

УДК 621.396.67.012.12

К.А. Лайко, Ю.О. Филимонова

Амплитудный синтез диаграмм направленности антенных решеток с минимальным уровнем первого лепестка и контролируемым спадом последующих

Предложен синтез амплитудных распределений антенных решеток методом суперпозиции, отличающийся от известных (метод парциальных диаграмм, метод интеграла Фурье, метод Дольфа – Чебышева) своей простотой. При первой итерации в качестве исходных использовались только две диаграммы направленности с равномерным амплитудным распределением и противофазными боковыми лепестками. Синтезируемая диаграмма направленности обладает заведомо меньшим уровнем первого бокового лепестка и иным законом спада. Исследован широкий класс амплитудных распределений типа косинус m -й степени с параметром θ_i в аргументе, который позволяет управлять уровнем и законом спада боковых лепестков.

Полученные амплитудные распределения предназначены для использования в качестве исходных для синтеза диаграмм направленности антенных решеток более широкого класса.

Ключевые слова: синтез, метод суперпозиций, уровень боковых лепестков, диаграмма направленности.

К современным антенным решеткам (АР) предъявляют много противоречивых требований, в частности, увеличение КНД при заданных габаритных размерах [1]. Особенно этот вопрос актуален для космических систем связи, где на счету каждый килограмм массы. Одним из путей повышения КНД является увеличение коэффициента использования поверхности раскрыва (КИПР)

$$\text{КНД} = \frac{4\pi S_{\text{геом}} \nu}{\lambda^2}, \quad (1)$$

где $S_{\text{геом}}$ – геометрический размер антенны; ν – КИПР.

Современные излучающие системы должны обеспечивать заданную диаграмму направленности (ДН) в нужный момент времени, что связано с вопросами адаптации в меняющейся помеховой обстановке, а также сканирования луча в случае ФАР [2]. Всё это требует динамического изменения во времени амплитудного распределения. В связи с этим необходим простой синтез амплитудных распределений по требуемой форме ДН.

Данная работа посвящена синтезу амплитудного распределения методом суперпозиции. Рассмотрим синтез на примере линейной АР. Выражение для ДН имеет вид

$$f(\theta) = \sum_{n=1}^N A_n \cos \left[\frac{kd}{2} (2n-1) \sin \theta \right], \quad (2)$$

где A_n – исходное амплитудное распределение; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; d – шаг антенной решетки; $2N$ – число излучателей в линейке; θ – текущая угловая координата; n – текущий номер излучателя.

На первом этапе синтеза рассматриваются ДН с равномерным амплитудным распределением $A_n = 1$. ДН

АР для десяти излучателей с шагом $d = \frac{\lambda}{2}$ представлена

на рис. 1 и обладает следующими характеристиками: уровень боковых лепестков (УБЛ) – $\xi = -13,2$ дБ; ширина луча по уровню половинной мощности –

$2\theta_{0,5} = 48,33^\circ \frac{\lambda}{L}$; КИПР – $\nu = 1$, где $L = (2N-1)d$.

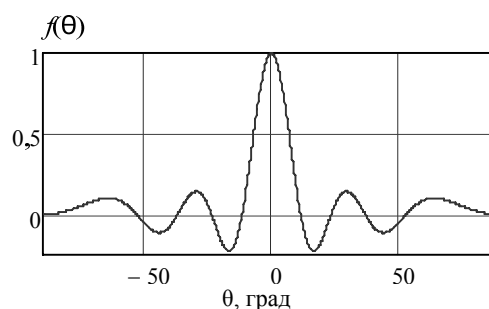


Рис. 1. ДН с равномерным амплитудным распределением

На следующем этапе берутся две подобные ДН, разнесенные в пространстве на величину $\pm\theta_i$ (i – шаг итерации, в данном случае $i=1$), сумма которых даст синтезируемую с отличающимися от исходных параметрами. Амплитудное распределение можно найти из результирующей ДН:

$$\begin{aligned} f_r(\theta) &= \sum_{n=1}^N \cos\left[\frac{kd}{2}(2n-1)(\sin\theta - \sin\theta_i)\right] + \sum_{n=1}^N \cos\left[\frac{kd}{2}(2n-1)(\sin\theta + \sin\theta_i)\right] = \\ &= \sum_{n=1}^N \cos\left[\frac{kd}{2}(2n-1)\sin\theta\right] \cos\left[\frac{kd}{2}(2n-1)\sin\theta_i\right] = \sum_{n=1}^N A_n^1 \cos\left[\frac{kd}{2}(2n-1)\sin\theta\right]. \end{aligned} \quad (3)$$

В результате выражение для нормированного амплитудного распределения имеет вид

$$A_n^1 = \frac{\cos\left[\frac{kd}{2}(2n-1)\sin\theta_i\right]}{\cos\left[\frac{kd}{2}\sin\theta_i\right]}. \quad (4)$$

За счет изменения θ_i можно получать различные значения УБЛ синтезируемой ДН. Минимум УБЛ получается тогда, когда лепестки исходных ДН в противофазе, что соответствует $\theta_1 = 26,1^\circ \frac{\lambda}{L}$. Синтезируемая ДН с минимальным УБЛ представлена на рис. 2 и обладает следующими характеристиками: УБЛ – $\xi = -23,61$ дБ; ширина ДН по уровню половинной мощности – $2\theta_{0,5} = 61,56^\circ \frac{\lambda}{L}$; КИПР – $\nu = 0,809$.

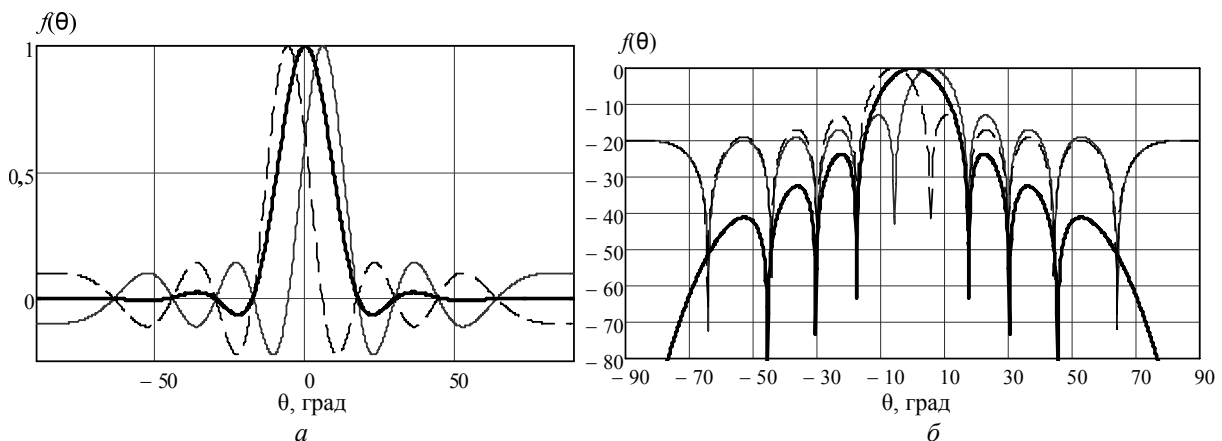


Рис. 2. Пример синтеза ДН методом суперпозиций, в качестве исходных ДН с равномерными амплитудными распределениями: a – в относительных единицах; b – в децибелах

Результирующее синтезируемое амплитудное распределение A_n^1 имеет синфазный вид, так как исходные ДН были с «зеркальным» фазовым распределением $\Phi_{n1} = \frac{kd}{2}(2n-1)\sin\theta_1$, $\Phi_{n-1} = \frac{kd}{2}(2n-1)\sin(-\theta_1)$. Выражение для нормированного амплитудного распределения принимает

вид $A_n^1 = \frac{\cos\left[\frac{kd}{2}(2n-1)\sin\theta_1\right]}{\cos\left[\frac{kd}{2}\sin\theta_1\right]}$ и численно равно: $A_1^1 = 1$, $A_2^1 = 0,9$, $A_3^1 = 0,71$, $A_4^1 = 0,449$, $A_5^1 = 0,143$.

Аналогичным образом в качестве исходных берутся ДН с синтезированным амплитудным распределением A_n^1 . Результирующее амплитудное распределение A_n^2 подобно распределению вида косинус в квадрате. При m -й итерации выражение для нахождения результирующего нормированного амплитудного распределения примет вид

$$A_n^m = \frac{\prod_{i=1}^m \cos \left[\frac{kd}{2} (2n-1) \sin \theta_i \right]}{\prod_{i=1}^m \cos \left[\frac{kd}{2} \sin \theta_i \right]}, \quad (5)$$

где $m=1; 2\dots$ – амплитудный индекс.

Амплитудное распределение (5) аналогично амплитудному распределению вида косинус m -й степени. Данный класс хорошо известен [3, 4], и его характеристики представлены в табл. 1. Параметр θ_i , входящий в выражение амплитудного распределения (5), позволяет определить амплитуду возбуждения крайних излучателей АР, а то время как амплитудное распределение вида косинус m -й степени не позволяет этого сделать. Следовательно, при проектировании АР использование распределения вида косинус m -й степени является некорректным. Данные амплитудные распределения сведены в табл. 2 и представлены ниже. Значения в таблице приведены для оптимального параметра θ_i , который соответствует минимальному УБЛ.

Таблица 1

Характеристики ДН для амплитудного распределения косинус m -й степени

Амплитудное распределение	Формула ДН без учета направленных свойств излучателей	m	$2\theta_{0,5}$, град	Положение первого нуля θ , град	Огибающая БЛ ДН $F_{ог}(u)$	Уровень первого БЛ, ξ , дБ	КИПР
$A(x) = \cos^m \left(\frac{\pi x}{2} \right)$ $-1 \leq x \leq 1$	Для $m=2n$ $f(U) = \frac{2m! sp(U)}{\prod_{i=1}^n ((2i)^2 - \frac{4U^2}{\pi^2})}$, $m=2n+1$, $f(U) = \frac{4m! \cos(U)}{\pi \prod_{i=0}^n ((2i+1)^2 - \frac{4U^2}{\pi^2})}$, $sp(U) = \frac{\sin U}{U}$, $U = \frac{kL}{2} \cos \theta$	0	$50,8 \frac{\lambda}{L}$	$57,4 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{1}{u}$	-13,3	1
		1	$67 \frac{\lambda}{L}$	$86 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{2,47}{u^2}$	-22,9	0,811
		2	$83 \frac{\lambda}{L}$	$114,6 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{9,87}{u^3}$	-31,4	0,667
		3	$95 \frac{\lambda}{L}$	$143,2 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{55}{u^4}$	-39,3	0,575
		4	$110,6 \frac{\lambda}{L}$	$172 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{390}{u^5}$	-46,7	0,515

Таблица 2

Характеристики ДН для предложенного амплитудного распределения

Амплитудное распределение A_n	m	$2\theta_{0,5}$, град	Положение первого нуля, θ , град	Огибающая БЛ ДН $F_{ог}(u)$	Уровень первого БЛ ξ , дБ	Коэффициент использования поверхности раскрыва для числа излучателей			
						10	50	100	1000
$\prod_{i=0}^m \cos \left[\frac{kd}{2} (2n-1) \sin \theta_i \right]$ $\prod_{i=0}^m \cos \left[\frac{kd}{2} \sin \theta_i \right]$ где $\theta_1 = 26,1^\circ \frac{\lambda}{L}$, $\theta_2 = 25,65^\circ \frac{\lambda}{L}$, $\theta_3 = 26,1^\circ \frac{\lambda}{L}$, $\theta_4 = 25,25^\circ \frac{\lambda}{L}$	0	$48,33 \frac{\lambda}{L}$	$51,84 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{1}{u}$	-13,20	1			
	1	$61,56 \frac{\lambda}{L}$	$80,19 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{2}{u^{1,91}}$	-22,6	0,809	0,862	0,868	0,873
	2	$74,52 \frac{\lambda}{L}$	$108,54 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{26}{u^{3,5}}$	-31,21	0,665	0,722	0,729	0,735
	3	$87,48 \frac{\lambda}{L}$	$137,70 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{55}{u^4}$	-39,40	0,573	0,624	0,630	0,635
	4	$97,20 \frac{\lambda}{L}$	$166,50 \frac{\lambda}{L}$	$\frac{390}{u^{5,2}}$	-46,54	0,515	0,560	0,566	0,571

Примечание. ξ – уровень первого БЛ с точностью $\pm 0,5$ дБ.

На рис. 3 изображены ДН при $m=0;4$ и соответствующем уровне БЛ. Закон спада БЛ описывается огибающей. Примерный закон огибающей приведен в табл. 2. Более точный получен для

$N_{\text{изл}} = 20, d = 0,5\lambda$ путем аппроксимации по методу наименьших квадратов полиномом пятой степени и представлен в табл. 3.

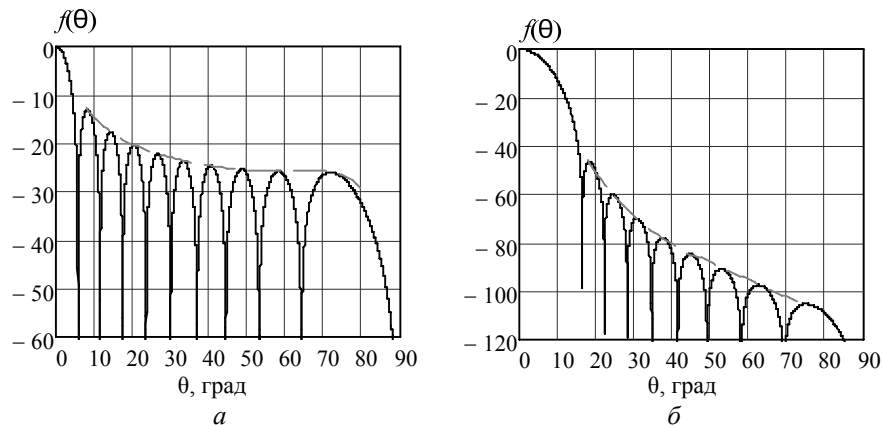


Рис. 3. ДН линейной АР без учета направленных свойств излучателей для $2N = 20, d = 0,5\lambda$.
 а – $m = 0, v = 1, \xi = -13,2$ дБ; б – $m = 4, v = 0,543, \xi = -46,5$ дБ

Таблица 3

Точные обгибающие ДН

$m=0$	$f(\theta) = -0,043 - 126,247\theta + 310,915\theta^2 - 424,964\theta^3 + 293,017\theta^4 - 78,416\theta^5$
$m=1$	$f(\theta) = 0,004 - 173,854\theta + 321,775\theta^2 - 349,425\theta^3 + 205,14\theta^4 - 49,196\theta^5$
$m=2$	$f(\theta) = 0,021 - 180,397\theta + 201,105\theta^2 - 102,687\theta^3 + 6,535\theta^4 + 4,744\theta^5$
$m=3$	$f(\theta) = 0,012 - 158,745\theta - 0,48\theta^2 + 264,293\theta^3 - 265,33\theta^4 + 82,157\theta^5$
$m=4$	$f(\theta) = 0,009 - 130,7\theta - 183,382\theta^2 + 554,424\theta^3 - 463,82\theta^4 + 129,641\theta^5$

Сравнительный анализ табл. 1 и 2 показывает, что при количестве излучателей $2N = 10$ КИПР для амплитудного распределения (5) и распределения типа косинус m -й степени примерно одинаков. Далее с увеличением числа излучателей значение КИПР растет. Динамика данного процесса представлена на рис. 4. Например, для $m = 1$ и $2N = 50$ излучателей КИПР амплитудного распределения (5) $v = 0,862$, что дает выигрыш 6,3% относительно распределения косинус m -й степени; для $2N = 100$ излучателей – $v = 0,868$, выигрыш 7%; для $2N = 1000$ излучателей – $v = 0,873$, выигрыш возрастает до 7,6%.

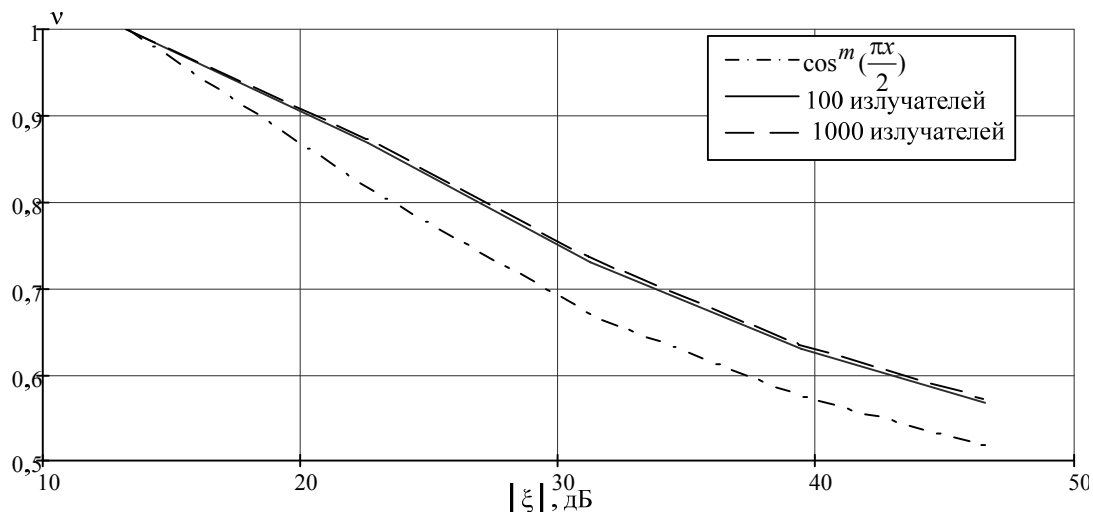


Рис. 4. Зависимость КИПР от УБЛ при различном числе излучателей

Также из таблиц видно, что с увеличением амплитудного индекса m выигрыш по КИПР увеличивается. Максимально возможный выигрыш по КИПР составляет 10,9% при $m = 4$ и количестве излучателей $2N \rightarrow \infty$.

Сравнительный анализ двух таблиц показал, что синтезированные амплитудные распределения обеспечивают повышение КИПР на 6–11% для дискретных структур АР в отличие от непрерывных раскрывов, где амплитуда крайних точек равна нулю. При этом рассмотренный метод синтеза достаточно прост, и полученные амплитудные распределения могут быть использованы для АР с любым количеством излучателей.

Литература

1. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. – М.: Связь, 1977. – Ч. 2. – 288 с.
2. Зелкин Е.Г. Методы синтеза антенн // Е.Г. Зелкин, В.Г. Соколов. – М.: Сов. радио, 1980. – 296 с.
3. Воскресенский Д.И. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Д.И. Воскресенский, В.И. Степаненко, В.С. Филиппов и др. – М.: Радиотехника, 2003. – 632 с.
4. Марков Г.Т. Антенны: учеб. для студентов радиотехнических специальностей вузов / Г.Т. Марков, Д.М. Сазонов. – М.: Энергия, 1975. – 528 с.

Лайко Константин Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. конструирования и технологии радиоэлектронных средств (КТРС) НГТУ
Тел.: 8(383) 3-46-06-33
Эл. почта: ktrs@ngs.ru

Филимонова Юлия Олеговна

Аспирантка каф. КТРС НГТУ
Тел.: 8(383) 3-46-06-33
Эл. почта: jul7788@mail.ru

Layko K.A., Filimonova Yu.O.

Amplitude synthesis of radiation pattern with the lowest level of the first side lobe and controlled reduction of other side lobes for antenna arrays

The synthesis of amplitude distribution for the Array antennas by the method of superposition which differs from other well-known methods, such as Fourier integral method, Partial diagram method or Dolph-Chebichev method, is presented. Only two elementary radiation patterns with opposite phase Side lobes were used as the base patterns in the first iteration. Synthesized radiation pattern deliberately has lower Side lobe level and another type of the amplitude reduction. m-degree cosine amplitude distribution with parameter in argument θ_j which allows to control the side lobe level was investigated.

Obtained amplitude distribution can be used as the basis for the synthesis of various radiation patterns for the Array antennas.

Key words: synthesis, method of superposition, side lobe level, radiation pattern.