

E. V. Volkhonskaya, E. V. Korotey  
Immanuel Kant Baltic federal university

### Theoretical aspects in an evaluation of the directed properties of loops

*The general theoretical approach in an evaluation of the directed properties of "square" loops is offered in this article. Also the comparative evaluation of the received results with known elements of the theory of "magnetic" loops is carried out. The stated approach allowed to unite existing theoretical and practical approaches in an evaluation of the directed properties both "magnetic" loops and loops, and can be the basis for model researches of properties of wire antennas of the closed type of any configuration.*

Loop, magnetic loop, field pattern, effective length, directivity, radiation resistance

Статья поступила в редакцию 30 апреля 2014 г.

УДК 621.396.67.012.12

К. А. Лайко, Ю. О. Филимонова  
Новосибирский государственный технический университет

## Оптимальные диаграммы направленности антенных решеток с низким уровнем боковых лепестков

*Получено соотношение, связывающее амплитудную диаграмму направленности (ДН) линейных антенн с коэффициентом использования поверхности раскрыва. Предложена методика определения оптимальной формы огибающей боковых лепестков (БЛ) по критерию максимума коэффициента использования поверхности раскрыва для заданного уровня БЛ и ДН излучателей. Обосновано нарастание огибающей БЛ.*

### Оптимальная форма диаграммы направленности, коэффициент использования поверхности раскрыва, нарастающий уровень боковых лепестков, признак оптимальности

Коэффициент использования поверхности раскрыва (КИПР)  $\nu$  – характеристика, которая определяет не только эффективность использования поверхности раскрыва антенной решетки (АР), но и нормированный коэффициент направленного действия (КНД) в направлении максимума излучения:

$$D = (4\pi S_{\text{и}} / \lambda^2) \nu,$$

т. е. КНД, отнесенный к заданной нормированной площади  $4\pi S_{\text{и}} / \lambda^2$  ( $S_{\text{и}}$  – площадь излучающей системы;  $\lambda$  – длина волны).

При зафиксированной нормированной площади единственным путем повышения КНД для заданного уровня боковых лепестков (БЛ)  $\xi$  является увеличение КИПР. В этом аспекте КИПР можно рассматривать как относительный КНД антенной решетки.

Максимальным КИПР обладает равномерное распределение амплитуд излучения отдельных излучателей АР:  $A_n = 1$  ( $-N \leq n \leq N$  – номер излучателя относительно центра АР, причем  $2N$  – количество излучателей в АР) [1]–[4]. Диаграмма

направленности (ДН) для такого распределения представлена на рис. 1 в линейном (а) и в логарифмическом (б) масштабах.

Из-за высокого уровня БЛ (достигающего максимального значения  $\xi = -13.2$  дБ) указанное амплитудное распределение находит крайне ограниченное применение на практике. Поэтому перед разработчиками стоит задача синтеза амплитудных распределений с максимальным значением КИПР при заданном уровне БЛ.

Рассмотрим в качестве примера ДН с Дольф–Чебышевским (равномерным) (рис. 2, сплошная линия) и спадающим (рис. 2, штриховая линия) амплитудными распределениями БЛ. Данные ДН построены для линейной антенной решетки, состоящей из  $2N = 12$  излучателей, расположенных с шагом  $d = 0.5\lambda$  при уровне БЛ  $\xi = -30$  дБ. Известно, что АР с Дольф–Чебышевским амплитудным распределением БЛ обладает максимальным КИПР [1]–[4]. ДН для такого распределения имеет одинаковые максимумы БЛ во всем секторе пространства (имеет постоянную огибающую БЛ) и, как след-

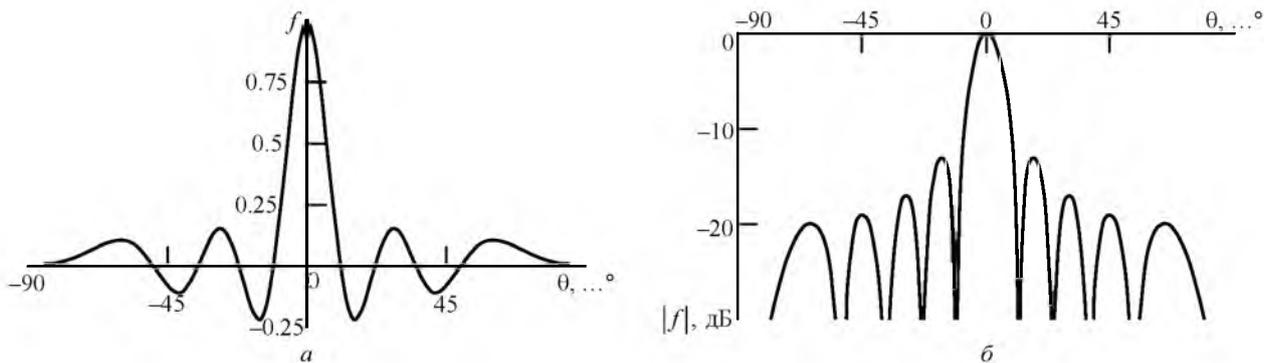


Рис. 1

стве, минимальную ширину главного лепестка (ГЛ). Так, ширина ГЛ по уровню  $-3$  дБ  $\theta_{ДН0.5} = 5.38^\circ$ . Для ДН со спадом БЛ  $\theta_{0.5} = 6.42^\circ > \theta_{ДН0.5}$  (рис. 2).

Обоснуем оптимальную форму ДН по критерию максимума КИПР для заданного уровня БЛ. Для этого найдем связь КИПР с амплитудной ДН линейной АР. За основу возьмем фундаментальное соотношение [2]:

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

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

Исходя из этого соотношения и учитывая указанное оптимальное свойство Дольф–Чебышевского амплитудного распределения, для линейной АР запишем:

$$\nu \int f^2(\theta) d\theta = \text{const}. \quad (1)$$

Соотношение (1) позволяет связать значение КИПР и амплитудную ДН для заданного синфазного амплитудного распределения. Оно дает возможность определить через КИПР такие параметры антенны, как усредненный и максимальный уровни БЛ, ширину ДН (усредненную, по уровню половинной мощности и по нулевому уровню).

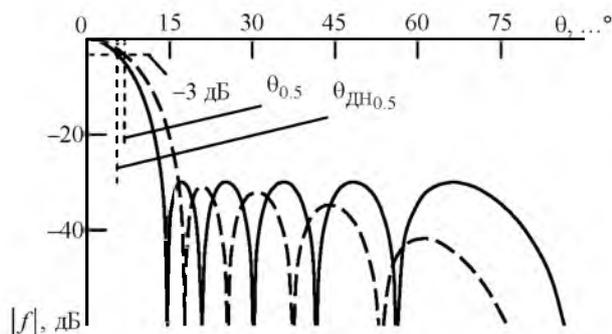


Рис. 2

Для простоты последующего анализа аппроксимируем реальные ДН диаграммами с постоянным по уровню ГЛ и с усредненной по углу мощностью излучения в области БЛ ( $\xi_{\text{уср}}$ ) (рис. 3). Рассмотрим нормированные ДН, обладающие разными значениями КИПР ( $\nu_i$ ) и, как следствие, разными значениями  $\xi_{\text{уср}i}$ :

$$\theta_{\text{уср}i} = S_{\text{ГЛ}i}; \quad \xi_{\text{уср}i}^2 = \frac{S_{\text{БЛ}i}}{\pi/2 - \theta_{\text{уср}i}}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где  $S_{\text{БЛ}i}$  – площадь на рис. 3, занимаемая областью БЛ.

Соотношение (1) описывает перераспределение энергии между ГЛ и БЛ при изменении значения КИПР. Так, при уменьшении  $S_{\text{БЛ}}$  площадь  $S_{\text{ГЛ}}$ , занимаемая ГЛ на рис. 3, увеличивается. Поэтому возрастает  $\theta_{\text{уср}}$ , что приводит к снижению КИПР.

Сравним несколько идеализированных ДН с разными законами распределения БЛ при условии равного максимального уровня БЛ  $\xi_1 = \xi_2 = \xi_3$  (рис. 4, где 1 – ДН с равномерным (Дольф–Чебышевским) распределением БЛ; 2 – ДН со спадающими БЛ; 3 – ДН с нарастающими ДН). Не прибегая к строгому математическому доказательству (см. [5]), можно заключить, что ДН с равномерным распределением обладает наибольшим среди представленных значением  $\xi_{\text{уср}}$  и, следовательно, наи-

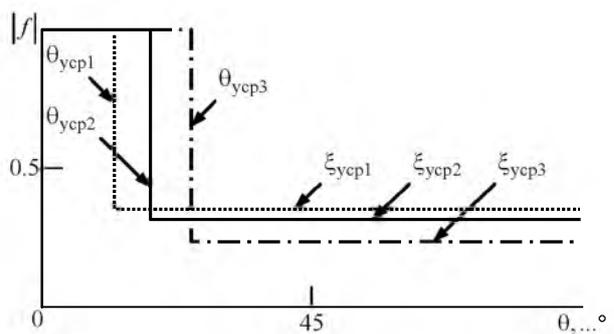


Рис. 3

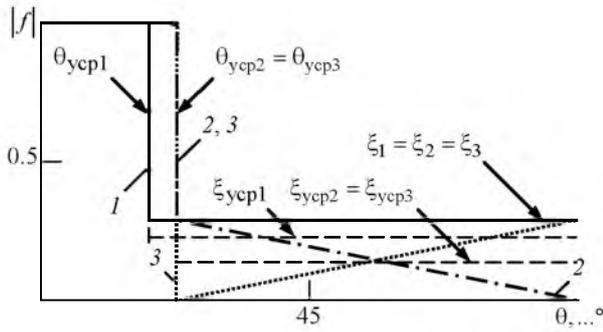


Рис. 4

меньшим значением  $\theta_{\text{ср}}$  и наибольшим КИПР. Такое заключение следует из того, что геометрические фигуры, ограничивающие область БЛ для распределений 2 и 3 на рис. 4, оказываются вписанными в аналогичную фигуру распределения 1 и, следовательно, обладают меньшей площадью.

При проектировании АР, как правило, ДН описывается произведением двух диаграмм: ДН совокупности изотропных (ненаправленных) излучателей  $f_{\text{АР}_{\text{мн}}}(\theta)$  (множителя АР) и ДН отдельного излучателя  $f_{\text{изл}}(\theta)$  [5]:

$$f_{\text{АР}}(\theta) = f_{\text{АР}_{\text{мн}}}(\theta) f_{\text{изл}}(\theta). \quad (2)$$

Поскольку реальные излучатели всегда обладают направленностью ( $f_{\text{изл}}(\theta) \neq \text{const}_\theta$ ), синтез первого множителя в (2) как ДН с Дольф–Чебышевским амплитудным распределением не позволяет получить оптимальную ДН АР в целом. Рассмотрим этот вопрос на конкретном примере [6]. На рис. 5, а приведены ДН отдельного излучателя 1 и Дольф–Чебышевская ДН множителя АР 2 при следующих параметрах модели: линейная АР с 10 излучателями – полуволновыми вибраторами, расположенными с шагом  $d = 0.5\lambda$ ; максимальный уровень БЛ АР  $\xi = -30$  дБ. Как следует из рисунка, при этом ДН АР получилась со спадающими БЛ (кривая 3), т. е. не оптимальной.

Определив ДН множителя из (2):

$$f_{\text{АР}_{\text{мн}}}(\theta) = f_{\text{АР}}(\theta) / f_{\text{изл}}(\theta), \quad (3)$$

получим следующее:

– огибающая ДН АР должна быть равномерной во всем секторе пространства;

– огибающая ДН множителя АР в секторе БЛ должна быть возрастающей.

ДН, удовлетворяющие указанным условиям, представлены на рис. 5, б для описанной ранее модели АР. Обозначения кривых соответствуют рис. 5, а. Синтезированные амплитудные распределения излучателей следующие:

– для ДН множителя АР с Дольф–Чебышевским распределением (рис. 5, кривая 3):  $A_1 = 1$ ,  $A_2 = 0.878$ ,  $A_3 = 0.669$ ,  $A_4 = 0.43$ ,  $A_5 = 0.258$  (номера излучателей отсчитывались от центра АР). При этом получены значения КИПР  $\nu = 0.847$  и ширина луча по уровню половинной мощности  $\theta_{0.5} = 13.02^\circ$ ;

– для полностью оптимальной ДН с учетом направленности отдельного излучателя (5) (рис. 6, кривая 3):  $A_1 = 1$ ,  $A_2 = 0.847$ ,  $A_3 = 0.75$ ,  $A_4 = 0.384$ ,  $A_5 = 0.391$ ; КИПР  $\nu = 0.881$ , ширина луча по уровню половинной мощности  $\theta_{0.5} = 12.224^\circ$ .

Выигрыш полностью оптимальной ДН АР в сравнении с ДН при Дольф–Чебышевском амплитудном распределении множителя по КИПР составляет 4%; по ширине луча – 6.5%.

При снижении максимального уровня БЛ выигрыш полностью оптимальной ДН по сравнению с ДН АР, синтезированной на основе множителя с Дольф–Чебышевским амплитудным распределением, по КИПР возрастает, а по ширине ГЛ снижается. Приведенное заключение иллюстрируется рис. 6, на котором приведены ДН, аналогичные ДН на рис. 5, но полученные для  $\xi = -50$  дБ. В этом случае для полностью опти-

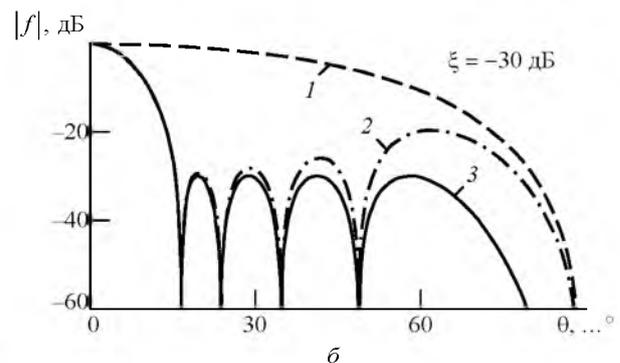
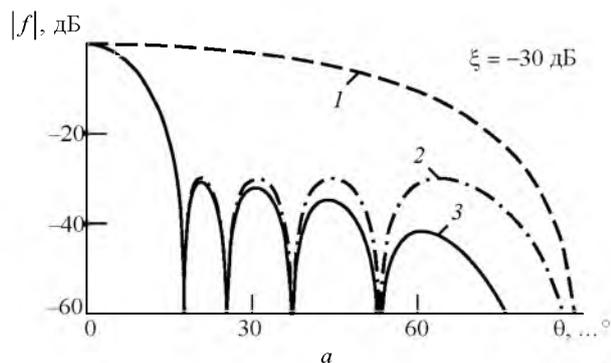


Рис. 5

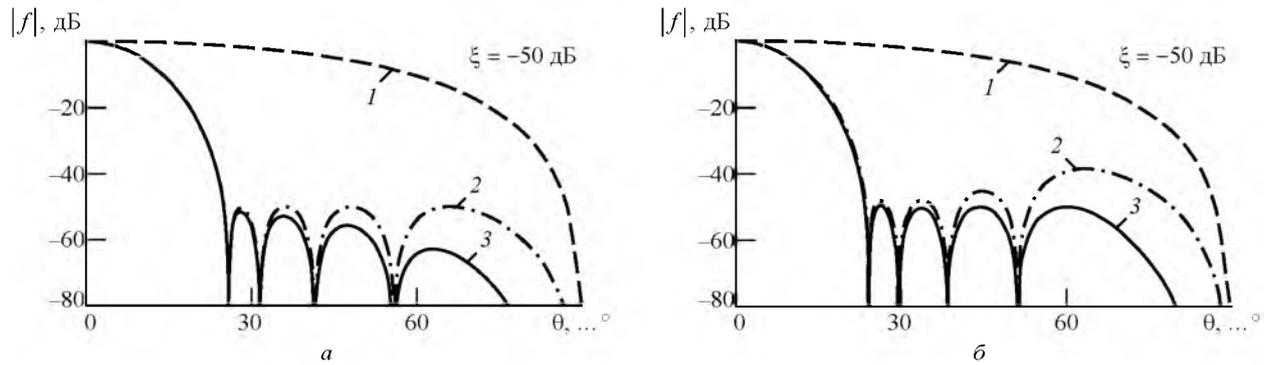


Рис. 6

мальной ДН имеем (рис. 6, а):  $A_1 = 1$ ,  $A_2 = 0.805$ ,  $A_3 = 0.511$ ,  $A_4 = 0.239$ ,  $A_5 = 0.07$ ,  $v = 0.699$ ,  $\theta_{0.5} = 15.68^\circ$ ; для равномерного закона распределения БЛ множителя (рис. 6, б):  $A_1 = 1$ ,  $A_2 = 0.819$ ,  $A_3 = 0.548$ ,  $A_4 = 0.269$ ,  $A_5 = 0.101$ ,  $v = 0.73$ ,  $\theta_{0.5} = 14.78^\circ$ . Выигрыш по КИПР – 4.4 %, по ширине луча – 6.1 %.

На основании проведенного исследования можно утверждать, что процедуру синтеза оптимальной ДН АР необходимо реализовывать в несколько этапов.

На первом этапе следует оптимизировать ДН множителя АР, полагая ДН отдельного излучателя равномерной по всей области излучения.

На втором этапе необходимо учесть ДН элементарного излучателя АР и согласно (3) скорректировать ДН множителя, выполнив ее с нарастающим по углу уровнем БЛ.

На заключительном этапе проектирования АР необходимо провести анализ результирующей амплитудной ДН для различных плоскостей  $\varphi \in [0 \dots 90^\circ]$  и по разбросу максимумов БЛ от заданного среднего уровня сделать вывод об оптимальности данного амплитудного распределения по рассмотренному критерию максимума КИПР для заданного уровня БЛ и для ДН излучателя.

Выигрыш по КИПР в сравнении со считающимся оптимальным Дольф–Чебышевским распределением для полуволнового вибратора над экраном составляет не менее 4 %. При использовании остронаправленных антенн требуется больший градиент нарастания БЛ, следовательно, возрастает средний уровень БЛ, что приводит к увеличению КИПР. Результаты синтеза амплитудных распределений показали, что при использовании директорных и диэлектрических антенн с коэффициентом усиления около 12 дБ выигрыш по КИПР возрастает до 10 %.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айзенберг Г. З. Антенны УКВ: в 2 ч. М.: Связь, 1977. Ч. 2. 288 с.
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. Зелкин Е. Г., Соколов В. Г. Методы синтеза антенн. М.: Сов. радио, 1980. 296 с.
4. Антенные решетки. Методы расчета и проектирования. Обзор зарубежных работ / сост.: Л. С. Бе-

ненсон, В. А. Журавлев, С. В. Попов, Г. А. Постнов; под общ. ред. Л. С. Бененсона. М.: Сов. радио, 1966. 367 с.

5. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ: учеб. для радиотехн. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1988. 432 с.

6. Лайко К. А., Филимонова Ю. О. Амплитудный синтез диаграмм направленности антенных решеток с минимальным уровнем первого лепестка и контролируемым спадом последующих // Докл. ТУСУР. 2013. № 3. С. 33–37.

K. A Layko, Yu. O. Filimonova  
Novosibirsk state technical university

### The optimal radiation pattern for the antenna array with the low level of side lobes

*The ratio of amplitude radiation pattern and aperture efficiency for the linear antennas obtained. The methodology for the obtaining of optimal shape of radiation pattern for antenna arrays by maximum of aperture efficiency criteria for defined level of side lobes and emitters' radiation pattern is considered. The rising law of envelope line for side lobes is proved.*

Optimal shape of radiation pattern, aperture efficiency, rising level of side lobes, optimality criteria

Статья поступила в редакцию 12 марта 2014 г.