

УДК 621.396.67.012.12

К.А. Лайко, Ю.О. Филимонова

Амплитудный синтез диаграмм направленности множителя антенной решетки с контролируемым законом распределения боковых лепестков

Исследована суперпозиция амплитудных распределений типа косинус m -й и косинус $m-2$ степени с весовым коэффициентом Δ_{m-2} . В сравнении с хорошо известными амплитудными распределениями типа косинус m -й степени, данные амплитудные распределения дают оптимальные соотношения коэффициента использования поверхности раскрыва и уровня боковых лепестков. Предложенный класс амплитудных распределений может быть использован для синтеза диаграмм направленности с нарастающим уровнем боковых лепестков.

Ключевые слова: амплитудное распределение, уровень боковых лепестков, коэффициент использования поверхности раскрыва, диаграмма направленности.

В работе [1] рассмотрен амплитудный метод синтеза диаграммы направленности (ДН) путем суперпозиции двух и более исходных простых ДН с равномерным амплитудным распределением и обладающими противофазными боковыми лепестками (БЛ) за счет пространственного смещения этих ДН на величину $+\theta_i$ и $-\theta_i$, что реализуется «зеркальным» фазовым распределением. В результате получен класс синфазных амплитудных распределений $\cos^m \left[\frac{kd}{2}(2n-1)(\sin\theta_i) \right]$ для антенных решеток (АР), который позволяет увеличить коэффициент использования поверхности раскрыва (КИПР) по сравнению с классом непрерывных амплитудных распределений $\cos^m \left(\frac{\pi x}{2} \right)$, подробно описанных в [2]. Данные по классу амплитудных распределений типа косинус m -й степени для дискретных излучающих систем представлены в табл. 1. На основе этого класса амплитудных распределений получен новый класс с более оптимальным соотношением КИПР для заданного уровня боковых лепестков (УБЛ).

Таблица 1

Характеристики ДН с амплитудным распределением типа косинус m -й степени для дискретных излучающих систем

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
$\prod_{i=0}^m \cos \left[\frac{kd}{2}(2n-1)\sin\theta_i \right]$, $\prod_{i=0}^m \cos \left[\frac{kd}{2}\sin\theta_i \right]$, $\theta_1 = 26,1^\circ \frac{\lambda}{L}$, $\theta_2 = 25,65^\circ \frac{\lambda}{L}$, $\theta_3 = 26,1^\circ \frac{\lambda}{L}$, $\theta_4 = 25,25^\circ \frac{\lambda}{L}$	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.

В данном случае, в отличие от предыдущего, где использовали одну ДН, за основу берутся две разные исходные ДН с синфазным амплитудным распределением и противофазными БЛ. Этому условию удовлетворяют ДН с амплитудным распределением косинус m -й степени и косинус $m-2$ степени. Результирующее амплитудное распределение имеет вид

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

ДН для этого случая представлена на рис. 1.

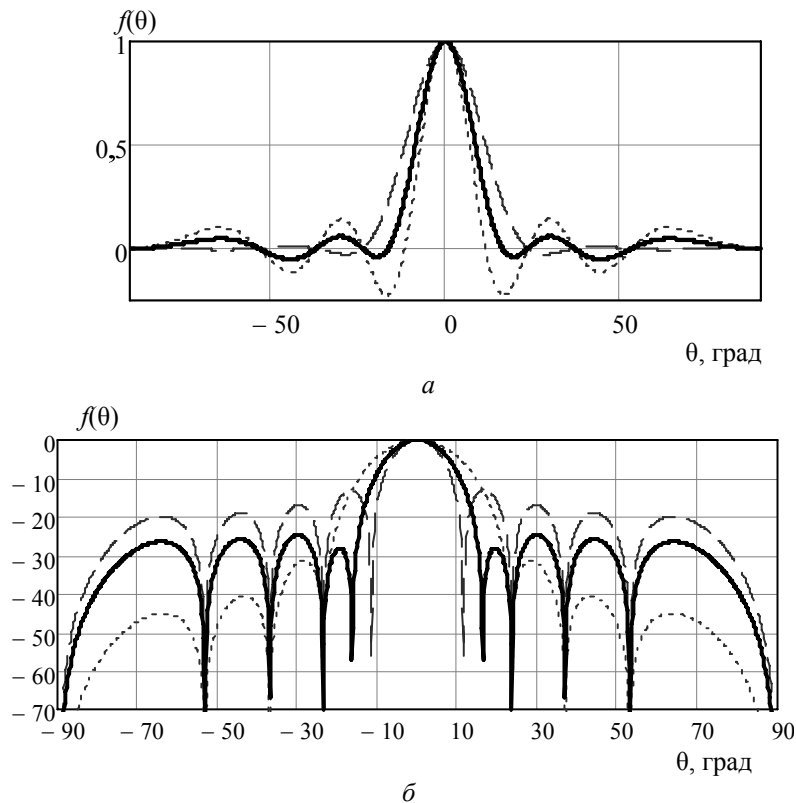


Рис. 1. Пример синтеза ДН суперпозицией исходных: a – в относительных единицах; b – в децибелах

Синтезируемая ДН обладает более оптимальным соотношением КИПР и УБЛ по сравнению с исходными и иным законом распределения БЛ.

Рассмотрим амплитудное распределение с минимальным индексом $m=2$:

$$A_n = \cos^2 \left[\frac{kd}{2} (2n-1) (\sin \theta_i) \right] + \Delta_0. \quad (2)$$

Амплитудное распределение (2) подобно распределению «косинус в квадрате с пьедесталом». Варьируя значения пьедестала, можно добиться требуемого УБЛ. Например, для десяти излучателей $2N=10$ при $\Delta_0=0,69$ УБЛ равен $\xi=-23$ дБ, КИПР $\nu=0,916$; при $\Delta_0=0,195$ УБЛ равен $\xi=-32$ дБ, КИПР $\nu=0,791$; при $\Delta_0=0,14$ УБЛ $\xi=-35$ дБ, КИПР $\nu=0,766$. Для 20 излучателей $2N=20$ при $\Delta_0=0,08$ УБЛ равен $\xi=-40$ дБ, КИПР $\nu=0,772$.

Аналогичным образом берется $m=3, 4, 5...$ и т.д. Все полученные данные сведены в табл. 2. Значения КИПР для амплитудного распределения (1) с точностью до 3% близки к КИПР амплитудных распределений, синтезируемых по методу Дольфа – Чебышева ($\nu_{дч}$) [3]. Так для $\xi=-30$ дБ и $2N=20$ КИПР $\nu=0,841$, $\nu_{дч}=0,867$, что отличается на 3%; для $\xi=-35$ дБ и $2N=20$ КИПР практически одинаков: $\nu=0,797$, $\nu_{дч}=0,799$.

Сравнительный анализ табл. 1 и 2 показывает, что синтезированное амплитудное распределение (1) обладает лучшим соотношением КИПР и УБЛ. Например, при $m=2, 2N=100$ при УБЛ

$\xi = -31$ дБ, КИПР $v_{\cos^m} = 0,729$; КИПР синтезированного амплитудного распределения $v = 0,820$, выигрыш составляет 12,5 %. При $m=4$ для амплитудного распределения типа косинус m -й степени для дискретных излучающих систем $\xi = -46,54$ дБ, для синтезированного амплитудного распределения (1) можно достичь УБЛ $\xi = -62$ дБ.

Таблица 2

Характеристики ДН с синтезированным амплитудным распределением

Амплитудное распределение	m	$2\theta_{0,5}$, град	ξ , дБ	Δ_{m-2}	Огибающая БЛ ДН $F_{ог}(u)$	КИПР для числа излучателей		
						10	20	100
$A_n = a \left\{ \frac{\prod_{i=0}^m \cos \left[\frac{kd}{2} (2n-1) \sin \theta_i \right]}{\prod_{i=0}^m \cos \left[\frac{kd}{2} \sin \theta_i \right]} + \frac{\prod_{i=0}^{m-2} \cos \left[\frac{kd}{2} (2n-1) \sin \theta_i \right]}{\prod_{i=0}^{m-2} \cos \left[\frac{kd}{2} \sin \theta_i \right]} \right\},$ $a = (1 + \Delta_{m-2})^{-1},$ $\theta_1 = 26,1^\circ \frac{\lambda}{L},$ $\theta_2 = 25,65^\circ \frac{\lambda}{L},$ $\theta_3 = 26,1^\circ \frac{\lambda}{L},$ $\theta_4 = 25,25^\circ \frac{\lambda}{L},$ $\theta_5 = 27^\circ \frac{\lambda}{L}$	2	$53,9 \frac{\lambda}{L}$	-23	0,600–0,690	$\frac{0,09}{u^{0,32}}$	0,916	0,926	0,923
		$60,4 \frac{\lambda}{L}$	-30	0,265	$\frac{0,038}{u^{0,22}}$	0,821	0,841	0,856
		$63,2 \frac{\lambda}{L}$	-32	0,166–0,195	$\frac{0,041}{u^{0,3}}$	0,791	0,814	0,820
		$64,6 \frac{\lambda}{L}$	-35	0,140–0,155	$\frac{0,038}{u^{0,32}}$	0,766	0,797	0,809
		$67,6 \frac{\lambda}{L}$	-40	0,08–0,107	$\frac{0,038}{u^{0,48}}$	0,736	0,772	–
	3	$67,3 \frac{\lambda}{L}$	-35	1,150–1,470	$\frac{0,32}{u^{1,3}}$	0,737	0,764	0,785
		$78,3 \frac{\lambda}{L}$	-50	0,170–0,215	$\frac{0,042}{u^{1,1}}$	0,630	0,653	0,682
		$82,17 \frac{\lambda}{L}$	-56	0,310	$\frac{0,015}{u}$	0,647	–	–
	4	$83,2 \frac{\lambda}{L}$	-51	0,820–0,954	$\frac{25,3}{u^{3,6}}$	0,592	0,631	0,651
		$87,6 \frac{\lambda}{L}$	-62	0,335–0,360	$\frac{14,1}{u^{3,6}}$	0,560	0,593	0,618
	5	$95,9 \frac{\lambda}{L}$	-74	0,540–0,760	$\frac{1,8}{u^{3,2}}$	0,517	0,535	0,538
		$96,03 \frac{\lambda}{L}$	-80	0,670	$\frac{0,01}{u^{1,8}}$	0,513	–	–

Примечание. Для упрощения таблицы, данные по УБЛ представлены по максимальному уровню с точностью $\pm 0,5$ дБ. Более точные значения можно получить, варьируя представленными коэффициентами Δ_{m-2} .

Ниже представлен рис. 2, на котором изображены ДН с амплитудным распределением (1) при $m=2$ (а, в), $m=3$ (б, г) и УБЛ, равным -30 дБ; -40 дБ. Как видно из рис. 2, огибающая БЛ амплитудного распределения (2) почти равномерна во всем секторе пространства, т.е. распределение (2) близко к оптимальным дольф-чебышевским распределениям. Примерные выражения для огибающей БЛ представлены в табл. 2. Анализ огибающей показывает, что минимальный показательный индекс при U имеет место, когда $m=2$, $\xi = -30$ дБ. Таким образом, амплитудное распределение (2) имеет огибающую с минимальным показательным индексом, что говорит о приближении к оптимальным распределениям. Данный класс можно отнести к классу квазиоптимальных распределений. Варьируя параметром Δ , можно добиться нарастающего УБЛ. В случае когда закон распределения БЛ обратно пропорционален ДН излучателя, имеет место максимум максимум КИПР для заданной характеристики направленности излучателя.

Например, для амплитудного распределения (2) и 10 излучателей ($2N=10$) в качестве излучателей использована диэлектрическая антенна с эквивалентной длиной $2,75\lambda$, найдено значение параметра $\Delta_0 = 0,1$, при котором закон изменения огибающей ДН множителя АР носит нарастающий характер. Полученная ДН с учетом направленных свойств излучателей представлена на рис. 3.

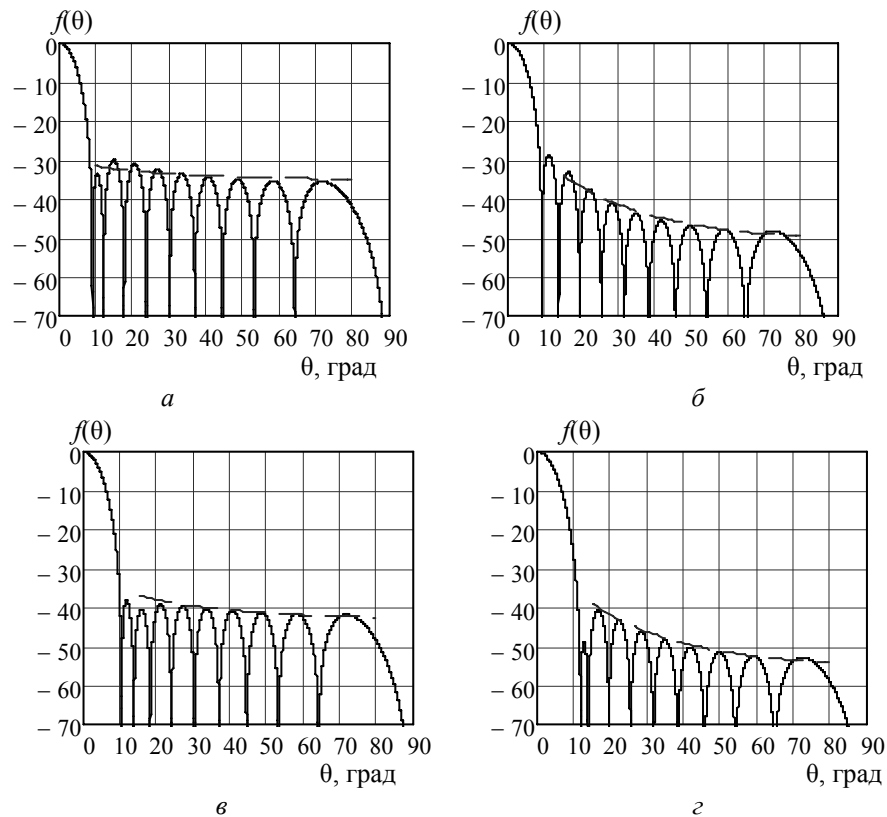


Рис. 2. ДН линейной АР без учета направленных свойств излучателей для $2N=20$, $d=0,5\lambda$

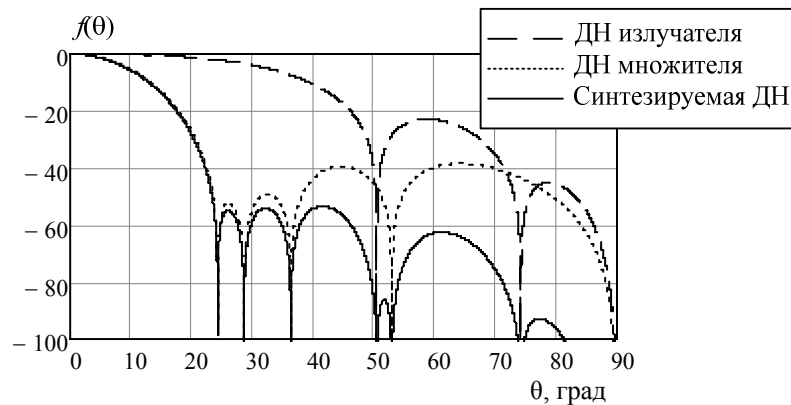


Рис. 3. Синтезированная ДН

Для $\xi=-55$ дБ КИПР составляет $\nu=0,735$. Для дольф-чебышевских распределений того же уровня ξ КИПР – $\nu_{дч}=0,677$. Выигрыш по сравнению с дольф-чебышевскими амплитудными распределениями составляет порядка 8,5%.

Предложенный класс амплитудных распределений позволяет получать оптимальные ДН множителя АР за счет подбора параметров Δ_{m-2} , m , θ_i . Так, при $m=2$ ДН обладает равномерными боковыми лепестками в некотором секторе углов, т.е. является квазиоптимальной. Заданный уровень боковых лепестков достигается путем варьирования Δ_{m-2} . В отличие от Дольф-Чебышевских амплитудных распределений предложенный класс описывается аналитическими выражениями. Амплитудное распределение (2) может быть использовано для синтеза ДН с нарастающим УБЛ по закону, обратно пропорциональному ДН излучателя, что обеспечивает максимум КИПР для заданного УБЛ и ДН излучателя.

Литература

1. Лайко К.А. Амплитудный синтез диаграмм направленности антенных решеток с минимальным уровнем первого лепестка и контролируемым спадом последующих / К.А. Лайко, Ю.О. Филимонова / Доклады ТУСУРа. – 2013. – Т. 29, № 3. – С. 33–37.
2. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / Д.И. Воскресенский, В.И. Степаненко, В.С. Филиппов и др. – М.: Радиотехника, 2003. – 632 с.
3. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ: в 2 ч. – М.: Связь, 1977. – Ч. 2. – 288 с.

Лайко Константин Алексеевич

Канд. техн. наук, доцент каф. конструирования и технологии радиоэлектронных средств (КТРС)
Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)
Тел.: 8 (383) 346-06-33
Эл. почта: ktrs@ngs.ru

Филимонова Юлия Олеговна

Аспирантка каф. КТРС НГТУ
Тел.: 8 (383) 346-06-33
Эл. почта: jul7788@mail.ru

Layko K.A., Filimonova Y.O.

The amplitude synthesis of antenna array radiation pattern with controlled side lobes distribution law

In the paper we analyzed the superposition of m -degree cosine amplitude distribution and $m-2$ – degree cosine amplitude distribution with weighting coefficient Δ_{m-2} . In comparison with well-known m -degree cosine distribution, these amplitude distributions have optimal ratio of the side lobes level and antenna aperture efficiency. The obtained amplitude distributions can be used as the basis for the synthesis of radiation patterns with an increasing level of the side lobes.

Keywords: amplitude distribution, side lobe level, radiation pattern, antenna aperture efficiency.