

Оптимальная форма диаграммы направленности линейной антенной решетки с максимальным коэффициентом использования поверхности для заданного уровня боковых лепестков

Получено соотношение связи амплитудной диаграммы направленности с коэффициентом использования поверхности для линейных антенн. Предложена методика определения оптимальной формы характеристики диаграммы направленности антенных решеток в части закона огибающей боковых лепестков по критерию максимума коэффициента использования поверхности для заданного уровня боковых лепестков и диаграмм направленностей излучателей. Обоснован нарастающий характер огибающей боковых лепестков.

Ключевые слова: Оптимальная форма диаграммы направленности, коэффициент использования поверхности, нарастающий уровень боковых лепестков

Коэффициент использования поверхности ν (КИП) – характеристика, которая определяет не только эффективность использования поверхности антенной решетки (АР), но и нормированный коэффициент направленного действия (КНД), т.е. КНД, отнесенный к заданной нормированной площади $\frac{4\pi S_{\text{геом}}}{\lambda^2}$.

$$D = \frac{4\pi S_{\text{геом}}}{\lambda^2} \nu,$$

где $S_{\text{геом}}$ – площадь излучающей системы; λ – длина волны.

Если определены нормированные габаритные размеры антенны $\frac{4\pi S_{\text{геом}}}{\lambda^2} = \text{const}$, то единственным путем повышения КНД, для заданного уровня боковых лепестков (УБЛ), будет являться увеличение КИП. В этом аспекте КИП можно рассматривать как относительный КНД антенной решетки.

Известно, что максимальным КИП обладает равномерное амплитудное распределение [1-5]. Однако из-за высокого УБЛ ($\xi = -13.2$ дБ) данное амплитудное распределение находит крайне ограниченное применение на практике, поэтому перед разработчиками стоит задача синтеза амплитудных распределений с максимальным значением КИП для заданного низкого УБЛ.

Какой же формой должна обладать ДН с максимальным значением КИП при заданном УБЛ? Рассмотрим, для примера, ДН с Дольф-Чебышевским и спадающим амплитудными распределениями. Считается, что АР с Дольф-Чебышевскими амплитудными распределениями обладают максимальным КИП [1-4]. Отметим, что данные ДН имеют равномерную огибающую БЛ, и как следствие, минимальную ширину главного луча, к примеру, по уровню -3 дБ $\theta_{0.5}^{\text{ДЧ}} = 5.38^\circ$; со спадом БЛ $\theta_{0.5} = 5.94^\circ$,

$\theta_{0.5}^{\text{ДЧ}} < \theta_{0.5}$. Расчет приведен для линейной структуры АР, состоящей из $2N = 12$ излучателей, расположенных с шагом $d = 0.5\lambda$ и УБЛ $\xi = -30$ дБ.

Приведем обоснование оптимальной формы ДН по критерию максимума КИП для заданного УБЛ. Для этого найдем связь КИП с амплитудной ДН линейной АР. За основу возьмем фундаментальное соотношение [1]:

$$D = \frac{4\pi}{2\pi \int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^{\pi/2} f(\theta, \varphi)^2 \cos(\theta) d\theta}, \quad (1)$$

где $f(\theta, \varphi)$ – пространственная ДН.

По аналогии с (1) получаем соотношение для связи КИП линейных амплитудных распределений в плоскости:

$$v \int f^2(\theta) d\theta = \text{const}, \quad (2)$$

где $f(\theta)$ - амплитудная ДН для заданного УБЛ, v - соответствующий ей КИП.

Соотношение (2) позволяет однозначно связать значение КИП и амплитудную ДН для соответствующего им синфазного амплитудного распределения, а так же определить вторичные параметры антенны, такие как УБЛ (усредненный, максимальный), ширину ДН (усредненную, по уровню половинной мощности и нулевому) через КИП.

Для доказательства оптимальной формы ДН используем соотношение (2). Для простоты восприятия вместо реальных ДН рассмотрены аппроксимируемые ДН с прямоугольным главным лучом $S_{\text{ГЛ}}$ и усредненным УБЛ $\xi_{\text{уср}}$ (рис. 1).

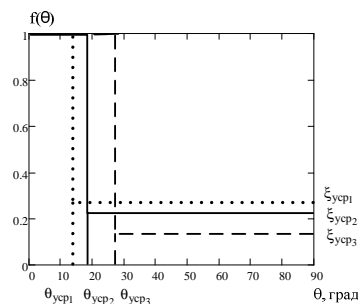


Рисунок 1

На рис. 1 представлены нормированные ДН, амплитудные распределения которых обладают разным значением КИП v_i и, как следствие, разным $\xi_{\text{уср}i}$.

$$\theta_{\text{уср}i} = S_{\text{ГЛ}i}; \quad \xi_{\text{уср}i}^2 = \frac{S_{\text{БЛ}i}}{\pi/2 - \theta_{\text{уср}i}}.$$

Исходя из полученного соотношения (2), следует, что величина КИП для заданной структуры АР будет определять усредненный УБЛ и наоборот. Чем ниже $\xi_{\text{уср}}$, тем ниже v .

Для определения оптимального закона распределения БЛ с точки зрения заданного критерия рассмотрены ДН с заданным $\xi = \xi_1 = \xi_2 = \xi_3$ и разным законом распределения

БЛ (рис.6): 1) равномерный (Дольф–Чебышевское распределение) 2) спадающий; 3) нарастающий.

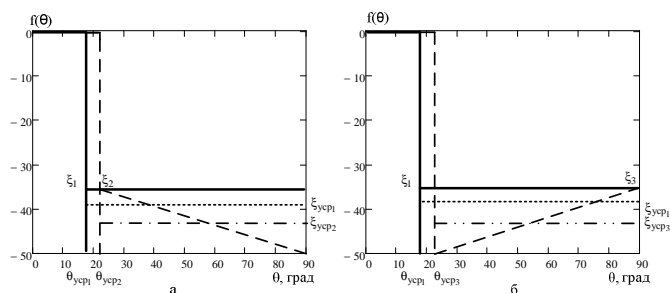


Рисунок 2

Как видно из рис. 2 а, б, для заданного значения ξ , максимальным $\xi_{\text{уср}}$ будут обладать ДН с Дольф-Чебышевскими амплитудными распределениями, имеющими максимальную площадь. Действительно площадь прямоугольника всегда больше площади любой другой фигуры, вписанной в этот прямоугольник и касающейся его стороны одной или несколькими вершинами. Как следует из соотношения (2), максимальным КИП обладает ДН с максимальным $\xi_{\text{уср}}$, который и будет у ДН с равномерной огибающей БЛ. Данное доказательство рассмотрено с физической точки зрения на основе полученного соотношения (2). Строго с математической точки зрения, доказательство рассмотрено в литературе [3-4] и реализовано Дольф - Чебышевскими амплитудными распределениями, ДН которых обладают равными БЛ.

Отметим важный момент, что при проектировании АР, как правило, на первом этапе проводится синтез множителя АР $f_{\text{множ.АР}}(\theta)$, а направленные свойства излучателей учитываются на конечном этапе [4]. Если за основу $f_{\text{множ.АР}}(\theta)$ взять оптимальную ДН с равномерной огибающей БЛ, по Дольф-Чебышеву, то реальная ДН АР $f_{\text{АР}}(\theta)$ определяется, исходя из теоремы перемножения, как [4]:

$$f_{\text{АР}}(\theta) = f_{\text{множ.АР}}(\theta) f_{\text{изл}}(\theta) . \quad (3)$$

Т.к. ДН любого излучателя обладает направленными характеристиками, то полученная ДН АР оказывается далека от оптимальной по рассмотренному критерию, что показано на рис. 3 а, б (кривая 3), так как БЛ имеют спад. Следовательно, для получения максимального КИП, равными БЛ должна обладать ДН АР, а не множителя АР. В предложенном примере в качестве $f_{\text{изл}}(\theta)$ рассмотрена ДН полуволнового вибратора над экраном в плоскости Е (рис. 3 а, б кривая 1).

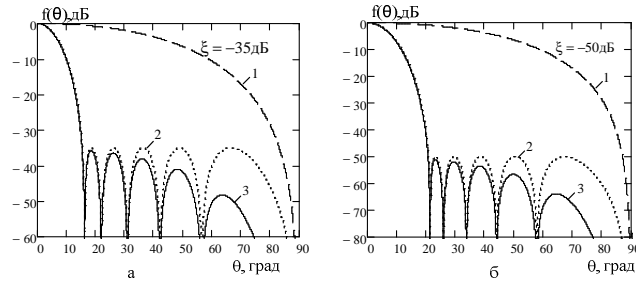


Рисунок 3

Оптимальная форма ДН множителя АР, исходя из (3), находится как отношение оптимальной формы ДН АР с равным УБЛ к ДН излучателей:

$$f_{\text{множ.АР}}(\theta) = f_{\text{АР}}(\theta) / f_{\text{изл}}(\theta) . \quad (4)$$

Так как все излучатели направлены ($f_{\text{изл}}(\theta) \neq 1$), то ДН множителя АР должна обладать нарастающим УБЛ. Данная форма ДН множителя АР позволяет получить одинаковый УБЛ АР во всем секторе пространства, а, следовательно, максимально возможное значение $\xi_{\text{уср}}$, и минимальную ширину главного лепестка ДН для заданного УБЛ при фиксированных габаритных размерах апертуры излучающей системы и, как следствие, максимум КИП.

Итак, признак оптимальности ДН АР с точки зрения минимальной ширины главного лепестка ДН и максимума КИП при заданном УБЛ и апертуры: равномерный закон огибающей БЛ во всем секторе пространства. Отсюда, с математической точки зрения, следуют условия оптимальности ДН: 1) необходимое условие – огибающая БЛ ДН множителя АР возрастающая функция во всем секторе пространства; 2) достаточное условие – огибающая БЛ ДН АР равномерная функция во всем секторе пространства.

Для сравнения проведен синтез ДН множителя АР с Дольф-Чебышевским амплитудным распределением (см. рис. 3 кривая 2) и синтез амплитудного распределения с оптимальной формой ДН множителя АР (рис. 4 кривая 2) и заданной ДН излучателя (полуволновый вибратор над экраном в плоскости Е) (рис. 3, 4 кривая 1) для $\xi = -35$ дБ и $\xi = -50$ дБ соответственно. В обоих случаях рассмотрена одна и та же структура, содержащая 12 излучателей с шагом $d = 0.5\lambda$. Результаты синтеза представлены в табл.1. для $\xi = -35$ дБ и в табл. 2 для $\xi = -50$ дБ.

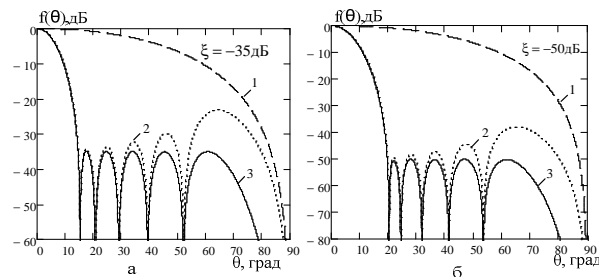


Рисунок 4

Параметры амплитудных распределений для $\xi = -35$ дБ

Таблица 1

Амплитудные распределения	Коэффициенты амплитудного распределения						$\theta_{0.5}$, град	ν	Выигрыш по $\theta_{0.5}$, %	Выигрыш по ν , %
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6				
Оптимальные	1	0.933	0.722	0.596	0.294	0.27	10.84	0.834	5.5	4
Дольф-Чебышевские	1	0.9	0.725	0.514	0.311	0.172	11.44	0.702		

Как видно из рис. 3 а, 4 а в обоих случаях ДН АР обладает одинаковым заданным УБЛ $\xi = -35$ дБ.

Параметры амплитудных распределений для $\xi = -50$ дБ

Таблица 2

Амплитудные распределения	Коэффициенты амплитудного распределения						$\theta_{0.5}$, град	ν	Выигрыш по $\theta_{0.5}$, %	Выигрыш по ν , %
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6				
Оптимальные	1	0.873	0.649	0.419	0.202	0.087	12.487	0.722	5	3.7
Дольф-Чебышевские	1	0.86	0.629	0.381	0.18	0.059	13.14	0.696		

Выигрыш по КИП в сравнении со считающимися оптимальными Дольф-Чебышевскими распределениями составляет от 4 % для классического полуволнового вибратора над экраном и до 10 % для директорных и диэлектрических антенн.

Библиографический список

1. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. – М.: Связь, 1977. – Ч.2. – 288с.
2. 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. – 632с.
3. Зелкин Е.Г. Методы синтеза антенн // Е.Г. Зелкин, В.Г. Соколов – М.: Сов.радио, 1980.- 296 с.
4. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ: Учеб. для радиотехнич. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.
5. Лайко К. А., Филимонова Ю.О. Амплитудный синтез диаграмм направленности антенных решеток с минимальным уровнем первого лепестка и контролируемым спадом последующих. Журнал Доклады ТУСУР №3, 2013- с.33-37.