

УДК 621.396.07

В.И. БЛЕДНОВ, Н.Н. ДЕГТЯРЬ, С.В. НАУМОВИЧ

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Украина

## ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТИ ДУГОВЫХ ПЕРЕИЗЛУЧАЮЩИХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК

Рассмотрены особенности дуговых антенных решёток, применяемых в качестве радиолокационных отражателей. Проведен анализ характеристик направленности дуговых решёток, а также их сравнение с соответствующими характеристиками прямолинейных переизлучающих и самофазурирующихся антенных решёток. Приведены соотношения для расчета диаграмм направленности и диаграмм переизлучения дуговых антенных решеток на основной и кроссполаризационной составляющих вторичного поля.

**Ключевые слова:** эффективная площадь рассеяния, радиолокационные отражатели, прямолинейные переизлучающие антенные решётки, дуговые антенные решетки, конформные антенные решётки, кроссполаризация, решётки Ван Атта.

### Введение

Интерес к радиолокационным отражателям в виде антенных решеток обусловлен тем, что они позволяют существенно расширить возможности применения, усилить и модулировать вторичные сигналы, изменять поляризацию и направленные свойства. Прямолинейные и плоские решетки, в которых за счет попарного соединения симметричных антенных элементов линиями передачи одинаковой длины достигается максимальное переизлучение в направлении на источник падающей волны (решетки Ван Атта), довольно подробно рассмотрены в специальной литературе. Некоторые особенности расчета эффективной площади рассеяния (ЭПР) таких решеток и отдельных антенн проанализированы в [1, 2].

В авиационно-космической технике возникает необходимость размещения элементов антенных решеток на цилиндрических, конических или сферических поверхностях, однако характеристики таких решеток в режиме переизлучения изучены недостаточно полно.

Целью настоящей статьи является анализ характеристик направленности дуговых переизлучающих антенных решеток как на основной, так и на кроссполаризации. Предполагается, что некоторые конформные решетки могут быть представлены в виде системы дуговых подрешеток.

### 1. Характеристики направленности антенных решеток в плоскости дуги

Рассмотрим пассивную дуговую переизлучающую решетку (рис. 1).

Будем учитывать только поля, переизлучаемые антенными элементами за счет энергии, передаваемой по соединительным линиям передачи.

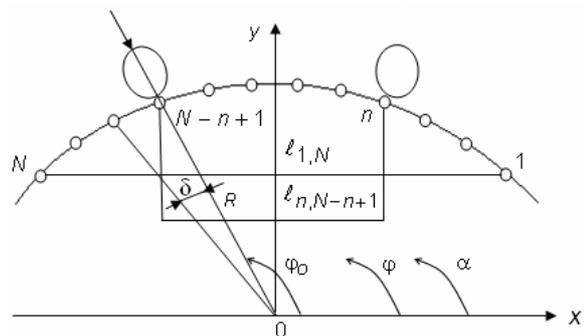


Рис. 1. Геометрия антенной решетки

Пренебрегая для простоты взаимной связью между излучателями, для ненормированной диаграммы направленности (ДН) по полю дуговой решетки с учетом ее геометрии можно получить следующее выражение:

$$f(\Theta, \varphi) = \sum_{n=1}^N f_n(\Theta, \varphi) \cdot f_{N-n+1}(\Theta_0, \varphi_0) \times \exp[i(kx_n \sin \theta \cos \varphi + ky_n \sin \theta \sin \varphi - \psi_n)], \quad (1)$$

где  $f_n(\Theta, \varphi)$  – ДН  $n$ -го элемента;

$f_{N-n+1}(\Theta_0, \varphi_0)$  – значение ДН сопряженного элемента для направления падения волны;

$\Theta_0, \varphi_0$  – углы падения волны;

$\Theta, \varphi$  – углы наблюдения;

$x_n = R \sin \Delta_n, y_n = R \cos \Delta_n$  – координаты  $n$ -го элемента;

$\Delta_n = ((N-n+1)/2)\delta$ ;  $\delta$  – угловое расстояние между излучателями;

$$\psi_n = kR[1 + \sin(\Delta_n - \varphi_0)] \sin \theta_0 + k_1 l_{n, N-n+1};$$

$l_{n, N-n+1}$  – длина линии передачи, соединяющей сопряженные элементы;

$R$  – радиус окружности;

$k=2\pi/\lambda$ ;  $k_1=2\pi/\lambda_b$ ;  $\lambda_b$  – длина волны в линии передачи.

Для большинства практических случаев формулу ДН одиночных элементов решетки можно аппроксимировать функциями вида:

$$f_n(\Theta, \varphi) = \sin^p(\varphi - \Delta_n) \sin^q \theta;$$

$$f_{N-n+1}(\Theta_0, \varphi_0) = \sin^p(\varphi_0 - \Delta_n) \sin^q \theta_0, \quad (2)$$

где  $p, q$  – положительные числа;

$$\pi - \Delta_n < \varphi_0 < \pi + \Delta_n.$$

При замене в (1) углов  $\Theta, \varphi$  на  $\Theta_0, \varphi_0$  получим функцию  $f(\Theta_0, \varphi_0)$ , которую назовем диаграммой переизлучения (ДП) по полю. Так, например, для ДП по полю дуговой решетки в плоскости дуги ( $\Theta_0 = 90^\circ$ ) имеем:

$$f(\varphi_0) = \sum_{n=1}^N f_n(\varphi_0) f_{N-n+1}(\varphi_0) \times \exp[i \cdot (2kR \cos \Delta_n \sin \varphi_0 - k_1 l_{n, N-n+1})]. \quad (3)$$

Очевидно, что угловая зависимость однопозиционной ЭПР определяется формулой ДП по мощности:

$$f_p(\varphi_0) = \left( \sum_{n=1}^N f_n(\varphi_0) f_{N-n+1}(\varphi_0) \cos \beta_n \right)^2 + \left( \sum_{n=1}^N f_n(\varphi_0) f_{N-n+1}(\varphi_0) \sin \beta_n \right)^2, \quad (4)$$

где  $\beta_n = 2kR \cos \Delta_n \sin \varphi_0 - k_1 l_{n, N-n+1}$ .

Для многоэлементных антенных решеток при  $d \leq 0,6\lambda$  суммировании выражениях для ДН и ДП можно заменить интегрированием. При этом следует учесть, что в дуговых решетках в формировании ДН участвуют только те излучатели, которые совместно с сопряженными являются «видимыми» для падающей плоской волны. Так, например, для полукольцевой решетки с одинаковыми длинами соединительных линий и ДН отдельных элементов вида (2) при  $p = q = 1$  интегрирование с пределами по  $\varphi_0$  от 0 до  $\pi$  дает следующую формулу для ДП в плоскости дуги, выраженную через функции Бесселя:

$$f(\varphi_0) = J_2(2kR \sin \varphi_0) + J_0(2kR \sin \varphi_0) \cos 2\varphi_0. \quad (5)$$

Анализ выражения (5) показывает, что при одинаковых длинах соединительных фидеров форма ДП полукольцевой решетки весьма критична к изменениям угла падения  $\varphi_0$  и отношения  $R/\lambda$ , а при некоторых углах падения такая решетка оказывается «невидимой».

Для того чтобы переизлучаемые поля складывались в фазе в некотором требуемом направлении, длины соединительных линий должны компенсировать разность фаз полей соседних элементов, вызванную отклонением поверхности решетки от плоскости. Из геометрии решетки следует, что для синфазного сложения в направлении выбранного угла фазирования  $\alpha$  длина фидеров должна определяться по формуле

$$l_{n, N-n+1} = \frac{1}{k_1} [k l_{1, N} + 2kR \times \sin \alpha (\cos \Delta_n - \cos \frac{N-1}{2} \delta)]. \quad (6)$$

Здесь величина  $l_{1, N}$  должна быть задана или выбрана по конструктивным соображениям.

При выбранном угле фазирования  $\alpha$  формулу для ДН по мощности можно представить в виде

$$f_p(\varphi) = \left( \sum_{n=1}^N f_n(\varphi) f_{N-n+1}(\varphi) \cos \gamma_n \right)^2 + \left( \sum_{n=1}^N f_n(\varphi) f_{N-n+1}(\varphi) \sin \gamma_n \right)^2, \quad (7)$$

где  $\gamma_n = a \cdot \sin \Delta_n + b \cdot \cos \Delta_n$ ;

$$a = kR (\cos \varphi - \cos \varphi_0);$$

$$b = kR (\sin \varphi + \sin \varphi_0 - 2 \sin \alpha).$$

Формулу для ДП по мощности в плоскости дуги при заданном  $\alpha$  можно записать так:

$$f_p(\varphi_0) = \left( \sum_{n=1}^N f_n(\varphi_0) f_{N-n+1}(\varphi_0) \cos \eta \right)^2 + \left( \sum_{n=1}^N f_n(\varphi_0) f_{N-n+1}(\varphi_0) \sin \eta \right)^2, \quad (8)$$

где  $\eta = 2kR (\sin \varphi_0 - \sin \alpha)$ .

Для полукольцевой решетки:

$$f_p(\varphi_0) = J_2(\eta) + J_0(\eta) \cos 2\varphi_0.$$

Детальный анализ показывает, что главный лепесток ДН дуговой переизлучающей антенной решетки, сфазированной в направлении нормали к раскрытию, оказывается уже главного луча линейной решетки с таким же раскрытием. Это позволяет уменьшить число антенных элементов и увеличить расстояние между ними при обеспечении такого же коэффициента направленного действия. Очевидно, что с уменьшением углового раскрытия дуговой решетки характеристики этих антенн сближаются.

Следует отметить, что применение полукольцевых решеток в качестве радиолокационных отражателей ограничено довольно узкой ДН и энергетическими потерями из-за того, что крайние эле-

менты оказываются «невидимыми» при значительном отклонении угла падения волны от нормали к раскрыву.

На рис. 2 для примера представлены нормированные ДН дуговой решетки.

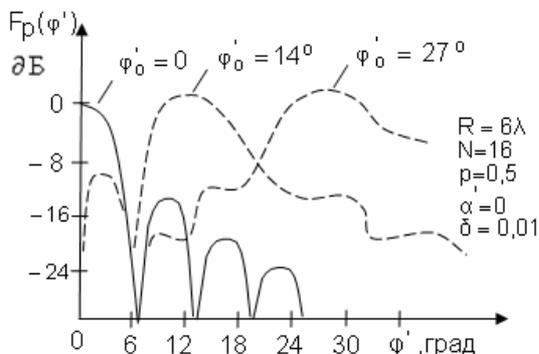


Рис. 2. Диаграммы направленности

На рис. 3 приведены нормированные ДП такой же решетки при различных углах фазирования, а также ДП адаптивной самофазирующейся решетки, которая обеспечивает максимальную при данной геометрии величину ЭПР для любого направления на приемопередатчик. Здесь обозначено

$$\varphi' = 90 - \varphi, \varphi_0' = 90 - \varphi_0, \alpha' = 90 - \alpha.$$

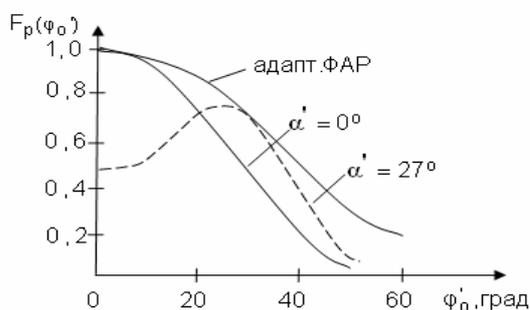


Рис. 3. Диаграммы переизлучения в плоскости дуги

## 2. Характеристики направленности антенных решёток в плоскости, перпендикулярной плоскости дуги

Выше проведен анализ ДН и ДП в плоскости дуги. Из (1) можно получить выражения для расчета ДН и ДП в плоскости, перпендикулярной плоскости дуги. Так, например, при выбранном угле фазирования  $\alpha$  и заданном  $\varphi$  ДН по мощности в этой плоскости будет определяться выражением

$$f_p(\Theta) = \left( \sum_{n=1}^N f_n(\Theta, \varphi) f_{N-n+1}(\Theta_0, \varphi_0) \cos \eta_n \right)^2 + \left( \sum_{n=1}^N f_n(\Theta, \varphi) f_{N-n+1}(\Theta_0, \varphi_0) \sin \eta_n \right)^2, \quad (9)$$

где  $\eta_n = kR(\sin \Theta - 2 \sin \alpha + 1) \cos \Delta_n$ .

Выражение для расчета ДП в этой плоскости может быть получено при замене углов  $\Theta$  и  $\varphi$  на  $\Theta_0$  и  $\varphi_0$ .

Известно, что поле излучения криволинейных решеток будет содержать кроссполяризационную компоненту, если одиночные излучатели неодинаково ориентированы в пространстве.

Рассмотрим случай, когда линейно поляризованные излучатели ориентированы по касательным к дуге.

В этом случае ДН и ДП на основной поляризации определяются выражением вида (9). Учитывая ориентацию излучателей, из (9) можно получить следующее выражение для ДП по мощности на кроссполяризации:

$$f_p^\perp(\Theta_0) = \left( \sum_{n=1}^N f_n(\Theta_0, \varphi_0) f_{N-n+1}(\Theta_0, \varphi_0) \gamma_n \cos u_n \right)^2 + \left( \sum_{n=1}^N f_n(\Theta_0, \varphi_0) f_{N-n+1}(\Theta_0, \varphi_0) \gamma_n \sin u_n \right)^2, \quad (10)$$

где  $\gamma_n = \cos \Theta_0 \cos(\varphi_0 + \Delta_n)$ ;

$$u_n = 2kR(\sin \varphi_0 \sin \Theta_0 - \sin \alpha) \cos \Delta_n.$$

Для примера на рис. 4 показаны нормированные ДП на основной поляризации (сплошная линия) в сечении  $\varphi_0 = 90^\circ$  и на кроссполяризации (штриховая линия) в сечении  $\varphi_0 = 45^\circ$ , где наблюдается ее максимальный уровень.

Логарифмический масштаб выбран из-за относительно малого уровня ДП на кроссполяризации.

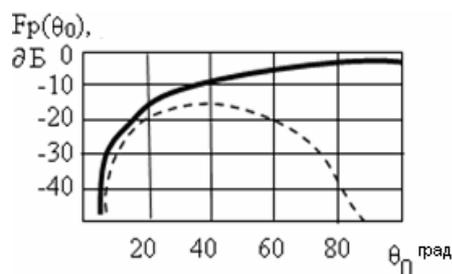


Рис. 4. Диаграммы переизлучения в плоскости, перпендикулярной плоскости дуги

Расчет производился для случая, когда

$$R = 6\lambda, N = 16, \alpha = 90^\circ, \delta = 0,0314.$$

При этом ДН одиночного элемента задавалась в виде:

$$f_n(\Theta_0, \varphi_0) = \sin(\varphi_0 - \Delta_n) \sin \Theta_0,$$

$$f_{N-n+1}(\Theta_0, \varphi_0) = \sin(\varphi_0 - \Delta_n) \sin \Theta_0.$$

## Заключення

1. Проведен анализ характеристик направленности дуговых переизлучающих антенных решеток, элементы которых попарно соединены фидерами.

2. Показано, что изменением длин соединительных фидеров или специальным фазированием можно изменить формы ДН и ДП, максимизировать величину ЭПР, сделать такие решетки «невидимыми» для определенного направления или получить практически одинаковую ЭПР в заданном секторе.

3. Полученные формулы могут быть использованы для расчета характеристик конформных переизлучающих антенных решеток (конических, цилиндрических, сферических) как на основной, так и на кроссполяризации.

## Литература

1. Бледнов В.И. Особенности расчета эффективной площади рассеяния переизлучающих антенных решеток / В.И. Бледнов, А.А. Шаповалов, А.И. Куртов // *Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2001. – Вып. 22. – С. 385-386.

2. Бледнов В.И. Оценка эффективной площади рассеивания симметричных вибраторов по их антенным параметрам и характеристикам / В.И. Бледнов, В.В. Баровский, В.В. Носов // *Вестн. науки техники*. – Х.: Дом науки и техники, 2002. – Вып 2-3. – С. 31-37.

Поступила в редакцию 7.04.2008

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры № 602 П.Ю. Костенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ НАПРАВЛЕННОСТІ ДУГОВИХ ПЕРЕ ВИПРОМІНЮЮЧИХ АНТЕННИХ РЕШІТОК

*В.І. Бледнов, М.М. Дігтярь, С.В. Наумович*

Розглянуті особливості дугових антенних решіток, що використовуються в якості радіолокаційних відбивачів. Проведений аналіз характеристик направленості дугових антенних решіток, а також їх порівняння з відповідними характеристиками прямолінійних перевипромінюючих антенних решіток та прямолінійних антенних решіток, що самофазуються. Приведені співвідношення для розрахунку діаграм направленості та діаграм перевипромінювання дугових антенних решіток на основній та кроссполяризаційній складовій вторинного поля.

**Ключові слова:** ефективна площа розсіювання, радіолокаційні відбивачі, прямолінійні перевипромінюючі антенні решітки, дугові антенні решітки, конформні антенні решітки, кроссполяризація, решітки Ван Атта.

## THE DIRECTIONAL CHARACTERISTICS OF THE ARC RETRODIRECTIVE ANTENNA ARRAY

*V.I. Blednov, N.N. Degtyar, S.V. Naumovich*

The features of directional characteristics of the arc antenna arrays used as radar reflectors are considered. The analysis of directional characteristics of the arc antenna arrays and comparison of them with corresponding characteristics of the rectilinear retrodirective and self-phased arrays is conducted. The relations for calculation of the directional patterns and re-emission patterns of the arc antenna arrays on the main and cross polarization constituents of secondary field are presented.

**Key words:** scattering cross-section, radar reflectors, rectilinear retrodirective arrays, arc antenna arrays, conformal antenna arrays, cross polarization, Van Atta array.

**Бледнов Владимир Иванович** – канд. техн. наук, доцент, старший преподаватель кафедры авиационных радиотехнических систем навигации и посадки Харьковского университета Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

**Дегтярь Николай Николаевич** – доцент кафедры авиационных радиотехнических систем навигации и посадки Харьковского университета Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

**Наумович Сергей Владимирович** – преподаватель кафедры авиационных радиотехнических систем навигации и посадки Харьковского университета Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.