

УДК 681.883.67:621.396,677.81.012.12

ШИРОКОУГОЛЬНОЕ СКАНИРОВАНИЕ РЕФЛЕКТОРНЫМИ АНТЕННАМИ*канд. техн. наук, доц. В.Ф. ПЕЛЕВИН**(Могилевский государственный университет продовольствия)*

Рассматриваются рефлекторные антенны, позволяющие осуществлять секторный и круговой обзор пространства. Приведено описание рефлекторной антенны геликоидного типа, формирующей одним рефлектором веер статических характеристик направленности в азимутальной плоскости в секторе до 360 градусов. Получены математические выражения, описывающие геометрическую форму отражающей поверхности рефлектора. Выведены формулы для расчета характеристики направленности антенны в приближении Кирхгофа. Рассчитаны и проанализированы полевые характеристики антенны в зависимости от изменения её параметров. Представлены конструкции антенн геликоидного типа с различными функциональными возможностями.

Введение. Отражение звука и света от зеркальных и фокусирующих поверхностей исследовалось и находило применение достаточно давно. С развитием радиотехники отражение и фокусировка электромагнитных волн находят широкое применение в создании рефлекторных антенн в радиолокации [1 – 9]. Эти же явления в аналогичных целях используются с применением звуковых волн в акустике и гидролокации [10 – 15]. Распространение электромагнитных и звуковых волн описывается соответственно векторными уравнениями Максвелла и скалярными уравнениями Гельмгольца, однако когда размеры тел велики по сравнению с длиной волны, решения электромагнитных и акустических задач совпадают при приведении в соответствие граничных условий [16].

Антенна радиолокационной станции (РЛС) является её основным элементом и определяет её характеристики и назначение. В большинстве случаев для РЛС требуется антенна, которая концентрирует излучаемую энергию в малом пространственном угле и принимает энергию, отраженную от цели с этого направления. Это позволяет решать задачи телеметрии, навигации, картографирования, обнаружения подземных ископаемых, определения пространственных координат цели и её сопровождения. Антенны радиолокационной станции могут устанавливаться как стационарно на земной поверхности, так и на различных носителях: автомашинах, самолетах, вертолетах, кораблях. Для оперативного обнаружения и определения направления движения цели осуществляется широкоугольное сканирование пространства узкой парциальной характеристикой направленности (ХН) в азимутальной плоскости (АП) в секторе углов до 360° и в угломестной плоскости (УП) до 90°. В основном это осуществляется с помощью РЛС кругового обзора (КО), которые в настоящее время занимают первое место среди активных средств обнаружения вследствие малого времени обследования всего горизонта, возможности обнаруживать и сопровождать несколько целей, определяя координаты каждой из них. Наибольшие преимущества имеют РЛС кругового обзора со статическим веером ХН, быстро переключаемых или одновременно существующих в пространстве. Они позволяют увеличить скорость обзора пространства, накапливать в приёмном тракте энергию отраженного от цели сигнала в течение всего времени его существования, а следовательно, обладают большой помехоустойчивостью.

В РЛС кругового обзора для обнаружения целей в основном используются многоэлементные (плоские, цилиндрические или сферические) фазированные антенные решетки, позволяющие формировать ХН различных видов и управлять ими с помощью электронных блоков [5; 6]. Однако при оценке таких характеристик, как вес, стоимость, надежность, сложность изготовления и эксплуатации, во многих случаях антенны такого типа теряют свои преимущества по сравнению с рефлекторными антеннами (РА). Современные достижения в области электроники и цифровой техники позволяют при создании РЛС кругового обзора с РА упростить её конструкцию и возложить часть её функций (избирательность, помехоустойчивость, первичную обработку сигналов и др.) на электронную часть РЛС и совмещенную с нею ЭВМ. Кроме указанных преимуществ РА обладают возможностью получения высокой направленности с сохранением направленных свойств в широкой полосе частот. Они также позволяют формировать ХН различной формы и управлять ими; имеют малые активные потери и высокий КПД [9; 10]. К недостаткам РА следует отнести большие габариты, особенно на низких частотах, практически обязательное наличие обтекателя (для антенн, устанавливаемых на носителях) и малоэффективность в режиме излучения (в некоторых случаях это может компенсироваться обработкой принимаемого отраженного от цели сигнала). С увеличением длины волны у них падает разрешающая способность и коэффициент усиления (КУ) антенны. Увеличение частоты всегда улучшает фокусирующие свойства рефлекторов в связи с отсутствием у них хроматической аберрации.

1. Рефлекторные антенны, осуществляющие широкоугольное сканирование

К таким антеннам относятся параболические, усеченные параболические, цилиндрические параболические антенны, широкоугольные рефлекторные антенны секторного (сферическая и сферопараболическая) и кругового обзора.

Параболическая антенна используется для формирования игольчатых ХН. Раскрыв её D связан с шириной ХН $\Delta\theta_{0,5}^\circ$ соотношением [4]:

$$D = \frac{(50 - 70)\lambda}{\Delta\theta_{0,5}^\circ}, \quad (1)$$

где λ – длина волны.

Характеристика направленности РА с параболическим рефлектором и направленным излучателем с ХН $R_{эл}(\psi)$ описывается следующим выражением [15]:

$$R(\theta) = \frac{\int_0^{\psi_1} J_0(2kF \cdot \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} \cdot \sin \theta) \cdot R_{эл}(\psi) \cdot \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} d\psi}{\int_0^{\psi_1} R_{эл}(\psi) \cdot \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} d\psi}, \quad (2)$$

где $J_0(x)$ – функция Бесселя нулевого порядка; ψ – угол между осью параболоида и направлением прихода волны; ψ_1 – угол раскрыва рефлектора.

Для определения эффективности использования раскрыва РА вводят коэффициент использования поверхности (КИП) ν [2; 4 – 7], равный

$$\nu = \frac{K\lambda^2}{4\pi S}, \quad (3)$$

где K – коэффициент концентрации; S – площадь апертуры антенны.

Коэффициент концентрации (КК) антенны характеризует её энергетическую эффективность и рассчитывается с учётом её ХН $R(\theta, \varphi)$ по формуле [4]:

$$K = \frac{4\pi}{\int_{\varphi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{2\pi} R^2(\theta, \varphi) \cdot \sin \theta d\varphi d\theta}, \quad (4)$$

где φ и θ определяют направление ХН в азимутальной и угломестной плоскостях сферической системы координат.

В этих антеннах затеняющее действие излучателя приводит к росту боковых лепестков (БЛ) с нечетными номерами, уменьшению ширины главного лепестка и искажению ХН. Сканирование ХН осуществляется смещением излучателя из фокуса F на величину $\Delta y \ll F$ перпендикулярно оптической оси на угол β [4]:

$$\beta = \arcsin \frac{\Delta\varphi}{kD}, \quad (5)$$

где $\Delta\varphi = k \cdot \Delta y$ – максимально допустимое фазовое искажение на краю апертуры; $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число. Величина смещения Δy не превышает две-три ширины ХН.

В несимметрично усечённых параболических РА отсутствует затенение раскрыва рефлектора излучателем, что уменьшает уровень БЛ и увеличивает КК и КУ антенны. Их недостатком является асимметрия амплитудного распределения в раскрыве, что может приводить к асимметрии ХН, её расширению, уменьшая КИП и КК. Расчет ХН несимметрично усечённых параболических антенн в приближении Кирхгофа изложен в работах [8; 12]. Эти антенны позволяют формировать веер ХН в секторе 30...40°, однако при повороте ХН значительно возрастают БЛ (с 7 до 20 %) и падает КК антенны на 25...30 %. Для осуществления сканирования ХН в УП излучатели выносят из фокуса и располагают в местах максимальной концентрации лучей в абберационных треугольниках [12].

Цилиндрические параболические РА позволяют формировать веерные ХН с большой разницей в ширине ХН в главных плоскостях и осуществлять сканирование в плоскости образующей цилиндра (в АП) до 30...60° без её искажения в УП. В несимметрично усеченных этих антеннах отсутствует затенение рефлектора излучателем, а амплитудное распределение в УП убывает обратно пропорционально корню квадратному из расстояния до излучателя, что дает более равномерное распределение поля в раскрыве цилиндра и более острую ХН в этой плоскости, чем в параболической антенне [2; 9].

Рассмотренные параболические РА могут осуществлять широкоугольное сканирование узкими ХН в секторе $90 \dots 360^\circ$ в АП только при использовании механического привода, что и используется в большинстве РЛС.

К широкоугольным РА относятся антенны секторного (сферическая и сферопараболическая) и кругового обзора.

Сферическая антенна применяется для формирования узких и веерных ХН [1; 2; 5 – 7; 9]. Она представляет собой часть сферической поверхности радиуса R и описывается уравнением в декартовой системе координат [5]:

$$(x - R)^2 + y^2 + z^2 = R^2. \quad (6)$$

Ширина её ХН определяется выражением (1), а максимальный раскрыв описывается следующим образом:

$$D_{max} = 2R \cdot \sin\left(\frac{\beta_0}{2} + \arcsin\frac{D}{2R}\right), \quad (7)$$

где β_0 – сектор сканирования.

Глубина рефлектора сферической антенны

$$l_{эф} = R - \sqrt{R^2 - \frac{D^2}{4}}. \quad (8)$$

Сферическая антенна обеспечивает сканирование ХН в АП без искажения в широком секторе углов (до $90 \dots 120^\circ$) в силу своей симметрии относительно центра кривизны, при перемещении излучателя по концентрической относительно рефлектора фокальной дуге окружности. При этом у сферического рефлектора облучается только та часть его поверхности, которая необходима для формирования ХН требуемой ширины, а остальная поверхность не используется, вследствие чего он имеет малый КИП [2].

Для уменьшения влияния фазовых ошибок на ХН в сферической антенне фокусное расстояние в АП выбирают равным

$$F = \frac{R}{2} - \frac{l_{эф}}{4}. \quad (9)$$

У сферической антенны ХН шире, а уровень БЛ выше, чем у параболической с таким же раскрывом.

Полевые характеристики, аналогичные сферической РА, формирует сферопараболическая РА, которая образуется вращением параболы вокруг оси, перпендикулярной оси симметрии параболы, вершина которой обращена в сторону от оси вращения, по окружности с радиусом $R = 2F$ [2; 6; 17]. Такая антенна представляет собой параболический тор и совмещает в себе фокусирующие свойства параболического рефлектора с широкоугольными свойствами сферического рефлектора, т.е. позволяет осуществлять обзор в широком секторе пространства без искажения ХН в АП, а в УП обеспечивает формирование плоского фронта волны. Однако плоскость раскрыва сферопараболической антенны не является строго синфазной, и для уменьшения фазовых ошибок в раскрыве требуется выбор оптимальных геометрических размеров в УП согласно выражению (9). Её характеристика направленности и КК могут быть определены по формулам [13]:

$$R(\theta) = \left| \frac{q^2 J_0(\delta_c \tau_0) J_1(q\tau_0) - q\delta_c J_0(q\tau_0) J_1(\delta_c \tau_0)}{(q^2 - \delta_c^2) J_1(q\tau_0)} \right|, \quad (10)$$

$$K = 32 \left(\frac{\pi F}{\lambda} \right)^2 \frac{\left[\int_0^{\tau_0} J_0(q\tau) \tau d\tau \right]^2}{\int_0^{\tau_0} J_0^2(q\tau) \tau d\tau}, \quad (11)$$

где $\tau_0 = tg \frac{\alpha_t}{4}$; $\delta_c = 2 \cdot kF \sin \theta$; $2\alpha_t = 2 \arctg \frac{D}{2(F - l_{эф})}$ – рабочий угол раскрыва рефлектора; q находится из

выражения $J_0(q\tau_0) = \frac{0,25}{1 + \tau_0}$; $J_0(x)$ и $J_1(x)$ – функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно.

Для устранения затенения излучателем рефлектора в УП рефлектор выполняется несимметрично усеченным. Сектор сканирования сферопараболической антенны в АП составляет 120°. Эти антенны, расположенные под углом 120° друг к другу, могут осуществлять круговой обзор пространства.

2. Расчет рефлекторных антенн в приближении Кирхгофа

Расчет ХН рефлекторных антенн в процессе сканирования проводится апертурным методом в приближении Кирхгофа, т.е. в области основного лепестка и ближайших БЛ [2]. Для расчета характеристики направленности РА необходимо вычислить значение потенциала поля отраженной от поверхности рефлектора волны $\varphi_{omp}(r)$ в дальней зоне антенны, который может быть найден в результате решения задачи дифракции падающей волны на поверхности S этой антенны. Связь между значением потенциала φ в точке наблюдения и значением потенциала на излучающей поверхности S можно найти на основании формулы Грина:

$$\iiint_V (U, \Delta\varphi - \varphi \Delta U_1) dV = \iint_S \left(U_1 \frac{\partial\varphi}{\partial\bar{n}_0} - \varphi \frac{\partial U_1}{\partial\bar{n}_0} \right) dS, \quad (12)$$

где \bar{n}_0 – внешняя нормаль к поверхности S , а функции φ и U_1 удовлетворяют уравнениям Гельмгольца.

Если вспомогательной функцией U_1 , являющейся функцией Грина, служит поле точечного источника в свободном пространстве, значение потенциала внутри области в любой точке r можно определить по значениям φ и $\frac{\partial\varphi}{\partial\bar{n}_0}$ на заданной поверхности S по формуле Кирхгофа – Гюйгенса [7; 16]:

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \left[\frac{\partial\varphi}{\partial\bar{n}_0} \cdot \frac{e^{jkr}}{r} - \varphi \frac{\partial}{\partial\bar{n}_0} \left(\frac{e^{jkr}}{r} \right) \right] dS. \quad (13)$$

При размерах излучающей поверхности и её радиуса кривизны значительно бóльших длины волны можно установить приближенно связь между величинами φ и $\frac{\partial\varphi}{\partial\bar{n}_0}$. Если при этом дифрагированным полем в области геометрической тени можно пренебречь, тогда для дальней зоны получим формулу приближения Кирхгофа [15; 16]:

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi} \iint_S \frac{\partial\varphi}{\partial\bar{n}_0} \cdot \frac{e^{jkr}}{r} (1 + \cos\theta) dS. \quad (14)$$

Если излучение происходит в пределах малого телесного угла и отклонение от нормали к слабоизогнутой поверхности мало, то $\cos\theta \approx 1$ и формула приближения Кирхгофа принимает вид, адекватный первой интегральной формуле Гюйгенса:

$$\varphi_{omp}(r) = \frac{1}{2\pi} \iint_S \frac{\partial\varphi}{\partial\bar{n}_0} \cdot \frac{e^{jkr}}{r} dS, \quad (15)$$

а для двумерной области аналогичная формула приближения Кирхгофа имеет вид:

$$\varphi_{omp}(r) = \frac{j}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\partial\varphi}{\partial\bar{n}_0} H_0^{(1)}(kr) dx, \quad (16)$$

где $H_0^{(1)}(x)$ – функция Ханкеля нулевого порядка первого рода.

3. Широкоугольные рефлекторные антенны геликоидного типа

Для обнаружения целей в АП при круговом обзоре пространства разработана винтовая несимметрично усеченная сферопараболическая рефлекторная антенна в виде параболического геликоида. Она относится к широкоугольным РА и позволяет формировать веер одинаковых статических ХН в АП при минимальном их искажении в секторе до 360° вследствие сохранения постоянства эффективной апертуры, а также управлять ХН в УП.

Отражающая поверхность рефлектора геликоидной антенны представляет собой поверхность, образованную вращением усеченной параболы вокруг вертикальной оси, перпендикулярной оси симметрии параболы, вершина которой обращена в сторону от оси вращения, по винтовой линии [18], (рис. 1, а). Радиус вращения выбирают равным удвоенному фокусному расстоянию параболы $R = 2F$, при этом излучатели вынесены за пределы раскрыва рефлектора и расположены на фокальной дуге радиуса r_0 . Шаг h

винтовой поверхности определяется сектором сканирования ХН в УП и выбирается так, чтобы исключить затеняющее действие излучателей и рефлектора, расположенных на диаметрально противоположенной стороне РА, на формируемую ХН.

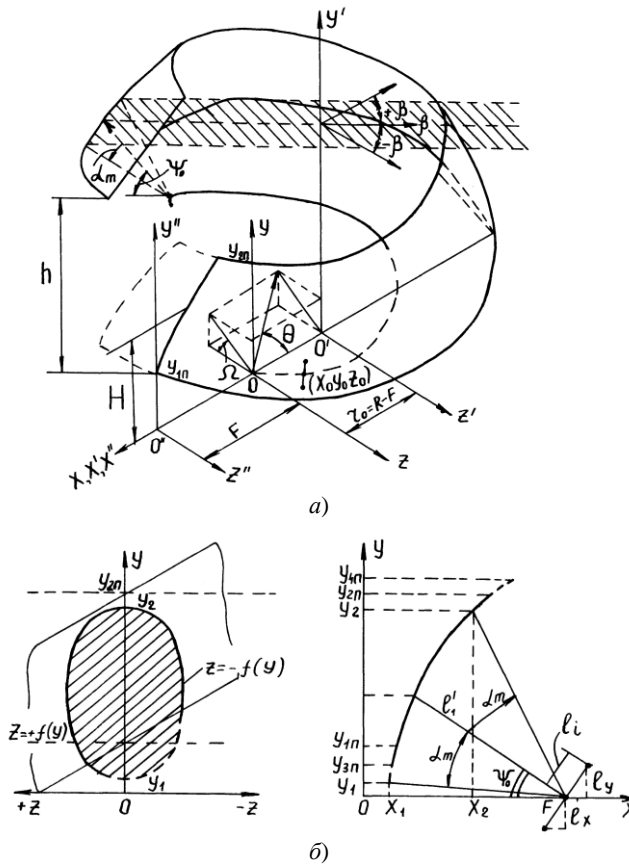


Рис. 1. Геометрия задачи:
 а – к выводу пространственной ХН геликоидной РА; б – определение пределов интегрирования в УП

Уравнение поверхности параболического геликоида получим, перенося уравнение параболы с фокусным расстоянием F в плоскости $x''O''y''$ вдоль оси $O''x''$ на расстояние R в систему координат x', y', z' и решая полученное выражение параболы $(y')^2 = 4F(R - x')$ совместно с уравнением винтовой поверхности с центром в точке O' :

$$x' = u_0 \cos \nu, \quad z' = u_0 \sin \nu, \quad y' = C'\nu + f(u_0), \tag{17}$$

где $f(u_0) = \sqrt{4F(R - u_0)}$, $u_0 = \sqrt{(x')^2 + (z')^2}$, $\nu = \arctg \frac{z'}{x'}$.

Переходя к системе координат x, y, z с началом в точке O' (фокус параболы F) и учитывая, что $x' = x - R + F$, $y' = y$, $z' = z$, получим уравнение поверхности параболического геликоида $P(x, y, z)$ в первом октанте декартовой системы координат:

$$y = C' \arctg \frac{z}{x - R + F} + \sqrt{4F(R - \sqrt{(x + F - R)^2 + z^2})}, \tag{18}$$

или в общем виде [18]:

$$(x + F - R)^2 - \left[R^2 - \frac{\left(y - C' \arctg \frac{z}{x + F - R} \right)^2}{4F} \right] + z^2 = 0, \tag{19}$$

где $C' = \frac{h}{2\pi}$.

Потенциал поля, создаваемый геликоидной РА в точке наблюдения в дальней зоне, может быть определен из выражения (15). На поверхность рефлектора S падает плоская волна, нормаль к фронту которой образует с осью x угол θ (рис. 1, a). Потенциал этой волны с точностью до постоянного и временного сомножителей можно записать в виде

$$\varphi = \exp(jk\Delta), \quad (20)$$

где $\Delta = x \cos \theta + y \sin \theta \sin \Omega + z \sin \theta \cos \Omega$ – разность хода в сферической системе координат.

Производную от потенциала волны по нормали \bar{n}_0 запишем в виде:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n_0} = \frac{\partial \varphi}{\partial x} \cos(n_0, \hat{x}) + \frac{\partial \varphi}{\partial y} \cos(n_0, \hat{y}) + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \cos(n_0, \hat{z}). \quad (21)$$

Вычислим направляющие косинусы внешней нормали к поверхности геликоида $P(x, y, z)$ по формулам:

$$\cos(n_0, \hat{x}_i) = \frac{\partial P(x, y, z)}{\partial x_i} \left\{ \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\partial P(x, y, z)}{\partial x_i} \right]^2 \right\}^{-1/2}, \quad (22)$$

где $x_1 = x, x_2 = y, x_3 = z$, и выразим их через $\cos(n_0, \hat{x})$:

$$\cos(n_0, \hat{y}) = \frac{\partial P / \partial y}{\partial P / \partial x} \cdot \cos(n_0, \hat{x}), \quad \cos(n_0, \hat{z}) = \frac{\partial P / \partial z}{\partial P / \partial x} \cdot \cos(n_0, \hat{x}). \quad (23)$$

Подставим результаты вычислений (23) в выражение (21) с учетом (20), учитывая, что

$$dS \cdot \cos(n_0, \hat{x}) = dydz, \quad (24)$$

где dS – элемент поверхности геликоида, получим согласно первой интегральной формуле Гюйгенса (15) потенциал волны, отраженной от поверхности параболического геликоида [19]:

$$\varphi_{omp} = \frac{jk}{2\pi} \iint_S \frac{\exp Q}{r} \left\{ \cos \theta + \sin \theta \sin \Omega \frac{[(x+F-R)^2 + z^2] \zeta}{(x+F-R) + C'z\zeta} + \sin \theta \cos \Omega \frac{[z - C'(x+F-R)\zeta]}{(x+F-R) + C'z\zeta} \right\} dydz, \quad (25)$$

где $Q = jk[x \cos \theta + y \sin \theta \sin \Omega + z \sin \theta \cos \Omega - r]$, $\zeta = \sqrt{\frac{R - \sqrt{(x+F-R)^2 + z^2}}{F[(x+F-R)^2 + z^2]}}$.

В формуле (15) величину r , входящую в выражение, которое является функцией Грина, выразим через координаты излучателей (x_{0i}, y_{0i}, z_{0i}) :

$$r = \sqrt{(x - x_{0i})^2 + (y - y_{0i})^2 + (z - z_{0i})^2}. \quad (26)$$

В выражении (25) интегрирование ведется по поверхности рефлектора. Для определения пределов интегрирования необходимо выразить переменную x в виде функций от y и z в явном виде. При небольших углах раствора ХН излучателя $2\alpha_m$ справедлива замена:

$$\operatorname{arctg} \frac{z}{x+F-R} \approx \frac{z}{x+F-R}. \quad (27)$$

Тогда из выражения (19), записанного в виде многочлена, решая который относительно x приближенным методом Ньютона, получим выражение для x в зависимости от других координат:

$$x = R - F - \sqrt{L_0^2 - z^2} + \frac{C'z}{2F} \cdot \frac{\sqrt{L_0^2 - z^2} \left[(L_0^2 - z^2)L_0 - \frac{(C')^2 z^2}{4F} \right] + \frac{(C')^2 z}{2} \left[(L_0^2 - z^2) \left(R - \frac{3y^2}{4F} \right) - \frac{(C')^2 z^2}{8F} \right]}{\sqrt{L_0^2 - z^2} \left[\left(R - \frac{3y^2}{4F} \right) \frac{(C')^2 z^2}{2F} + (L_0^2 - z^2)^2 \right] + \frac{3yzC'}{F} \left[(L_0^2 - z^2)L_0 - \frac{(C')^2 z^2}{4F} \right]}, \quad (28)$$

где $L_0 = R - \frac{y^2}{4F}$.

Если излучатель имеет симметричную ХН шириной $2\alpha_m$, то его можно аппроксимировать круговым конусом с центральным углом $2\alpha_m$ (рис. 1, б, справа). Вершина конуса находится в фокусе F усеченной параболы, а его ось наклонена под углом ψ_0 к фокальной оси параболы. Тогда уравнение конуса в общем виде можно записать следующим образом:

$$A_1 x^2 + 2B_0 x + C_1 + z^2 = 0, \quad (29)$$

где $A_1 = \sin^2 \psi_0 - \cos^2 \psi_0 t g^2 \alpha_m$; $B_0 = y \sin \psi_0 \cos \psi_0 (1 + t g^2 \alpha_m)$; $C_1 = y^2 (\cos^2 \psi_0 - \sin^2 \psi_0 t g^2 \alpha_m)$.

Решая совместно уравнение конуса (29) и геликоида (19), получим трансцендентное уравнение линии их пересечения на плоскости yOz , т.е. найдем зависимость $z = f(y)$, что позволит определить пределы интегрирования по внутреннему интегралу в выражении (25).

Определим x из уравнения (29):

$$x_{1,2} = B_1 \pm \sqrt{D_3 - \frac{z^2}{A_1}}, \quad (30)$$

где $B_1 = \frac{B_0}{A_1}$; $D_3 = \frac{B_0^2}{A_1^2} - \frac{C_1}{A_1}$.

Подставим значения $x_{1,2}$ в (19) и получим после преобразований систему уравнений:

$$C_2^2 \xi_1^4 - 2C_2 C_3 \xi_1^3 + D_4 \xi_1^2 + 2L_0 C_3 \xi_1 - b_2 = 0, \quad (31)$$

где $b_2 = D_5 + D_6 z^2 \pm 2K_1 \sqrt{D_3 - \frac{z^2}{A_1}}$; $K_1 = F - R - B_1$; $\xi_1 = \arctg \frac{1}{K_1 \pm \sqrt{D_3 - \frac{z^2}{A_1}}}$; $D_5 = K_1^2 + D_3 - L_0^2$;

$$C_2 = \frac{(C')^2}{4F}; \quad C_3 = \frac{C'y}{2F}; \quad D_4 = C_3^2 - 2L_0 C_2; \quad D_6 = 1 - \frac{1}{A_1}.$$

Пределы внешнего интеграла y_1 и y_2 определяются пересечением в плоскости yOx образующих конуса ХН излучателя $x_{1,2} = K_{2,3} y_{1,2}$ с границами усеченной параболы $y^2 = 4F(x + F)$ в УП (рис. 1, б, слева). Тогда

$$y_{1,2} = 2F \sqrt{K_{2,3}^2 + 1}, \quad (32)$$

где коэффициенты $K_{2,3} = -ctg(\psi_0 \pm \alpha_m)$ определяются из уравнения конуса (29) при $z = 0$.

Границы $y_{3,4П}$ отражающей поверхности рефлектора в УП определяются из решения уравнения проекции винтовой поверхности на плоскость yOz :

$$\sin \frac{2\pi}{h} (y_{3,4П} - y_{1,2П}) = \frac{z}{R - \frac{y_{1,2П}^2}{4F}}.$$

Получим

$$y_{3,4П} = y_{1,2П} + \frac{h}{2\pi} \arcsin \frac{z}{R - \frac{y_{1,2П}^2}{4F}}, \quad (33)$$

где $y_{1,2П} = \sqrt{4Fx_{1,2П}}$ – границы усеченной параболы в УП при $h = 0$.

Выражение для потенциала поля, создаваемого РА геликоидного типа, примет вид:

$$\Phi_{omp} = \frac{jk}{2\pi} \int_{y_1}^{y_2} \int_{z=f(y)}^{z=-f(y)} \frac{\exp Q}{r} \left[\cos \theta + \sin \theta \sin \Omega \frac{(x_1^2 + z^2)\zeta}{x_1 + C'z\zeta} + \sin \theta \cos \Omega \frac{z - C'x_1\zeta}{x_1 + C'z\zeta} \right] dy dz. \quad (34)$$

Граничные значения y_1^* и y_2^* внешнего интеграла вычисляются из условия:

если $y_1 \leq y_{3П}$, то $y_1^* = y_{3П}$; $y_2 \leq y_{4П}$, то $y_2^* = y_2$;

$y_1 > y_{3П}$, то $y_1^* = y_1$; $y_2 > y_{4П}$, то $y_2^* = y_{4П}$.

Характеристика направленности геликоидной антенны рассчитывается следующим образом:

$$R(\theta, \Omega) = \left| \frac{\Phi_{omp}}{\Phi_{omp,max}} \right| \tag{35}$$

при $\Omega = 0^\circ$ в АП и при $\Omega = 90^\circ$ в УП.

По формулам (34) и (35) были рассчитаны ХН геликоидной антенны в АП и УП (рис. 2 и 3), а также установлены зависимости направленных свойств от её параметров [19]. С увеличением шага h винтовой поверхности рефлектора максимум ХН антенны в УП смещается от оси симметрии антенны в сторону подъема винтовой поверхности, при этом в АП с увеличением h происходит незначительное увеличение ширины ХН и уровня БЛ, а КИП уменьшается, что вызвано наличием фазовых искажений, возникающих вследствие наличия пространственной кривизны отражающей поверхности рефлектора [20]. В УП смещение максимума ХН и её сужение незначительны.

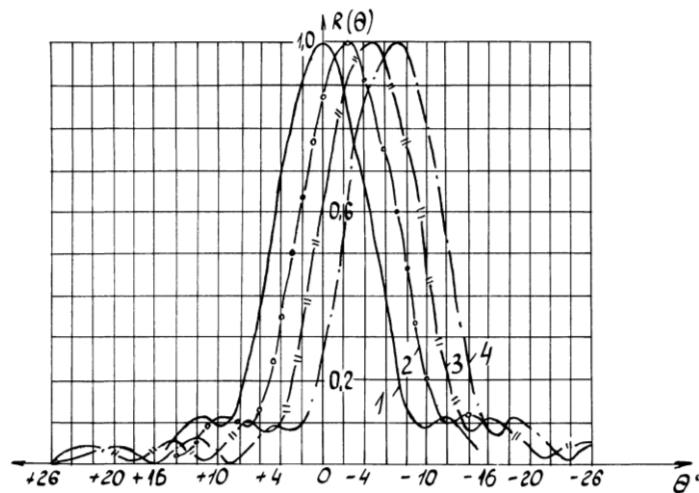


Рис. 2. Зависимости изменения ХН геликоидной РА в АП ($\Omega = 0^\circ$) от шага винтовой поверхности ($\alpha_m = 30^\circ$; $\beta = 0^\circ$; 1 – $h/\lambda = 0$; 2 – $h/\lambda = 5$; 3 – $h/\lambda = 10$; 4 – $h/\lambda = 15$)

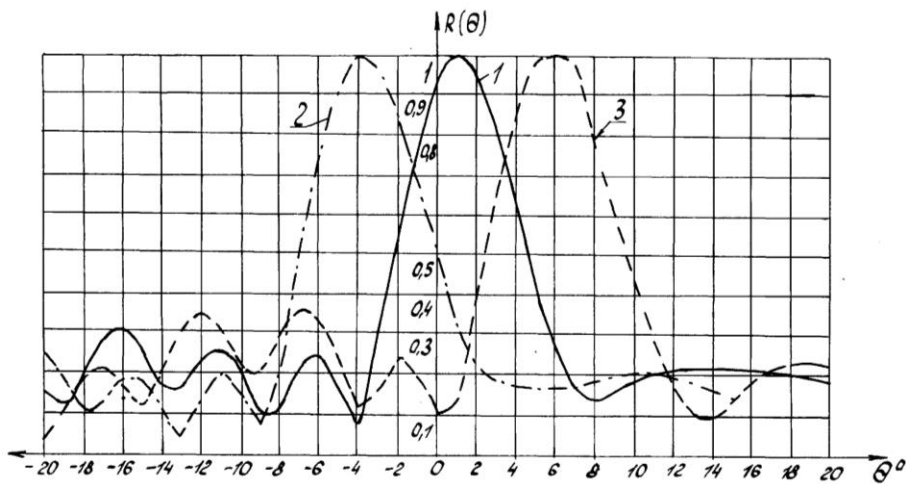


Рис. 3. Зависимость изменения ХН геликоидной РА в УП ($\Omega = 90^\circ$) от угла β ($\alpha_m = 30^\circ$; $h/\lambda = 10$; 1 – $\beta = 0^\circ$; 2 – $\beta = 5^\circ$; 3 – $\beta = -5^\circ$)

Сферопараболическая РА является частным случаем геликоидной РА при шаге винтовой поверхности $h = 0$. В этом случае выражение (19) принимает вид:

$$(x + F - R)^2 - \left(R - \frac{y^2}{4F} \right)^2 + z^2 = 0, \tag{36}$$

а ХН этой РА может быть также рассчитана по формулам (34) и (35).

Существенное расширение сектора обзора в УП с одновременным формированием веера СХ в АП может быть осуществлено РА геликоидного типа с параболической образующей в АП [21]. В такой антенне поверхность рефлектора образована перемещением усеченной параболы, лежащей в АП, параллельно самой себе, вдоль оси цилиндрической винтовой линии, перпендикулярной этой плоскости, так, что вершина параболы, обращенной вогнутостью к оси, перемещается по данной винтовой линии (рис. 4). При этом раскрыв параболы 4 параллелен диаметральной плоскости РА и не превышает по размеру величину фокусного расстояния F параболы. Рефлектор этой антенны при сечении его АП имеет своим следом параболу, а в УП – прямую. Оси ХН излучателей лежат в параллельных АП и ориентированы в них на середины усеченных парабол. Таким образом, парциальные ХН, сформированные рефлектором антенны, являются касательными к цилиндрической поверхности радиуса $R = 2F$. Шаг винтовой поверхности рефлектора определяется шириной ХН в АП и числом каналов (излучателей) в РА. В АП излучатели вынесены из раскрыва своих усеченных парабол, не затеняя его, что позволяет формировать широкую ХН рефлекторной антенны в УП, а в АП – статический веер ХН.

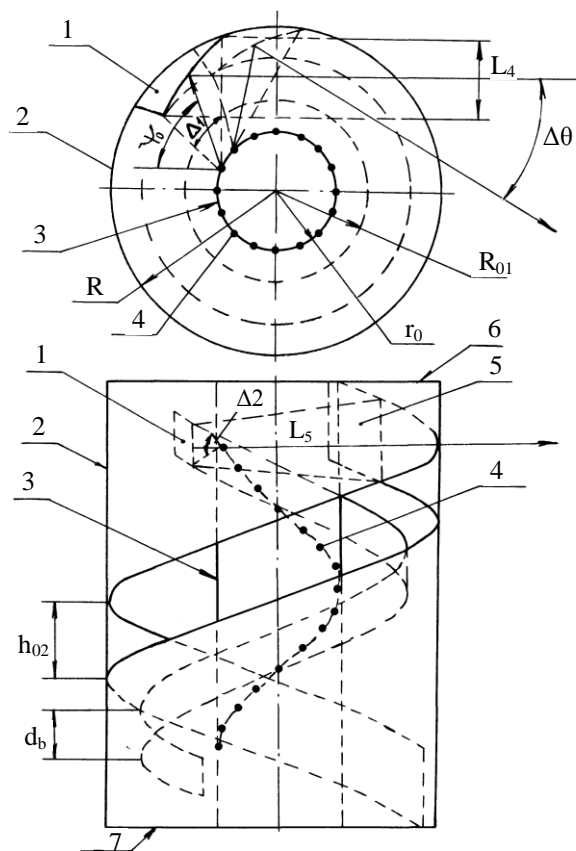


Рис. 4. Геликоидная рефлекторная антенна с параболической образующей в азимутальной плоскости

В рассмотренных РА излучающие элементы являются обратимыми, т.е. могут работать как в режиме излучения, так и в режиме приема. Для упрощения формы поверхности широкоугольной геликоидной РА с образующей в АП в виде усеченной параболы последнюю заменяют частью дуги окружности радиуса $R = 2F$, усеченной в тех же пределах, что и парабола [22], что возможно при допустимых фазовых ошибках (наличие сферической абберации) для длиннофокусных рефлекторов.

Заключение

Рассмотрены рефлекторные антенны, которые могут быть использованы для широкоугольного обзора пространства в азимутальной плоскости. Показано, что для этой цели могут быть использованы односторонние антенны как с простым профилем рефлектора, но требующие механического сканирования, так и антенны, имеющие сложную геометрию рефлектора (геликоидного вида).

Широкоугольные рефлекторные антенны способны осуществлять обзор пространства в азимутальной плоскости в секторе до 360° включительно. Они обладают осевой симметрией и формируют в

заданном секторе углов в азимутальной плоскости статический веер ХН. Такие антенны в основном не являются апланатическими, т.е. имеющими при сканировании минимальные искажения (не имеющие кубических искажений), но они во всём секторе углов сканирования сохраняют форму ХН и уровень больших лепестков. Рефлекторные антенны этого типа являются однозеркальными, в связи с чем общий размер рефлектора, определяемый сектором обзора, существенно зависит от ширины ХН в азимутальной плоскости. В угломестной плоскости рефлектор в большинстве случаев – несимметрично усеченный, что позволяет построить рефлекторную антенну кругового обзора с гораздо меньшей степенью искажений парциальных ХН как за счет уменьшения степени кривизны рефлектора, так и за счет устранения затевающего действия излучателя.

Сравнительные характеристики цилиндрических приемоизлучающих систем и систем, построенных из рефлекторных антенн, приведены в таблице (для акустического варианта). Цилиндрические антенны осуществляют ненаправленное излучение в азимутальной плоскости.

Сравнительные характеристики антенн и антенных систем кругового обзора при ширине ХН в азимутальной плоскости $\Delta\theta_{0,5} = 2^\circ$ и в угломестной плоскости $\Delta\varphi_{0,5} = 10^\circ$ на одной рабочей частоте

Тип антенной системы кругового обзора	Число ярусов	Число рефлекторов (излучателей) в ярусе	Диаметр системы	Высота системы	Уровень БЛ в АП, %	Вес системы	Надежность	Трудоёмкость изготовления	Стоимость
Цилиндрическая антенная система с ХН, формируемыми отдельными излучателями	1	180	D_λ	H_λ	22	P_λ	0,998	K_λ	C_λ
	3	60	$0,33 D_\lambda$	$2,2 H_\lambda$	22	$1,2 P_\lambda$	0,998	$1,2 K_\lambda$	$1,2 C_\lambda$
Цилиндрическая антенная система с веером статических ХН	3	28	$0,02 D_\lambda$	$2,2 H_\lambda$	15	$0,5 P_\lambda$	0,995	$0,3 K_\lambda$	$0,5 C_\lambda$
Система из 12 усеченных параболоидов с сектором сканирования в АП с $\Omega = 30^\circ$	1	12	$0,11 D_\lambda$	$0,65 H_\lambda$	18	$0,36 P_\lambda$	0,999	$0,1 K_\lambda$	$0,05 C_\lambda$
	3	4	$0,06 D_\lambda$	$2 H_\lambda$	18	$0,36 P_\lambda$	0,999	$0,1 K_\lambda$	$0,05 C_\lambda$
Система из 3-х сферопараболоидов с $\Omega = 120^\circ$ в АП	1	3	$0,1 D_\lambda$	$0,65 H_\lambda$	7	$0,2 P_\lambda$	0,999	$0,17 K_\lambda$	$0,02 C_\lambda$
	3	1	$0,06 D_\lambda$	$2 H_\lambda$	7	$0,2 P_\lambda$	0,999	$0,17 K_\lambda$	$0,02 C_\lambda$
Геликоид		1	$0,06 D_\lambda$	$2,2 H_\lambda$	7	$0,18 P_\lambda$	0,999	$0,2 K_\lambda$	$0,02 C_\lambda$

ЛИТЕРАТУРА

1. Айзенберг, Г.З. Антенны УКВ / Г.З. Айзенберг, В.Г. Ямпольский, О.Н. Терешин. – М.: Связь, 1977. – Т. 2. – 288 с.
2. Бахрах, Л.Д. Зеркальные сканирующие антенны: Теория и методы расчета / Л.Д. Бахрах, Г.К. Галимов. – М.: Наука, 1981. – 302 с.
3. Гинзбург, В.М. Расчет параболических антенн / В.М. Гинзбург, И.Н. Белова. – М.: Сов. Радио, 1959. – 250 с.
4. Дабкин, А.Л. Антенно-фидерные устройства / А.Л. Дабкин, В.Л. Зузенко, А.Г. Кислов. – М.: Сов. радио, 1974. – 536 с.
5. Кюн, Р. Микроволновые антенны / Р. Кюн; под ред. проф. М.П. Долуханова. – Л.: Судостроение, 1967. – 517 с.
6. Справочник по радиолокации / под ред. П.И. Дудника. – М.: Связь, 1977. – Т. 2: Радиолокационные антенные устройства. – 440 с.
7. Фрадин, А.З. Антенно-фидерные устройства / А.З. Фрадин. – М.: Связь, 1977. – 440 с.
8. Шабров, А.А. Некоторые особенности направленных свойств несимметрично усеченных параболических антенн / Радиотехника и электроника. – Наука, 1966. – Т. 11, вып. 10. – С. 1872 – 1875.
9. Ямайкин, В.Е. Основы проектирования антенных устройств СВЧ / В.Е. Ямайкин; под ред. А.В. Рунова; Воен. инж. зенитн. училище ПВО. – Минск, 1972. – Ч. 1 – 2. – 485 с.

10. Каневский, И.Н. Фокусирование звуковых и ультразвуковых волн / И.Н. Каневский. – М.: Наука, 1977. – 336 с.
11. Пелевин, В.Ф. Исследование несимметрично усеченной сферопараболической фокусирующей антенны с веером характеристики направленности / В.Ф. Пелевин, В.И. Кривцун // Вопросы кораблестроения. Сер. Спец. гидроакустика. – 1980. – Вып. 31. – С. 72 – 79.
12. Орлов, Л.В. Расчет и проектирование антенн гидроакустических рыбопоисковых станций / Л.В. Орлов, А.А. Шабров. – М.: Пищевая промышл., 1974. – 275 с.
13. Прохоров, В.Г. Рефлекторная антенна с широким секторным обзором / В.Г. Прохоров // Вопр. кораблестроения. Сер. Спец. гидроакустика. – 1984. – Вып. 16. – С. 54 – 58.
14. Розенберг, Л.Д. Звуковые фокусирующие системы / Л.Д. Розенберг. – М.: Изд-во АН СССР, 1949. – 112 с.
15. Тюрин, А.М. Теоретическая акустика / А.М. Тюрин. – Л.: ВМОЛА, 1917. – 443 с.
16. Шендеров, Е.Л. Волновые задачи гидроакустики / Е.Л. Шендеров. – Л.: Судостроение, 1972. – 348 с.
17. Жук, М.С. Проектирование линзовых, сканирующих, широкодиапазонных антенн и фидерных устройств / М.С. Жук, Ю.Б. Молочков. – М.: Энергия, 1973. – 439 с.
18. Акустическая рефлекторная антенная система Пелевина: а. с. 218737 СССР, МКИ G 01 S 15/02, H 01 Q 19/10 / В.Ф. Пелевин (СССР). – № 3090919; заявл. 3.05.84; опубл. 11.01.85.
19. Пелевин, В.Ф. Несимметрично усеченный параболический геликоид с веером характеристик направленности / В.Ф. Пелевин // Вопр. кораблестроения. Сер. Спец. гидроакустика. – 1985. – Вып. 55. – С. 113 – 119.
20. Пелевин, В.Ф. Фазовые искажения несимметрично усеченной винтовой сферопараболической антенны: Библиограф. аннот. указатель / В.Ф. Пелевин, Е.В. Казакова // Судостроение. – М., 1986. – Вып. 4. – 8 с. – Деп. в ЦНИИ «Румб», ДР – 719.
21. Акустическая рефлекторная антенная система: а. с. 303152 СССР, МКИ G 01 S 15/02, H 01 Q 19/10 / В.Ф. Пелевин (СССР). – № 3172473; заявл. 02.06.87; опубл. 1.10.89.
22. Акустическая рефлекторная антенная система: а. с. 320624 СССР, МКИ G 01 S 15/02 / В.Ф. Пелевин (СССР). – № 4523360; заявл. 27.11.89; опубл. 01.11.90.

Поступила 15.11.2011

WIDE-ANGLE SCANNING BY REFLECTING ANTENNAS

V. PELEVIN

The reflex antennas observed in paper allows to realize the sector-shaped and circle browse of space. The exposition of the reflex antenna by gelicoide type shapes by one reflector a fan of static characteristics of directivity in an azimuth plane in sector to 360°. The mathematical expressions presenting the geometrical form of the reflecting surface of the reflector are gained. Formulas for calculation of the directional characteristic of the antenna in the Kirchhoffs approach are deduced. Field performances of the antenna depends on variation of its parameters are calculated and parsed. Constructions of gelicoide type antennas with various functionality are presented.