показаны ДН пятого и восьмого излучателей. Они существенно отличаются как друг от друга, так и от ДН одиночного излучателя (см. рис. 3). Поскольку отличие ДН излучателей в АР и одиночного излучателя определяется их взаимным влиянием, необходима корректировка синтезированного на втором этапе АФР.

Парциальная  $p$ -я ДН в уточненном виде определяется как

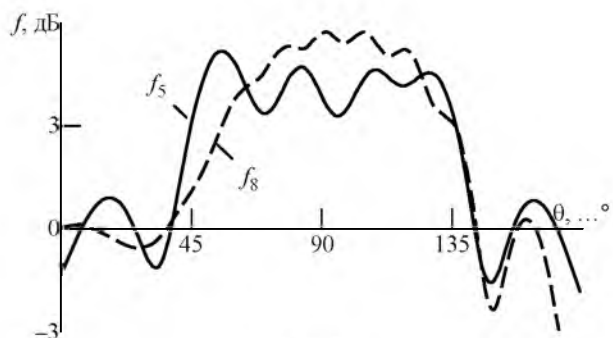


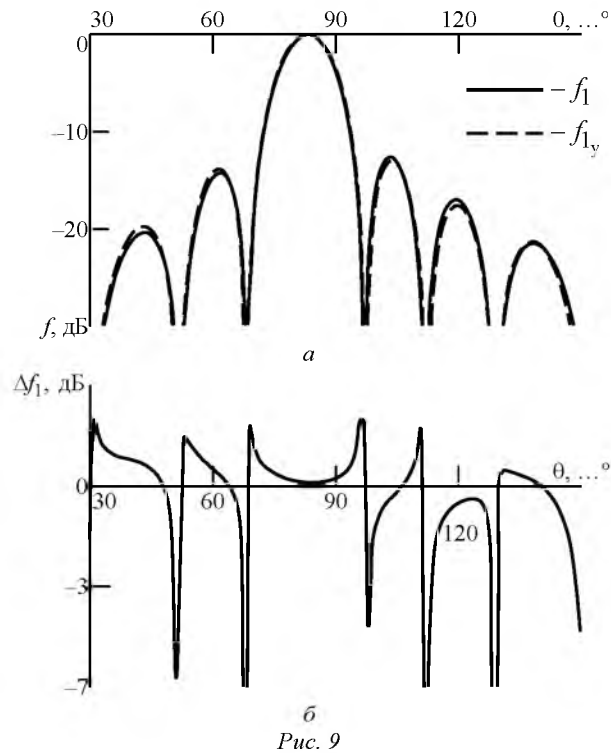
Рис. 8

$$f_{m_y}(\theta) = \sum_{n=1}^N A_m \exp[-j\psi_m(2n - N - 1)] \times F_n(\theta) \exp[j\psi_n(\theta)], \quad (4)$$

где  $F_n(\theta)$  и  $\psi_n(\theta)$  – амплитудная и фазовая диаграммы  $n$ -го излучателя решетки соответственно, полученные на третьем этапе моделированием в среде CST Microwave Studio АР с заданным количеством и выбранным шагом размещения излучателей, смоделированных на первом этапе синтеза.

Вычислительная среда CST Microwave Studio также позволяет получить парциальные диаграммы, непосредственно задавая возбуждение портов всех излучателей и не прибегая к их вычислению по (4). В этом случае уточненная парциальная ДН вычисляется непосредственно в процессе моделирования с использованием в качестве начальных параметров парциальных диаграмм, полученных на втором этапе синтеза. После установки начальных значений параметров парциальных диаграмм процесс оптимизации запускается в автоматическом режиме.

На рис. 9, а показаны парциальная ДН синтеза АФР 8-элементной решетки  $f_1(\theta)$ , полученная на втором этапе, и уточненная диаграмма  $f_{1_y}(\theta)$ , полученная на третьем этапе. На рис. 9, б показана разность этих двух диаграмм. Нетрудно видеть, что уточненная на третьем этапе синтеза парциальная диаграмма, учитывающая как взаимное влияние излучателей, так и реальную конструкцию



синтезируемой АР, существенно отличается от парциальной диаграммы, принятой на втором этапе.

Подбор и оптимизация параметров парциальных диаграмм выполняются аналогично методике второго этапа. Чем меньше взаимное влияние между излучателями сказывается на амплитудных и фазовых ДН, тем меньше синтезированное АФР на третьем этапе будет отличаться от АФР, полу-

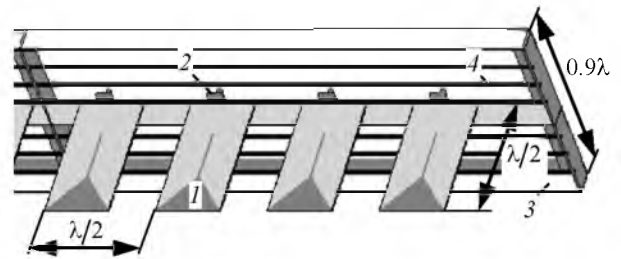
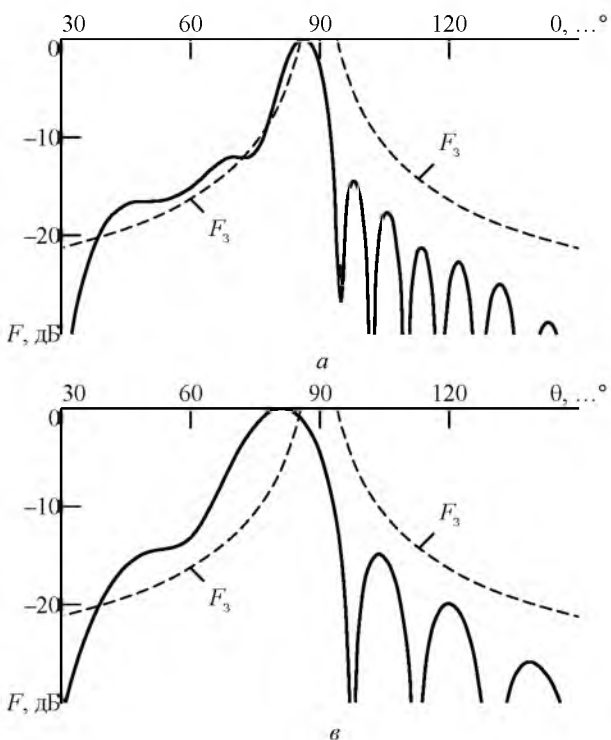


Рис. 10

ченного на втором этапе. При этом результирующее АФР определяется по формулам (1) и (2).

Полученное оптимальное АФР, учитывающее реальные ДН каждого излучателя в линейной решетке, подставляется в заданные порты возбуждения излучателей, и рассчитывается синтезированная ДН.

С учетом описанной методики произведен синтез параметрического ряда АР с числом элементов 16, 12, 8 и 4 и шагом расположения излучателей  $d/\lambda = 0.5$ . На рис. 10 показан внешний вид одной секции из четырех рупорных излучателей длиной  $2\lambda$ , на базе которой сформирован параметрический ряд антенн с "косекансной" ДН в вертикальной  $E$ -плоскости и секторной диаграммой в горизонтальной  $H$ -плоскости шириной  $100^\circ$  по уровню половинной мощности. Секция состоит из четырех плоских рупоров 1, выполненных по технологии печатных плат. Питание каждого рупора осуществляется через коаксиальный разъем типа SMA 2. Рупоры крепятся к рамке 3 из алюминия

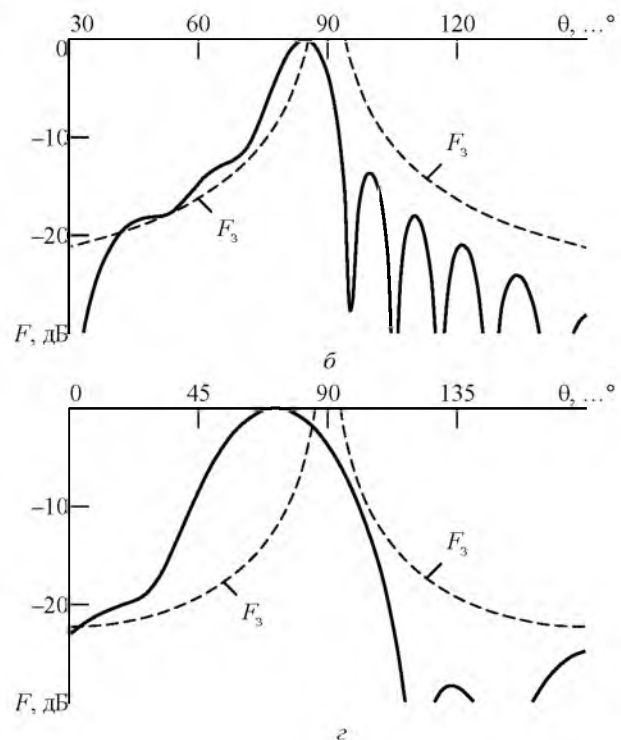


Рис. 11

Параметр	Количество излучателей ( $N$ )				
	16	16	12	8	4
	Значение				
Относительная длина ( $L_p/\lambda$ )	10	8	6	4	2
Шаг решетки ( $d/\lambda$ )	0.65	0.5	0.5	0.5	0.5
Коэффициент усиления ( $G$ ), дБ	15.32	14.28	13.65	12.31	9.64

евого уголкового профиля. Экран выполнен из шести прутков 4, присоединенных к рамке сваркой.

Синтезированные диаграммы АР с числом элементов 16, 12, 8 и 4 и шагом расположения излучателей  $d/\lambda = 0.5$  представлены на рис. 11,  $a$ – $z$  соответственно. Интересно отметить, что самая короткая антенная решетка из четырех излучателей имеет ДН, перекрывающую весь сектор углов наблюдения от 0 до 90° включительно, считая от вертикали.

Основные характеристики параметрического ряда вертикальных АР приведены в таблице. Из нее следует, что коэффициент усиления АР зависит от ее длины практически линейно, а значит, размер антенны с секторной диаграммой в азимутальной плоскости определяет дальность действия радиосистемы в горизонтальной плоскости при постоянной мощности передатчика. Интересно отметить, что дальность действия радиосистемы при уменьшении длины АР с десяти до двух длин волн уменьшается всего в 2 раза.

Таким образом, в статье показана возможность синтеза АФР АР методом неортогональных парциальных ДН, в качестве которых выбраны диаграммы решетки с равноамплитудным возбуждением и линейным возбуждением по фазе.

Первая парциальная диаграмма определяет положение и крутизну склона главного лепестка синтезируемой диаграммы вдоль поверхности Земли. Вторая и последующие парциальные диаграммы, уменьшаясь по амплитуде, имеют максимумы, постепенно смещаемые к направлению вертикали, формирующие главный лепесток, постепенно уменьшающийся по амплитуде по мере приближения излучения к вертикали. Описанный метод позволяет наглядно визуализировать процесс синтеза, а также провести синтез в среде CST Microwave Studio с учетом взаимного влияния излучателей, представленных в виде конструктивных математических моделей в решетке.

Необходимо заметить, что система парциальных диаграмм линейной решетки с равноамплитудным возбуждением излучателей – не единственная неортогональная система. Варьируя амплитудное возбуждение портов, можно получить любую систему неортогональных парциальных диаграмм. Однако система парциальных диаграмм линейной решетки с равноамплитудным возбуждением излучателей обеспечивает максимальную крутизну склона главного лепестка. Уровень боковых лепестков при этом будет наибольшим [1].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков Г. Т., Сазонов Д. М. Антенны: учеб. для студентов радиотехнических специальностей вузов. 2-е изд. М.: Энергия, 1975. 528 с.
2. Широкополосная рупорно-полосковая антенна Вивальди / Радиотехника сверхвысоких частот. Экспресс-информация. 1980. № 37. С. 7.
3. US Pat. 4 843 403 IPC H01Q21/08, H01Q13/10, H01Q13/08. Broadband notch antenna / F. Lalezari, C. G. Gilbert, J. M. Rogers. Publ. June. 27, 1989.
4. Французов А. Д. Основы расчета и конструирования излучающих устройств. Челябинск: Изд-во Челябинск. политехн. ин-та, 1981. 63 с.
5. Курушин А. А., Пластиков А. Н. Проектирование СВЧ-устройств в среде CST Microwave Studio: учеб. пособие. М.: ИД МЭИ, 2012. 152 с.

A. D. Frantsuzov  
LLC «RPE "CRTS"» (Saint-Petersburg)

### The method of partial diagram for the synthesis of linear antenna arrays

*Method of non-orthogonal partial graphs to the synthesis of linear grid antenna are special radiations patterns. Defines the requirements for an individual heater grid antenna and to step bars depending on the form synthesized in the chart. A parametric number of linear grid antenna lengths from two to 10 wavelengths.*

Non-orthogonal partial graphs, the synthesis of linear grid antenna, the special radiation pattern, the individual heater grid antenna, the parametric number of antenna

Статья поступила в редакцию 15 сентября 2014 г.