

УДК 621.396.967.15

ПЕВЦОВ Г.В., заслуженный деятель науки и техники Украины, д.т.н., профессор,  
(Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба)

КАРЛОВ Д.В., к.т.н., старший научный сотрудник (Научный центр Воздушных Сил  
Харьковского университета Воздушных Сил им. И. Кожедуба)

КОНДРАТЕНКО А.П., д.т.н., профессор (Академия Внутренних войск МВД Украины),

ЛУКАШУК Е.В., ведущий инженер (Публичное Акционерное Общество «Акционерное  
Общество Научно – исследовательский институт радиотехнических измерений»)

## Основы построения коммутационной полусферической антенной решётки

*В статье рассматривается вопрос совмещения низкой стоимости антенны с механическим перемещением диаграммы направленности с быстрым немеханическим перемещением диаграммы направленности путем разработки коммутационной полусферической фазированной антенной решетки с характеристиками, идентичными характеристикам антенн с механическим перемещением диаграммы направленности.*

**Ключевые слова:** антенная система, система посадки, антенная решётка, электронное сканирование.

### Постановка задачи

Все известные радиотехнические системы, включая системы посадки летательных аппаратов (ЛА) (например, самолетов, спускаемых космических аппаратов) обладают одним существенным недостатком: для сопровождения ЛА антенные системы (АС) должны механически изменять своё положение как по азимуту так и углу места, причем, формируемые ими диаграммы направленности (ДН) должны перемещаться в пространстве с большой скоростью, достигающей 40 Гц. Известно, что любое механическое перемещение связано как с затратами энергетическими, так и с затратами эксплуатационными. Одним из решений данной проблемы это сопровождение ЛА с помощью фазированных антенных решеток. Однако применение фазированных решеток упирается в высокую стоимость конструкции.

**Цель статьи.** Поэтому в статье предлагается рассмотреть принцип построения полусферической антенной решетки для сопровождения летательных аппаратов и применения их для наземных комплексов управления космическими аппаратами.

### Основная часть

Проанализировав достоинства и недостатки [1] уже существующих кольцевых антенных решеток предлагается следующий вариант построения кольцевой антенной решетки. Такая антенная решётка составляется из кольцевых антенных решёток переменного радиуса как в азимутальной, так и в

угломестной плоскостях. Поэтому принцип построения и работы антенной системы рассмотрим на примере однокольцевой коммутационной антенной решётки. Так как данная антенная решетка является коммутационной, то в антенной решетке применяются коммутационные фазовращатели, которые формируют в заданном направлении требуемые ДН. Если требуется определить только одну угловую координату, например азимутальную, то данная антенная решетка может состоять из одного кольца, как показано в [2]. Для определения двух угловых координат, такая коммутационная антенная решетка должна состоять из двух взаимоперпендикулярных кольцевых антенных решеток, которые располагаются на сферической поверхности, как рассмотрено в [3,4]. Рассмотрим принцип построения предлагаемой коммутационной антенной решетки. Для пеленга ЛА ширина главного максимума ДН по уровню минус 3 дБ  $\beta_A, \varepsilon_A$  должна быть:

– при сканировании в горизонтальной плоскости:

$$\begin{aligned} \beta_A &\leq \beta_{A3} \\ \varepsilon_A &= \varepsilon_{A3} \end{aligned} \quad (1)$$

– при сканировании в вертикальной плоскости:

$$\begin{aligned} \beta_A &\leq \beta_{A3} \\ \varepsilon_A &= \varepsilon_{A3} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\beta_{Az}$  – заданные угловые секторы по азимуту и углу места, определяемые требованиями к точности определения координат,

$\epsilon_{Az}$  – ширина диаграммы направленности антенного элемента.

Так как соотношения (1) и (2) соответствуют веерным ДН, то для их реализации необязательно возбуждать антенные элементы по всей полусферической поверхности антенной решетки, а достаточно возбудить две ортогональные кольцевые антенные решетки (рис. 1).

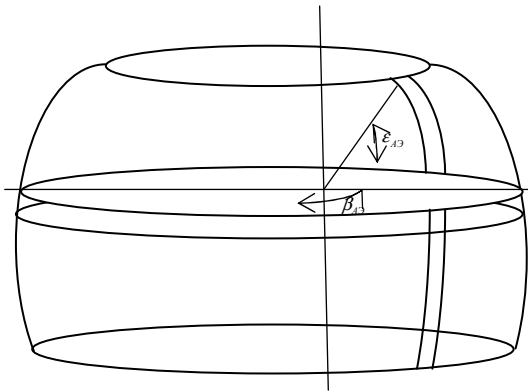


Рис.1. К пояснению возбуждения полусферических антенных решеток

Радиус кольца антенной решетки (КАР<sub>1</sub>) можно рассчитать из условий, как предложено в [2]: требуемой точности установки главного максимума ДН и требуемой точности определения пеленга.

Если ограничиться известными способами сканирования [2] с помощью управляемых фазовращателей, то для перекрытия, например, сектора  $\beta_c \times \epsilon_c = \pm 60^\circ \times 20^\circ$  необходимо иметь не менее  $n_k \times 1200$  дискретов фаз и такой же порядок величины количества антенных элементов и фазовращателей (ФВ), где  $n_k$  – количество колец антенных элементов. Поэтому для определения параметра  $n_k$  целесообразно оценить направленные свойства кольцевой антенной решетки, у которой отсутствовали бы управляемые ФВ. Оценку направленных свойств рассматриваемой кольцевой антенной решетки (КАР) проведем на примере однокольцевой антенной решетки. Рассмотрение других КАР будут отличаться только частотным диапазоном и соответственно радиусом. Известно, что формируемая с помощью однокольцевой антенной решетки ДН с направлением её главного максимума (ГМ)  $\theta = \theta_0$  и  $\varphi = \varphi_0$  имеет вид [5]:

$$F(\theta, \varphi) = \left| \sum_{n=1}^{N_{Az}} f_n(\theta, \varphi) \right| I_n e^{-jk a (\sin \theta_0 \cos(\varphi_0 - \varphi_n) - \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_0))}, \quad (5)$$

где  $N_{Az}$  – количество антенных элементов;

$f_n(\theta, \varphi)$  – ДН отдельного  $n$ -го антенного элемента;

$I_n$  – амплитуда тока  $n$ -го антенного элемента;

$a = r_i$  – радиус кольца.

Если АЭ – идентичны [ $f_n(\theta, \varphi) = \text{const}(r)$ ], изотропны [ $f_n(\theta, \varphi) = 1$ ] и возбуждены токами с одинаковыми амплитудами ( $I_n=1$ ), то ДН однокольцевой антенной решетки принимает вид:

$$F(\theta, \varphi) = \left| N_{Az} \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_{mN} (k\rho^{-jmN(\pi/2+\chi)}) \right|, \quad (6)$$

где

$$\rho = a \sqrt{(\sin \theta \cos \varphi - \sin \theta_0 \cos \varphi_0)^2 + (\sin \theta \sin \varphi - \sin \theta_0 \sin \varphi_0)^2};$$

$$\chi = \arcsin \frac{(\sin \theta \cos \varphi - \sin \theta_0 \cos \varphi_0)}{\sqrt{(\sin \theta \cos \varphi - \sin \theta_0 \cos \varphi_0)^2 + (\sin \theta \sin \varphi - \sin \theta_0 \sin \varphi_0)^2}}.$$

Если количество  $N_{Az}$  достаточно велико ( $N_{Az} > 10$ ), а диаметр кольца не очень большой, то ДН однокольцевой антенной решетки описывается первым членом суммы из (6), т.е.

$$F(\theta, \varphi) \approx J_0(k\rho). \quad (7)$$

Для улучшения точности можно учесть поправочные члены

$$F(\theta, \varphi) \approx J_0(k\rho) + \Delta F, \quad (8)$$

где

$$\Delta F = \begin{cases} 2J_{N_{Az}}(k\rho) \cos[(\pi/2 - \chi)N_{Az}] \\ j2J_{N_{Az}}(k\rho) \cos[(\pi/2 - \chi)N_{Az}] \end{cases} \quad (9)$$

Ширина ДН в горизонтальной плоскости мало зависит от углов  $\theta_0$  и  $\varphi_0$ , причём, чем больше  $N_{Az}$ , тем слабее проявляется эта зависимость. Однако в вертикальной плоскости ширина ДН  $\theta_A^B$  изменяется значительно:  $F(\theta, \varphi=0) = J_0[k a (\sin \theta - \sin \theta_0)]$ .

Из соотношений (5–9) видно, что направленные свойства однокольцевой антенной решетки хуже направленных свойств линейных антенных решеток (ЛАР) тех же габаритов по следующим причинам:

– появление квадратичного фазового распределения на апертуре ЛАР, являющейся эквивалентом сектора антенной решетки, т.е. части кольца кольцевой антенной решетки;

– увеличение уровня боковых лепестков и снижение коэффициента усиления (КУ) из-за различной ориентации главных максимумов ДН антенных элементов, образующих однокольцевую антенную решетку;

– неэквидистантное расположение проекций антенных элементов на апертуре ЛАР, приводящие к увеличению плотности этих проекций к концам апертуры ЛАР, что эквивалентно появлению распределения амплитуд, возрастающего к краям апертуры.

Всё перечисленное приводит к расширению ДН ( $\theta_A$ ) и росту бокового излучения ( $F_{\sigma}$ ) однокольцевой антенной решетки по сравнению с ЛАР.

Для улучшения направленных свойств в горизонтальной плоскости в однокольцевой антенной решетке предлагается:

– для уменьшения уровня бокового излучения из-за непараллельности направлений главных максимумов ДН антенных элементов, образующих однокольцевую антенную решетку, предлагается антенные элементы исполнять в виде антенных модулей (АМ), состоящих из двух антенных излучателей (АИ), удалённых друг от друга на расстояние  $d_{II}$ . Один из двух АИ АМ имеет на входе фиксированный фазовращатель, обеспечивающий такое ФР на раскрые АМ, которое обеспечивает поворот максимума ДН АМ на угол  $\theta_i$ , обеспечивающий параллельность направлений  $\theta_{mi}$ ;

– квадратичное фазовое распределение устраняется путём подключения выхода  $i$ -го АМ к фазовращателю с фиксированной величиной фазы ( $\Phi_i$ );

– для ослабления влияния неэквидистантного расположения АМ на раскрые ЛАР вводится так называемое цифровое управление формой ДН, имеющее сходство с работой [6] и сводящееся к установке на выходах АМ малошумящих усилителей с регулируемым, но фиксированным коэффициентом усиления антенны. В этом случае рассматриваемая конструкция однокольцевой антенной решетки позволяет получить улучшенные направленные свойства по сравнению с известными кольцевыми антенными решетками [2]. При рассмотрении применения такой полусферической антенной решетки в службе управления воздушным движением, одно из колец антенной решетки можно использовать в качестве угломестного радиомаяка. В этом случае, если рассчитан радиус сферы, то геометрические параметры однокольцевой антенной решетки для угломестного радиомаяка сводятся к расчету только перемещающегося угломестного сектора  $\mathcal{E}_{сф}$ , в пределах которого формируется ДН с заданной шириной главного максимума по уровню минус 3 дБ. Аналитически множитель системы ДН однокольцевой антенной решетки, составленной из антенных

элементов, например, в виде вибраторов с улучшенными направленными свойствами, записывается в виде

$$F_c = \sum_{i=0}^{N_m-1} a_i F_{li} \exp(-jk d_{xi} \sin \theta), \quad (10)$$

где  $a_i$  - весовые коэффициенты амплитудного распределения на ЛАР  $i$ ;

$$\begin{aligned} F_{li} &= \sum_{q=0}^1 \exp(-jkd_{ii}q|(\sin\theta - \sin\theta_i)|) = \\ &= 1 + \exp(-j0,5k0_{ii}|(\sin\theta - \sin\theta_i)|) = \\ &= \cos(0,5kd_{ii}(\sin\theta - \sin\theta_i)), \end{aligned}$$

$d_{xi} = R(1 - \cos \beta_i)$  – расстояние между фазовыми центрами АМ на раскрые ЛАР;

$\beta_i$  – угол от радиуса-вектора 1-го АМ до радиуса-вектора  $i$ -го АМ;

$d_{II} = l_B + 0,1\lambda$  – расстояние между фазовыми центрами АИ, образующими АМ;

$l_B$  – длина излучателя (например, вибратора) в плоскости окружности; значение  $0,1\lambda$  берется из условия ослабления взаимного влияния АИ и геометрического размещения АИ в пределах антенного модуля;

$\theta_i$  – угол, на который необходимо повернуть главный максимум ДН АМ  $i$  ( $\theta_i = \beta_i - 90^\circ$ ), чтобы обеспечить параллельность их направлений.

Для численных оценок было взято соотношение (11) и следующие параметры (рис.1):

$$N_m = \begin{cases} 105 - v & \text{горизонтальной плоскости;} \\ 6 - v & \text{вертикальной плоскости} \end{cases}$$

$f = 5$  ГГц;  $l_B = 0,48\lambda$ ;  $d_{II} = 0,58\lambda$ ;  $d_{xi}$  зависят от  $R$  и  $\beta$ , определяются в процессе расчета ДН.

Проведенные расчёты показали, что:

1. ДН в горизонтальной и вертикальной плоскостях симметрична относительно ее главного максимума.

2. Ширина главного максимума ДН лежит в пределах:

– в горизонтальной плоскости:  $\varphi_A^\beta < 1^\circ$ ;

– в вертикальной плоскости:  $\theta_A^\beta < 20^\circ$ .

3. Максимальный уровень бокового лепестка имеет величину:

– в горизонтальной плоскости:

при равномерном амплитудном распределении:  
 $F_{\sigma}^{\beta} < -11$  дБ;

при цифровом методе управления амплитудным распределением:  $F_{\sigma_{opt}}^{\beta} < -17,63$  дБ; оптимальное амплитудное распределение задано одной из возможных функций:  $A_i = 20 [1 - (1 - t) (i/52 - 1)^2]$ , где  $t$  - величина "подставки" на краю ОКАР;

– в вертикальной плоскости:

при равномерном амплитудном распределении:  
 $F_{\sigma}^{\varepsilon} < -12$  дБ;

при цифровом (оптимальном) методе управления амплитудным распределением:  $F_{\sigma_{opt}}^{\varepsilon} < -35,6$  дБ; оптимальное амплитудное распределение задано следующими коэффициентами:  $A_{1,6} = 1$ ;  $A_{2,5} = 7$ ;  $A_{3,4} = 14,5$ .

ДН однокольцевой антенной решетки для угломестного радиомаяка описывается в вертикальной плоскости тем же соотношением (11) и имеет вид, аналогичный ДН однокольцевой антенной решетки азимутального радиомаяка в горизонтальной плоскости. В вертикальной плоскости из – за использования одного кольца кольцевой антенной решетки её ДН совпадает с ДН одного антенного элемента.

### Заключение

Рассмотренная в статье кольцевая антенная решетка по быстродействию не уступает современным фазированным антенным решеткам, а по стоимости на порядок дешевле. Если использовать многовходные антенные элементы то возможно формирование двухлучевой ДН, главные максимумы которых смещены на половину ширины ДН по уровню половинной мощности. Это указывает на возможность реализации моноимпульсного амплитудного метода пеленгации, как предложено в [7,8], так и возможность формирования нулей в направлении прихода помехового сигнала.

### Литература

1. Карлов В.Д., Лукашук Е.В. К вопросу об использовании антенных систем в наземных станциях спутниковой связи./ Системы обработки информации. Выпуск 2(69) –Х.:ХУПС 2008. – С.57-62.
2. Патент SU 1238182 A1. 3827527/24-09/ 19.12.84 15.06.86 Бюллетень № 22 А.Ф. Чаплин, М.Д. Бучацкий 4Н О1Q 21/20 кольцевая вибраторная антенна.

3. Д.И. Воскресенский, Л.И. Пономарёв, В.С. Филипов Выпуклые сканирующие антенны . М: – Советское радио. 1978 г. 302с.
4. A circular array configuration for simplifying multiplexing in radiocommunication antennas. Daires D.E.N.,Guy J.R. F "Jnt. Symp. Dig. Antennas and propag., Albuguergue,N.M., may 24-28, 1982" (Круговая антенная решётка для упрощения мультиплексирования в антеннах для радиосвязи).
5. Авторское свидетельство SU 1462440 A1. HO1Q 3/26 26.05.86, 28.02.89 Бюллетень № 8 Кольцевая антенна.
6. Япония А 63-217702 МКИ HO1Q 3/30,3/24,21/06 Антенная система.
7. Япония МКИ 4HO1Q 25/02, GO1S 13/44, HO1Q 21/24 моноимпульсная антенная система.
8. Авторское свидетельство SU 14642 25(J11) HO1Q 3/26 04.06.84, 07.03.89 Бюллетень № 9

**Певцов Г.В., Карлов Д.В., Кондратенко О.П., Лукашук О.В. Основи побудови комутаційної напівсферичної антенної решітки.** У статті розглядається питання поєднання низької вартості антени з механічним переміщенням діаграми спрямованості зі швидким немеханічним переміщенням діаграми спрямованості шляхом розробки комутаційних напівсферичних фазованих антенних решіток з характеристиками, ідентичними характеристикам антен з механічним переміщенням діаграми спрямованості.

**Ключові слова:** антенна система, система посадки, антенна решітка, електронне сканування.

**Pevtsov G.V., Karlov D.V., Kondratenko A.P., Lukashuk H.V. The fundamentals of a switch semispherical antenna array construction.** The problem of combination of low cost of antenna with mechanical sweeping of directional characteristic with rapid nonmechanical sweeping of directional characteristic by means of the development of a switch semispherical phased antenna array with features identical to those belonging to antennas with mechanical sweeping of directional characteristic is considered in the article.

**Key words:** antenna system, landing system, array, electronical scanning.

Рецензент: Купченко Л.Ф., д.т.н., профессор (Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба)

Поступила 10.02.2014г.