7. АПЕРТУРНЫЕ АНТЕННЫ

Основные теоретические сведения и расчетные соотношения

Плоские излучающие раскрывы

Для получения направленного излучения по обеим угловым координатам в диапазоне СВЧ широко применяются антенны с излучающими или отражающими поверхностями. Подобные антенны называются апертурными. Их характеристики излучения зависят как от формы поверхности, так и от амплитудно-фазового распределения поля, возбуждаемого на поверхности антенны сторонним полем или источником. При этом наибольшую направленность обеспечивает плоская синфазная поверхность с постоянным амплитудным (равноамплитудным) распределением.

Если излучающая поверхность $S_р$ имеет прямоугольную форму, то в дальней зоне ее нормированные амплитудные ДН описываются выражениями:

в плоскости $E(\varphi = 0)$

$$\overline{F}\left(\theta^E\right) = \frac{\sin(0{,}5kb_р \sin\theta^E)}{0{,}5kb_р \sin\theta^E}\,\frac{1+\cos\theta^E}{2}\,; \qquad (7.1)$$

в плоскости $H(\varphi = \pi/2)$

$$\overline{F}\left(\theta^H\right) = \frac{\sin(0{,}5ka_р \sin\theta^H)}{0{,}5ka_р \sin\theta^H}\,\frac{1+\cos\theta^H}{2}\,, \qquad (7.2)$$

где $a_р$ и $b_р$ — размеры раскрыва антенны (апертуры); θ — угол в радианах между нормалью к поверхности антенны (ось Oz) и направлением в точку наблюдения.

Ширина ДН апертурных антенн и уровень боковых лепестков в соответствующих плоскостях могут быть найдены по формулам (6.59)–(6.61) для ЛНС, в которых следует положить $\theta_0 = \pi/2$.

При спадающем до нуля косинусоидальном распределении поля вдоль одной из осей прямоугольной излучающей поверхности, например вдоль оси Oy, нормированная амплитудная ДН антенны в плоскости, проходящей через данную ось (плоскость H), имеет вид

$$\overline{F}(\theta^H) = \frac{\cos(0{,}5ka_р \sin\theta^H)}{(0{,}5\pi)^2 - (0{,}5ka_р \sin\theta^H)^2}\,\frac{\pi^2(1+\cos\theta^H)}{8}\,, \qquad (7.3)$$

а ширина (в радианах) ДН антенны равна:

на уровне 0,5 по мощности

$$2\theta^H_{0,5} \approx 1{,}18\lambda / a_р\,; \qquad (7.4)$$

на уровне нулевого излучения

$$2\theta^H_0 \approx 3\lambda / a_р\,. \qquad (7.5)$$

Если излучающая поверхность $S_р$ круглой формы, то при равномерном распределении поля по раскрыву антенны выражения для нормированной амплитудной ДН и ее ширины (в радианах) в главных плоскостях имеют вид:

$$\overline{F}(\theta) = \frac{J_1(0{,}5kd_р \sin\theta)}{0{,}5kd_р \sin\theta}(1+\cos\theta)\,; \qquad (7.6)$$

$$2\theta_{0,5} = 1{,}02\lambda / d_р\,; \qquad (7.7)$$

$$2\theta_0 = 2{,}44\lambda / d_р\,, \qquad (7.8)$$

где $d_р$ — диаметр раскрыва; $J_1(0{,}5kd_р \sin\theta)$ — функция Бесселя первого порядка.

При спадающем до нуля параболическом законе распределения поля соответствующие выражения записываются так:

$$\overline{F}(\theta) = \frac{4J_2(0{,}5kd_р \sin\theta)}{(0{,}5kd_р \sin\theta)^2}(1+\cos\theta)\,; \qquad (7.9)$$

$$2\theta_{0,5} = 1{,}27\lambda / d_р\,; \qquad (7.10)$$

$$2\theta_0 = 3{,}26\lambda / d_р\,, \qquad (7.11)$$

где $J_2(0{,}5kd_р \sin\theta)$ — функция Бесселя второго порядка.

КНД плоского излучающего раскрыва в направлении максимума излучения определяется по формуле

$$D_0 = 4\pi S_{эф} / \lambda^2\,, \qquad (7.12)$$

где $S_{эф}$ — эффективная площадь раскрыва антенны, равная

$$S_{эф} = S_р \nu. \qquad (7.13)$$

В (7.13) $S_р$ — геометрическая площадь раскрыва; ν — КИП раскрыва, зависящий от амплитудно-фазового распределения поля в раскрыве. При различных в плоскостях E и H амплитудно-фазовых распределениях, что обычно имеет место, КИП в этих плоскостях будет принимать разные значения. Значение ν в зависимости от вида синфазного амплитудного распределения поля в раскрывах прямоугольной и круглой излучающих апертур приведены в табл. П. 12.

При несинфазном возбуждении излучающей апертуры ее направленные свойства ухудшаются.

Волноводные излучатели и рупорные антенны

Простейшим излучателем в диапазоне СВЧ является открытый конец прямоугольного или круглого волновода (рис. 7.1). Так как электрические размеры поперечного сечения волноводов обычно меньше длины волны, то подобные антенны являются слабонаправленными.

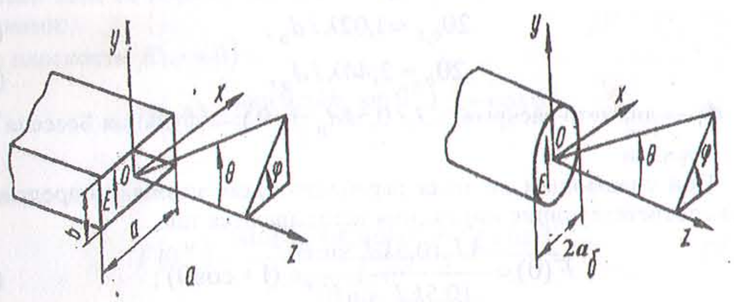


Рис. 7.1. Волноводные излучатели: *а* — на прямоугольном, *б* — на круглом волноводах

Излучатель в виде открытого конца прямоугольного волновода, возбуждаемого волной H_{10}, характеризуют параметры:

ширина ДН (в радианах) в плоскости $H(\varphi = 0)$

$$2\theta_{0,5}^{H} = 1{,}18\lambda / a; \tag{7.14}$$

ширина ДН (в радианах) в плоскости $E\ (\varphi = \pi/2)$

$$2\theta_{0,5}^{E} = 0{,}89\lambda / b; \tag{7.15}$$

КНД в направлении максимума излучения

$$D_0 = 4\pi ab\nu / \lambda^2 \approx 10{,}2ab/\lambda^2 , \tag{7.16}$$

где a, b — размеры сечения волновода; ν — КИП раскрыва, равный 0,81.

Те же параметры для излучателя в виде открытого конца круглого волновода при возбуждении его волной H_{11} имеют вид:

$$2\theta_{0,5}^{H} = 1{,}62\lambda/(2a); \tag{7.17}$$

$$2\theta_{0,5}^{E} = 1{,}21\lambda/(2a); \tag{7.18}$$

$$D_0 = \nu(2\pi a/\lambda)^2 \approx 8{,}3(2a/\lambda)^2 , \tag{7.19}$$

где $2a$ — внутренний диаметр волновода; ν — КИП раскрыва, равный 0,84.

Для получения большей направленности волноводный излучатель превращают в рупорную антенну. Наиболее распространенными являются секториальные, пирамидальные и конические рупоры с прямолинейными образующими (рис. 7.2).

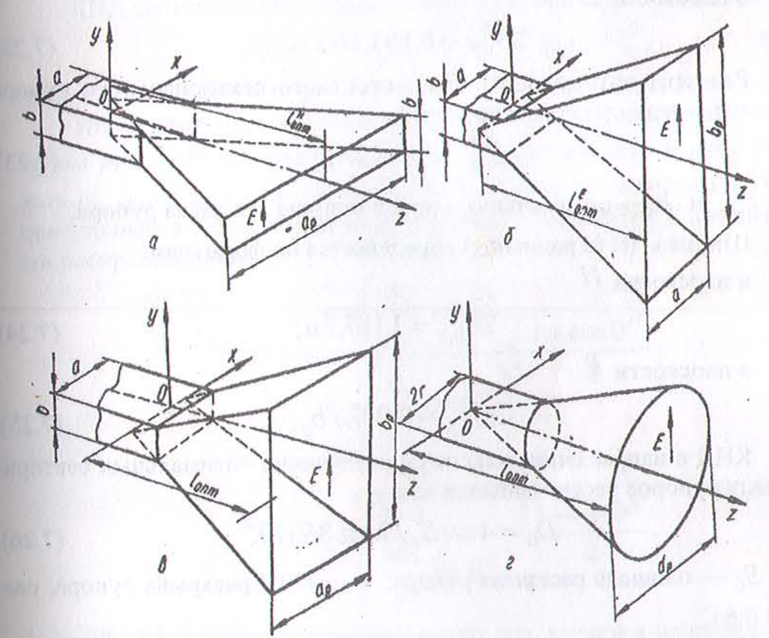


Рис. 7.2. Типы рупорных антенн

Форма главного лепестка амплитудной ДН рупорной антенны зависит от угла раскрыва рупора. При постоянной длине рупора наибольшая направленность излучения у секториальных рупоров имеет место при углах раскрыва, которые соответствуют изменениям фазы (в радианах) на краях раскрыва: $\Phi = 3\pi/4$ в плоскости H и $\Phi = \pi/2$ в плоскости E. Рупоры с такими значениями максимальных изменений фазы на краях раскрыва получили название оптимальных.

Размеры оптимального H-плоскостного секториального рупора связаны между собой соотношением

$$L_{\text{опт}}^{H} = a_{\text{р}}^{2}/(3\lambda), \tag{7.20}$$

где $L_{\text{опт}}^{H}$ и $a_{\text{р}}$ — оптимальная длина, т.е. расстояние от вершины до раскрыва рупора, и ширина раскрыва рупора.

Ширина ДН (в радианах) определяется по формулам:

в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^{H} = 1{,}4\lambda/a_{\text{р}}; \tag{7.21}$$

в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^{E} = 0{,}89\lambda/b. \tag{7.22}$$

Размеры оптимального E-плоскостного секториального рупора связаны между собой соотношением

$$L_{\text{опт}}^{E} = b_{\text{р}}^{2}/(2\lambda), \tag{7.23}$$

где $L_{\text{опт}}^{E}$ и $b_{\text{р}}$ — оптимальная длина и ширина раскрыва рупора.

Ширина ДН (в радианах) определяется по формулам:

в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^{H} = 1{,}18\lambda/a; \tag{7.24}$$

в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^{E} = 0{,}93\lambda/b_{\text{р}}. \tag{7.25}$$

КНД в направлении максимума излучения оптимальных секториальных рупоров рассчитывается как

$$D_0 = 4\pi\nu S_{\text{р}}/\lambda^2 \cong 8S_{\text{р}}/\lambda^2, \tag{7.26}$$

где $S_{\text{р}}$ — площадь раскрыва рупора; ν — КИП раскрыва рупора, равный 0,64.

Секториальные рупоры по сравнению с волноводными излучателями обеспечивают большую направленность только в одной из главных

плоскостей. Для получения направленности в обеих плоскостях используются пирамидальные рупорные антенны. Пирамидальный рупор может быть остроконечным, если ребра рупора сходятся в одной точке ($L_{\text{опт}}^{H} = L_{\text{опт}}^{E}$), или клиновидным, если ребра не сходятся в одной точке ($L_{\text{опт}}^{H} \neq L_{\text{опт}}^{E}$). Размеры оптимального пирамидального клиновидного рупора рассчитываются по формулам (7.20) и (7.23), а остроконечного — по формулам

$$L_{\text{опт}} = a_{\text{р}}^{2}/(3\lambda), \quad b_{\text{р}} = 0{,}8a_{\text{р}}. \tag{7.27}$$

Ширина ДН (в радианах) оптимального пирамидального рупора в главных плоскостях определяется по формулам:

в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^{H} = 1{,}4\lambda/a_{\text{р}}; \tag{7.28}$$

в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^{E} = 0{,}93\lambda/b_{\text{р}}. \tag{7.29}$$

КНД оптимального пирамидального рупора рассчитывается как

$$D_0 = 4\pi\nu a_{\text{р}} b_{\text{р}}/\lambda^2 \approx 6{,}2 a_{\text{р}} b_{\text{р}}/\lambda^2, \tag{7.30}$$

где ν — КИП раскрыва, равный 0,49.

Нормированные амплитудные ДН пирамидальной рупорной антенны при возбуждении ее волной H_{10} приближенно можно рассчитать по формулам для прямоугольной синфазной апертуры с косинусоидальным в плоскости H и постоянным в плоскости E амплитудными распределениями:

$$\overline{F}(\theta^H) = \frac{\cos\left(\dfrac{\pi a_{\text{р}}}{\lambda}\sin\theta^H\right)}{1-\left(\dfrac{2a_{\text{р}}}{\lambda}\sin\theta^H\right)^2}\,\frac{1+\cos\theta^H}{2}; \tag{7.31}$$

$$\overline{F}(\theta^E) = \frac{\sin\left(\dfrac{\pi b_{\text{р}}}{\lambda}\sin\theta^E\right)}{\dfrac{\pi b_{\text{р}}}{\lambda}\sin\theta^E}\,\frac{1+\cos\theta^E}{2}, \tag{7.32}$$

где θ^H, θ^E — углы, отсчитываемые от оси рупора в плоскостях H и E соответственно.

Размеры оптимального конического рупора, возбуждаемого волной основного типа круглого волновода, связаны между собой соотношением

$$L_{\text{опт}} = d_{\text{р}}^2/(2{,}4\lambda) - 0{,}15\lambda, \qquad (7.33)$$

где $L_{\text{опт}}$, $d_{\text{р}}$ — оптимальная длина и диаметр раскрыва рупора.

Ширина ДН (в радианах) оптимального конического рупора составляет:

в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^H \approx 1{,}23\lambda/d_{\text{р}}; \qquad (7.34)$$

в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^E \approx 1{,}05\lambda/d_{\text{р}}. \qquad (7.35)$$

КНД в направлении максимума излучения такой антенны определяется по формуле

$$D_0 = \nu\,(\pi d_{\text{р}}/\lambda)^2 \approx 5(d_{\text{р}}/\lambda)^2, \qquad (7.36)$$

где ν — КИП раскрыва, равный 0,51.

Потери в рупорных антеннах малы, и в расчетах обычно принимают КПД ≈ 1.

Зеркальные антенны

Осесимметричные параболические зеркальные антенны часто возбуждаются полуволновым вибратором с рефлектором или пирамидальным рупором, фазовые центры которых должны находиться в фокусе параболоида (рис. 7.3). Если облучатель создает сферическую волну, то за счет свойств параболоида сферическая волна преобразуется на выходе апертуры в плоскую, а относительно широкая ДН облучателя — в узкую ДН зеркальной антенны. Уравнение профиля осесимметричного параболического зеркала в декартовой системе координат определяется формулой

$$R(\psi) = \frac{2f_{\text{а}}}{1+\cos\psi}, \qquad (7.37)$$

где R — расстояние из фокуса до произвольной точки на поверхности зеркала;

ψ — угол между осью зеркала и направлением из фокуса в произвольную точку на поверхности зеркала;

$f_{\text{а}}$ — фокусное расстояние (расстояние от вершины зеркала до фокуса).

В направлении зеркала нормированная амплитудная ДН облучателя приближенно может быть описана выражением

$$\overline{F}_{\text{обл}}(\psi) \approx \cos^m\psi, \ m \ge 1.$$

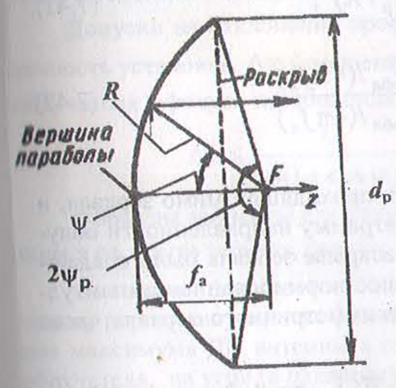


Рис. 7.3. Профиль параболического зеркала

Для полуволнового вибратора с линейным рефлектором $m = 1$; для вибратора с дисковым рефлектором $m = 2$; для рупорных облучателей $m \ge 3$.

Оптимальное фокусное расстояние зеркала $f_{\text{опт}}$, обеспечивающее при заданном диаметре раскрыва $d_{\text{р}} = 2a_{\text{р}}$ и заданной ДН облучателя $\overline{F}_{\text{обл}}(\psi)$ наибольшее значение КНД антенны, зависит от диаметра раскрыва зеркала и ДН облучателя. Значения $f_{\text{опт}}/d_{\text{р}}$ для разных m приведены в табл. 7.1.

Таблица 7.1

m	$f_{\text{опт}}/d_{\text{р}}$
1	0,34–0,40
2	0,40–0,50
3	0,50–0,625

Диаметр раскрыва $d_{\text{р}}$, полный угол раскрыва зеркала $2\psi_{\text{р}}$ и его фокусное расстояние $f_{\text{а}}$ связаны между собой соотношением

$$d_{\text{р}} = 4 f_{\text{а}}\,\mathrm{tg}(\psi_{\text{р}}/2). \qquad (7.38)$$

Параболическую антенну с осесимметричным зеркалом (параболоидом вращения) и облучателем линейной поляризации рассмотренных выше типов при оптимальном фокусном расстоянии характеризуют параметры:

ширина ДН (в радианах) в плоскости $H(\varphi = 0)$

$$2\theta_{0,5}^H \approx 1{,}2\lambda/d_{\text{р}}; \qquad (7.39)$$

ширина ДН (в радианах) в плоскости E $(\varphi = \pi/2)$

$$2\theta_{0,5}^{E} \approx 1{,}3\lambda / d_{\text{р}}; \tag{7.40}$$

КНД в направлении максимума излучения

$$D_0 \approx 5{,}5(d_{\text{р}}/\lambda)^2; \tag{7.41}$$

КБВ в фидере облучателя

$$\text{К}_{\text{БВ}} = \frac{1-\lambda D_{\text{обл}}/(4\pi f_{\text{а}})}{1+\lambda D_{\text{обл}}/(4\pi f_{\text{а}})}, \tag{7.42}$$

где $D_{\text{обл}}$ — КНД облучателя.

С целью уменьшения доли энергии, проходящей мимо зеркала, и снижения уровня боковых лепестков диаграмму направленности облучателя выбирают такой, чтобы поле в раскрыве зеркала было спадающим к его краю. В этом случае синфазное нормированное амплитудное распределение поля в раскрыве осесимметричного зеркала часто аппроксимируется полиномом вида

$$\bar{I}(\bar{\rho}) = (1-\delta) + \delta\left(1-\bar{\rho}^2\right)^n, \; n = 1, 2, \ldots, \tag{7.43}$$

где $(1-\delta)$ — уровень поля на краю раскрыва относительно максимального значения в центре, равного единице при $\delta = 0$; $\bar{\rho}$ — нормированная на радиус зеркала $a_{\text{р}}$ координата в раскрыве.

Тогда нормированная амплитудная ДН параболической зеркальной антенны приближенно может быть рассчитана по теореме о перемножении диаграмм направленности (5.40) как произведение ДН элемента Гюйгенса $\bar{F}_{\text{эл}}(\theta) = (1+\cos\theta)/2$ и множителя направленности круглого синфазного раскрыва (апертуры)

$$\bar{f}_{\Sigma}(\theta) = \left[(1-\delta)\Lambda_1(u) + \delta\frac{\Lambda_{n+1}(u)}{n+1}\right]. \tag{7.44}$$

Для остронаправленных антенн в пределах главного лепестка ДН можно считать $\bar{F}_{\text{эл}}(\theta) \approx 1$, т.е. ДН зеркальной антенны в основном определяется множителем направленности апертуры. В (7.44) специальная функция $\Lambda_n(u) = \dfrac{n!\,J_n(u)}{(u/2)^n}$ называется лямбда-функцией порядка n и выражается через функцию Бесселя того же порядка; $u = ka_{\text{р}}\sin\theta$. В направлении максимума излучения $(\theta = 0)$ имеем $\Lambda_1(0) = 1$; функции более высоких порядков при этом значении аргумента обращаются в нуль.

Поляризация излучения зеркальных антенн определяется поляризацией облучателя. При этом необходимо учитывать, что в случае круговой поляризации при отражении от металлического зеркала направление вращения плоскости поляризации меняется на противоположное. В случае линейной поляризации ее характер при отражении не меняется.

Допуски на отклонение профиля зеркала $\Delta\rho_1$ от параболы и на точность установки Δz (смещение в сторону зеркала) фазового центра облучателя в фокусе параболоида определяются по формулам

$$\Delta\rho \le \frac{\lambda}{16(1+\cos\psi)}; \quad \Delta z \le \frac{\lambda}{16(1-\cos\psi_{\text{р}})}. \tag{7.45}$$

Формулы записаны для случая максимальных фазовых искажений поля в раскрыве зеркала, равных $\pi/8$.

Смещение Δx фазового центра облучателя из фокуса в направлении, перпендикулярном фокальной оси зеркала, вызывает отклонение максимума ДН антенны в сторону, противоположную смещению облучателя, на угол (в радианах)

$$\delta\theta \approx K_{\text{р}}\Delta x / f_{\text{а}}, \tag{7.46}$$

где $K_{\text{р}}$ — коэффициент, зависящий от размеров и фокусирующих свойств антенны, определяемый по формуле

$$K_{\text{р}} \approx 1 - 0{,}5(0{,}25 d_{\text{р}} / f_{\text{а}})^2. \tag{7.47}$$

Для уменьшения реакции зеркала на облучатель вблизи вершины параболоида на его оси может устанавливаться плоский компенсирующий отражатель. Диаметр $d_{\text{к}}$ этого отражателя и его минимальное удаление $z_{\text{к}}$ от вершины параболоида (вдоль оси) определяются по формулам

$$d_{\text{к}} = \sqrt{4\lambda f_{\text{а}}/\pi}; \quad z_{\text{к}} = \lambda/24. \tag{7.48}$$

Другим способом уменьшения реакции зеркала на облучатель является использование усеченного параболоида с облучателем, вынесенным из поля действия отраженных от параболоида волн. Такая антенна имеет ширину луча на уровне 0,5 по мощности (в радианах):

в плоскости H

$$2\theta_{0,5}^{H} \approx 1{,}2\lambda / d_{\text{р}}; \tag{7.49}$$

в плоскости E

$$2\theta_{0,5}^{E} \approx 1{,}2\lambda / a_{\text{р}}, \tag{7.50}$$

где $d_р$ и $a_р$ — размеры раскрыва зеркала в указанных плоскостях.

Для уменьшения массы и ветровой нагрузки, а также снижения уровня кроссполяризованного излучения поверхность зеркала перфорируют или выполняют решетчатой. Коэффициент прохождения (просачивания) электромагнитной энергии через перфорированную поверхность рассчитывается по формуле

$$T_{пр} = \left(\frac{8}{3}\frac{d_{от}\,S_{от}}{\lambda S_р}\right), \tag{7.51}$$

где $d_{от}$ — диаметр отверстий; $S_{от}$ — общая площадь всех отверстий в рефлекторе; $S_р$ — площадь отражающей поверхности.

С целью уменьшения осевого размера, увеличения КИП и КПД, для снижения шумовой температуры параболической антенны, что очень важно при использовании последней в системах космической связи, к основному параболическому зеркалу 1 часто добавляют вспомогательное (малое) зеркало в виде гиперболоида вращения 2, один из фокусов которого (точка F_1) совмещают с фокусом основного зеркала, а в фокусе второго зеркала (точка F_2) помещают облучатель (рис. 7.4).

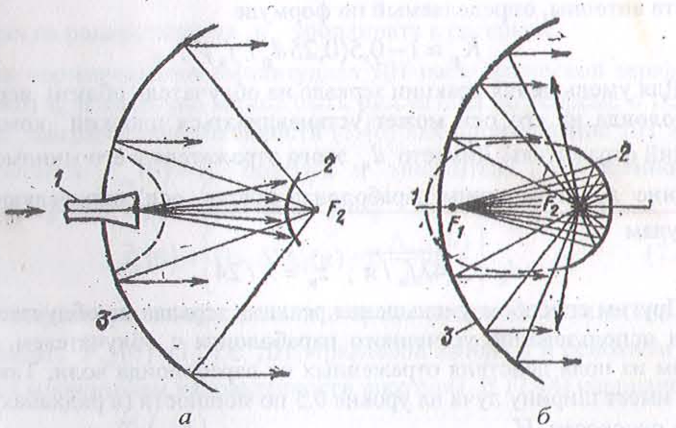


Рис. 7.4. Схемы построения двухзеркальных антенн Кассегрена (*а*) и Грегори (*б*): 1 — облучатель, 2 — малое зеркало, 3 — большое зеркало

Геометрические размеры такой двухзеркальной антенны, называемой антенной Кассегрена, определяются по формулам

$$\left.\begin{aligned} &d_1 \approx 1{,}2\lambda/(2\theta_{0,5}); \quad f_1 \approx 0{,}35 d_1; \quad d_2 \approx 0{,}15 d_1; \\ &f_2 \approx 0{,}5 d_2 (0{,}35 + \mathrm{ctg}\,\theta_2), \end{aligned}\right\} \tag{7.52}$$

где $2\theta_{0,5}$ — ширина луча антенны на уровне 0,5 по мощности в главных плоскостях (E или H); d_1 и f_1 — диаметр и фокусное расстояние большого зеркала; d_2 и f_2 — диаметр и фокусное расстояние малого зеркала; $2\,\theta_2$ — полный угол раскрыва малого зеркала.

Если высокая направленность зеркальной антенны требуется только в одной плоскости, то вместо параболоида вращения используется зеркало в виде параболического цилиндра. Параболический цилиндр обычно возбуждается линейным облучателем, расположенным вдоль фокальной оси цилиндра и преобразует цилиндрический фронт волны облучателя в плоский. Такую антенну при синфазном и равномерном амплитудном распределениях поля вдоль фокальной оси характеризуют параметры:

а) ширина ДН на уровне 0,5 по мощности (в радианах)

в плоскости xOz

$$2\theta_{0,5}^{xOz} = 1{,}27\lambda / d_р; \tag{7.53}$$

в плоскости yOz

$$2\theta_{0,5}^{yOz} = 0{,}89\lambda / a_р; \tag{7.54}$$

б) КНД в направлении максимума излучения

$$D_0 \approx 10 a_р d_р / \lambda^2; \tag{7.55}$$

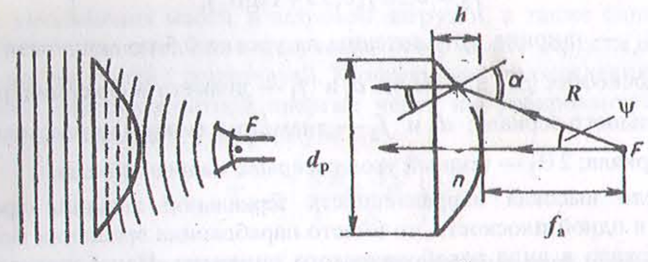
в) КБВ в фидере облучателя

$$К_{БВ} = \frac{1 - \dfrac{D_{обл}}{2\pi}\sqrt{\lambda/f_а}}{1 + \dfrac{D_{обл}}{2\pi}\sqrt{\lambda/f_а}}. \tag{7.56}$$

Здесь $d_р$, $a_р$ и $f_а$ — диаметр раскрыва, длина образующей и фокусное расстояние цилиндрического зеркала; $D_{обл}$ — КНД облучателя.

Линзовые антенны

Линзовые антенны состоят из электромагнитной линзы и облучателя, фазовый центр которого совмещен с фокусом линзы. Чаще всего используются диэлектрическая, или замедляющая (рис. 7.5), и металлопластинчатая, или ускоряющая (рис. 7.6), линзы.



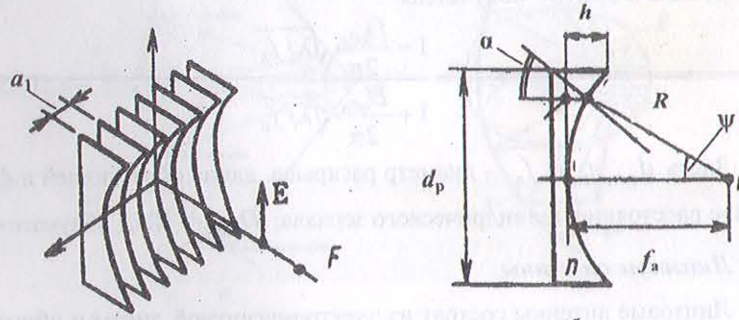
а *б*

Рис. 7.5. Диэлектрическая линза (*а*) и ход лучей в ней (*б*)

Уравнение профиля замедляющей и ускоряющей линз в сферической системе координат определяется формулой

$$R(\psi)=\left(\frac{n-1}{n\cos\psi-1}\right)f_а, \tag{7.57}$$

где R — расстояние из фокуса до произвольной точки на поверхности линзы; ψ — угол между осью линзы и направлением из фокуса в произвольную точку на поверхности линзы; $f_а$ — фокусное расстояние; n — коэффициент преломления линзы.



а *б*

Рис. 7.6. Металлопластинчатая линза (*а*) и ход лучей в ней (*б*)

Диэлектрические линзы имеют коэффициент преломления $n=\sqrt{\varepsilon}>1$, где ε — относительная диэлектрическая проницаемость материала линзы. Толщина h гладкой диэлектрической линзы находится по формуле

$$h=\sqrt{\left(\frac{f_а}{n+1}\right)^2+\frac{d_р^2}{4(n^2-1)}}-\frac{f_а}{n+1}, \tag{7.58}$$

где $d_р$ — размер (прямоугольного) или диаметр (круглого) раскрыва линзы.

Металлопластинчатые линзы имеют коэффициент преломления

$$n=\sqrt{1-(\lambda/2a_1)^2}<1,$$

где a_1 — расстояние между параллельными пластинами линзы. В отличие от диэлектрических коэффициент преломления металлопластинчатых линз зависит от частоты, поэтому они сравнительно узкополосны. Относительная ширина полосы рабочих частот гладкой металлопластинчатой линзы (в процентах) рассчитывается по формуле

$$\frac{\Delta f}{f_{ср}}=\frac{50\lambda_{ср}n}{(1-n^2)h}, \tag{7.59}$$

где h — толщина гладкой металлопластинчатой линзы, определяемая по формуле

$$h=\frac{f_а}{n+1}-\sqrt{\left(\frac{f_а}{n+1}\right)^2-\frac{d_р^2}{4(1-n^2)}}. \tag{7.60}$$

Если известны $d_р$ и h, то полный угол раскрыва линзы $2\psi_р$ находится как

$$\left.\begin{aligned}\psi_р&=\operatorname{arctg}\left[\frac{d_р}{2(f_а+h)}\right] \quad \text{при} \quad n>1;\\ \psi_р&=\operatorname{arctg}\left[\frac{d_р}{2(f_а-h)}\right] \quad \text{при} \quad n<1.\end{aligned}\right\} \tag{7.61}$$

Для электромагнитных линз отношение $f_а/d_р$ может находиться в пределах от 0,7 до 1,6; на практике часто выбирают $f_а\approx d_р$.

Чтобы уменьшить толщину линзы, сделать ее более широкополосной и технологичной, применяют зонированные (ступенчатые) линзы.

Размеры зонированной диэлектрической линзы определяются по формулам:

а) ширина ступеньки

$$z_1 = \frac{\lambda}{n-1}; \tag{7.62}$$

б) толщина ступеньки

$$h = z_1 + z_2, \tag{7.63}$$

где z_2 — утолщение линзы, выбираемое из условия обеспечения ее механической прочности;

в) общее число зон

$$q = 1 + (f_q - f_a)(n-1)/\lambda, \tag{7.64}$$

где $f_q = \dfrac{nf_a \Big/ \sqrt{f_a^2 + (0{,}5d_p)^2}}{n-1} \sqrt{(0{,}5d_p)^2 + (f_a + h)^2}$.

Размеры зонированной металлопластинчатой линзы определяются по формулам:

а) ширина ступеньки

$$z_1 = \frac{\lambda}{1-n}; \tag{7.65}$$

б) толщина ступеньки

$$h = z_1 + z_2; \tag{7.66}$$

в) общее число зон

$$q = 1 + (f_q - f_a)(1-n)/\lambda, \tag{7.67}$$

где $f_q = \dfrac{\sqrt{f_a^2 + (0{,}5d_p)^2} - nf_a}{1-n}$.

Относительная ширина полосы рабочих частот зонированных линз (в процентах) рассчитывается по формуле

$$\frac{\Delta f}{f_{ср}} = \frac{50}{q + 1/n}. \tag{7.68}$$

При известном распределении возбуждающего поля в раскрыве осесимметричной линзы нормированные амплитудные ДН линзовых антенн приближенно могут быть рассчитаны по теореме о перемножении диаграмм направленности как произведение ДН элемента Гюйгенса

$\overline{F}_{эл}(\theta)$ и множителя направленности круглого синфазного раскрыва (7.44). При этом в (7.44) необходимо λ заменить на $\lambda_д = \lambda/\sqrt{\varepsilon}$. Для остронаправленных антенн $\overline{F}_{эл}(\theta) \approx 1$, и ДН антенны в основном определяется множителем направленности апертуры. С целью уменьшения доли энергии, проходящей мимо линзы, и снижения уровня боковых лепестков ДН облучателя выбирают такой, чтобы поле в раскрыве линзы было спадающим к ее краю.

В качестве облучателя антенны на сферической (цилиндрической) линзе может использоваться укороченный пирамидальный (секториальный) рупор, который создает сферическую (цилиндрическую) волну и имеет широкую ДН. Установив линзу в раскрыве так, чтобы ее фокус находился в фазовом центре рупора, можно сферическую или цилиндрическую волну, распространяющуюся в рупоре, преобразовать в плоскую и тем самым существенно уменьшить фазовые искажения в раскрыве рупора и увеличить его направленность. Нормированные амплитудные ДН таких антенн, называемых рупорно-линзовыми, в главных плоскостях могут быть рассчитаны по формулам (7.31), (7.32) для прямоугольной синфазной апертуры с заменой λ на $\lambda_д = \lambda/\sqrt{\varepsilon}$.

КНД линзовых антенн в направлении максимума излучения определяется как

$$D_0 \approx 7{,}5S_p/\lambda^2, \tag{7.69}$$

где S_p — площадь раскрыва линзы.

КПД антенны с диэлектрической линзой определяется формулой

$$\eta = \exp\left(-\frac{2\pi hn}{\lambda}\operatorname{tg}\delta\right), \tag{7.70}$$

где $n = \sqrt{\varepsilon}$; h — толщина линзы.

КУ линзовых антенн в направлении максимума излучения рассчитывают по формуле (5.16).

КБВ в фидере облучателя линзовой антенны равен: $1/n$ — у диэлектрических линз; n — у металлопластинчатых линз.

Допуски на отклонение профиля диэлектрической линзы $\Delta\rho_1$ от теоретической кривой и на точность установки Δz фазового центра облучателя в фокусе линзы определяются по формулам

$$\Delta\rho \le \frac{\lambda}{16(n-1)}; \quad \Delta z \le \lambda/2. \tag{7.71}$$

Для металлопластинчатой линзы аналогичные допуски рассчитываются по формулам

$$\Delta\rho \le \frac{\lambda}{16(1-n)}; \quad \Delta z \le \lambda/2. \tag{7.72}$$

Допуск на расстояние между пластинами Δa_1 определяется по формуле

$$\Delta a_1 \le \frac{n\lambda a_1}{2d_р(1+n)}. \tag{7.73}$$

Отклонение максимума ДН линзовой антенны при смещении фазового центра облучателя из фокуса в направлении, перпендикулярном фокальной оси линзы, происходит так же, как и в случае параболической антенны и определяется по формуле (7.46).

Поляризация излучения линзовых антенн, как и в случае зеркальных антенн, определяется поляризацией облучателя.

Примеры решения типовых задач

1. Максимальный КНД оптимального *H*-плоскостного секториального рупора равен $D_0 = 17{,}5$. Определить ширину ДН рупора на уровне 0,5 по мощности в плоскости H, если ширина ДН на указанном уровне в плоскости E равна $2\theta_{0,5}^E = 1{,}15$ рад.

Решение

Из формулы (7.26) следует $D_0 \cong 8a_р b/\lambda^2$. Один из размеров раскрыва рупора согласно формуле (7.22) равен $\dfrac{b}{\lambda} = \dfrac{0{,}89}{2\theta_{0,5}^E}$. С учетом этого $D_0 = \dfrac{8a_р}{\lambda}\dfrac{b}{\lambda} = \dfrac{8a_р}{\lambda}\dfrac{0{,}89}{2\theta_{0,5}^E}$, откуда $\dfrac{a_р}{\lambda} = \dfrac{2\theta_{0,5}^E D_0}{0{,}89 \cdot 8}$.

Используя формулу (7.21), получаем

$$2\theta_{0,5}^H = 1{,}4\frac{\lambda}{a_р} = 1{,}4\frac{8\cdot 0{,}89}{2\theta_{0,5}^E \cdot D_0} = 1{,}4\frac{8\cdot 0{,}89}{1{,}15\cdot 17{,}5} = 0{,}495 \text{ рад}.$$

2. Определить размеры и параметры оптимального остроконечного пирамидального рупора, возбуждаемого на волне $\lambda = 7$ см. Длина рупора $L_{опт} = 84$ см.

Решение

Определим размеры раскрыва рупора. Пользуясь соотношениями (7.27), получаем

$$a_р = \sqrt{3L_{опт}\lambda} = \sqrt{3\cdot 84\cdot 7} = 42 \text{ см};$$

$$b_р = 0{,}8a_р = 0{,}8\cdot 42 = 33{,}6 \text{ см}.$$

По формулам (7.28)–(7.30) находим:

$$2\theta_{0,5}^H = 1{,}4\frac{\lambda}{a_р} = 1{,}4\cdot\frac{7}{42} \approx 0{,}233 \text{ рад};$$

$$2\theta_{0,5}^E = 0{,}93\frac{\lambda}{b_р} = 0{,}93\cdot\frac{7}{33{,}6} \approx 0{,}194 \text{ рад};$$

$$D_0 \approx 6{,}2\frac{a_р b_р}{\lambda^2} = 6{,}2\cdot\frac{42\cdot 33{,}6}{7^2} \approx 178.$$

3. Определить размеры раскрыва оптимального пирамидального рупора, максимальный КНД которого $D_0 = 240$. Ширина ДН рупора на уровне 0,5 по мощности в главных плоскостях одинакова $(2\theta_{0,5}^H = 2\theta_{0,5}^E)$, а длина волны равна $\lambda = 2$ см.

Решение

Для решения воспользуемся формулами (7.28)–(7.30). Из формул (7.28) и (7.29) имеем $1{,}4\lambda/a_р = 0{,}93/b_р$, откуда $b_р = 0{,}665\,a_р$.

Используя формулу (7.30), находим

$$a_р = \lambda\sqrt{\frac{D_0}{6{,}2\cdot 0{,}665}} \cong 2\sqrt{\frac{240}{4{,}12}} \cong 15{,}3 \text{ см};$$

$$b_р = 0{,}665a_р = 0{,}665\cdot 15{,}3 \cong 10{,}2 \text{ см}.$$

4. Рассчитать пирамидальный рупор, который при возбуждении его прямоугольным волноводом МЭК-100 на волне длиной $\lambda = 3$ см имеет КНД в направлении максимума излучения не менее 40.

Решение

Размеры рупора в горловине определяются внутренними размерами волновода $a = 22{,}85$ мм; $b = 10{,}16$ мм.

Площадь раскрыва рупора $S_р$ определяем из формулы (7.30). Она равна $S_р = \dfrac{D_0\lambda^2}{6{,}2} = \dfrac{40\cdot 9}{6{,}2} \cong 58$ см^2. Размеры сторон раскрыва рупора

$a_р$ и $b_р$ находим, исходя из оптимального соотношения между ними (7.27): $b_р = 0{,}8a_р = \dfrac{0{,}8S_р}{b_р} = \dfrac{46{,}5}{b_р}$, откуда

$$b_р = \sqrt{46{,}5} \cong 6{,}82 \text{ см}; \; a_р = \frac{6{,}82}{0{,}8} \cong 8{,}52 \text{ см}.$$

Длину рупора определяем из (7.27) $L_{опт} = \dfrac{a_р^{\,2}}{3\lambda} = \dfrac{(8{,}52)^2}{3\cdot 3} \cong 8{,}07$ см.

Диаграммы направленности можно рассчитать по формулам (7.31) и (7.32). Их ширину оцениваем по формулам (7.28), (7.29):

$$2\theta_{0,5}^{H} = 1{,}4\lambda / a_р = 1{,}4\cdot 3/8{,}52 \cong 0{,}493 \text{ рад};$$

$$2\theta_{0,5}^{E} = 0{,}93\lambda / b_р = 0{,}93\cdot 3/6{,}82 \cong 0{,}409 \text{ рад}.$$

5. Оптимальная коническая рупорная антенна имеет КНД в направлении максимума излучения $D_0 = 320$. Длина рупора $L_{опт} = 1{,}2$ м. Определить длину волны, на которой работает антенна, и ширину ее ДН на уровне 0,5 по мощности в H- и E-плоскостях.

Решение

Из формулы (7.36) следует $\dfrac{d_р}{\lambda} = \sqrt{\dfrac{D_0}{5}}$.

На основании формул (7.34) и (7.35) имеем

$$2\theta_{0,5}^{H} \approx 1{,}23\frac{\lambda}{d_р} = 1{,}23\sqrt{\frac{5}{D_0}} = 1{,}23\sqrt{\frac{5}{320}} \approx 0{,}154 \text{ рад};$$

$$2\theta_{0,5}^{E} \approx 1{,}05\frac{\lambda}{d_р} = 1{,}05\sqrt{\frac{5}{D_0}} = 1{,}05\sqrt{\frac{5}{320}} \approx 0{,}131 \text{ рад}.$$

Рабочую длину волны определяем, используя соотношение (7.33) и учитывая, что $d_р = \lambda\sqrt{D_0/5}$. Тогда $L_{опт} = \lambda\,(D_0/12 - 0{,}15)$, откуда

$$\lambda = \frac{L_{опт}}{\dfrac{D_0}{12} - 0{,}15} = \frac{1{,}2}{\dfrac{320}{12} - 0{,}15} \approx 4{,}53 \text{ см}.$$

6. Определить фокусное расстояние зеркальной антенны в виде параболоида вращения с углом раскрыва $\psi_р = 60°$, максимальный КНД которой на волне длиной 3 см составляет $D_0 = 400$. Коэффициент использования поверхности раскрыва принять равным 0,6.

Решение

Геометрическую площадь $S_р$ раскрыва зеркала определяем согласно (7.12) и (7.13): $S_р = \dfrac{D_0\lambda^2}{4\pi\nu} = \dfrac{400\cdot 9}{4\pi\cdot 0{,}6} = 477{,}7$ см^2.

Диаметр параболического зеркала будет

$$d_р = \sqrt{\frac{4S_р}{\pi}} = \sqrt{\frac{4\cdot 477{,}7}{3{,}14}} = \sqrt{608{,}5} = 24{,}7 \text{ см}.$$

Фокусное расстояние определяем, пользуясь формулой (7.38):

$$f_а = \frac{d_р\operatorname{ctg}(\psi_р/2)}{4} = \frac{24{,}7\operatorname{ctg}30°}{4} = \frac{24{,}7\cdot 1{,}73}{4} = 10{,}7 \text{ см}.$$

7. Параболическая антенна с осесимметричным зеркалом диаметром $d_р = 4{,}5$ м возбуждается полуволновым вибратором с дисковым контррефлектором и работает на волне длиной $\lambda = 20$ см. Определить оптимальное фокусное расстояние зеркала, угол его раскрыва и электрические параметры антенны.

Решение

Показатель степени в выражении для нормированной амплитудной ДН полуволнового вибратора с дисковым контррефлектором равен $m = 2$. Согласно табл. 7.1 при $m = 2$ имеем $f_{опт}/d_р = 0{,}4$–$0{,}5$. Возьмем среднее значение. Тогда

$$f_{опт} = 0{,}45d_р = 0{,}45\cdot 4{,}5 = 2{,}025 \text{ м}.$$

Из соотношения (7.38) находим

$$\psi_р = 2\operatorname{arctg}\frac{d_р}{4f_{опт}} = 2\operatorname{arctg}\frac{4{,}5}{4\cdot 2{,}025} \approx 1{,}02 \text{ рад}.$$

По формулам (7.39)–(7.41) получаем

$$2\theta_{0,5}^{H} \approx 1{,}2\frac{\lambda}{d_р} = 1{,}2\frac{20}{450} \approx 53 \text{ мрад};$$

$$2\theta_{0,5}^{E} \approx 1{,}3\frac{\lambda}{d_р} = 1{,}3\frac{20}{450} \approx 58 \text{ мрад};$$

$$D_0 \cong 5{,}5\left(\frac{d_р}{\lambda}\right)^2 = 5{,}5\left(\frac{450}{20}\right)^2 \cong 2800.$$

8. Определить параметры антенны с зеркалом в виде параболического цилиндра и КБВ в фидере облучателя. Диаметр цилиндра $d_р = 20$ см, длина образующей $a_р = 80$ см, фокусное расстояние $f_а = 30$ см. Антенна работает на волне длиной $\lambda = 3$ см, КНД облучателя в осевом направлении $D_{обл} = 4$.

Решение

По формулам (7.53)–(7.56) находим:

$$2\theta_{0,5}^{xOz} \approx 1{,}27\frac{\lambda}{d_р} = 1{,}27\cdot\frac{3}{20} \approx 0{,}19 \text{ рад};$$

$$2\theta_{0,5}^{yOz} \approx 0{,}89\frac{\lambda}{a_р} = 0{,}89\frac{3}{80} \approx 0{,}033 \text{ рад}.$$

$$D_0 \approx 10\frac{a_р d_р}{\lambda^2} = 10\cdot\frac{80\cdot 20}{3^2} \approx 1780;$$

$$К_{БВ} = \frac{1-\dfrac{D_{обл}}{2\pi}\sqrt{\lambda/f_а}}{1+\dfrac{D_{обл}}{2\pi}\sqrt{\lambda/f_а}} = \frac{1-\dfrac{4}{2\pi}\sqrt{3/30}}{1+\dfrac{4}{2\pi}\sqrt{3/30}} = 0{,}67.$$

9. Определить толщину ускоряющей металлопластинчатой линзы, если расстояние между пластинами $a_1 = 5{,}5$ см, длина волны $\lambda = 10$ см, фокусное расстояние и диаметр линзы составляют $f_а = 180$ см и $d_р = 180$ см.

Решение

Показатель преломления линзы равен

$$n = \sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{2a_1}\right)^2} = \sqrt{1-\left(\frac{10}{2\cdot 5{,}5}\right)^2} = 0{,}42.$$

Толщину линзы находим по формуле (7.60): $h = \dfrac{f_а}{1+n} -$

$$-\sqrt{\left(\frac{f_а}{1+n}\right)^2 - \frac{d_р^2}{4(1-n^2)}} = \frac{180}{1{,}42} - \sqrt{\left(\frac{180}{1{,}42}\right)^2 - \frac{180^2}{4(1-0{,}174)}} = 64{,}9 \text{ см}.$$

10. Определить КНД в направлении максимума излучения зонированной металлопластинчатой линзы, работающей на волне длиной $\lambda = 13$ см и

имеющей параметры: $q = 3$; $\Delta f / f_{ср} = 10$ %; $d_р = f_а$. Рассчитать технические допуски на точность изготовления антенны.

Решение

Из формулы (7.68) находим коэффициент преломления линзы

$$n = \frac{1}{\dfrac{50}{\Delta f} f_{ср} - q} = \frac{1}{\dfrac{50}{10} - 3} = 0{,}5.$$

Поскольку $d_р = f_а$, то выражение для $f_а$, входящее в формулу (7.67), принимает значение

$$f_q = \frac{\sqrt{1{,}25-n}}{1-n} f_а = \frac{\sqrt{1{,}25-0{,}5}}{0{,}5} f_а \approx 1{,}24 f_а.$$

Тогда $q = 1 + \dfrac{(f_q - f_а)(1-n)}{\lambda} = 1 + \dfrac{0{,}24 f_а(1-n)}{\lambda}$, откуда

$$f_а = d_р = \frac{(q-1)\lambda}{0{,}24(1-n)} = \frac{2\cdot 13}{0{,}24\cdot 0{,}5} \approx 2{,}16 \text{ м}.$$

Из формулы (7.69) получаем

$$D_0 \approx 7{,}5\frac{S_р}{\lambda^2} = \frac{7{,}5}{\lambda^2}\frac{\pi d_р^2}{4} = \frac{7{,}5\pi\cdot 216^2}{4\cdot 13^2} \approx 1630.$$

Расстояние между пластинами линзы a_1 находим из формулы для коэффициента преломления $n = \sqrt{1-(\lambda/2a_1)^2}$:

$$a_1 = \frac{\lambda}{2\sqrt{1-n^2}} = \frac{13}{2\sqrt{1-0{,}5^2}} = 7{,}5 \text{ см}.$$

Технические допуски на точность изготовления линзовой антенны рассчитываем по формулам (7.72) и (7.73):

$$\Delta\rho \le \frac{\lambda}{16(1-n)} = \frac{13}{16\cdot 0{,}5} \approx 1{,}63 \text{ см};$$

$$\Delta z \le \frac{\lambda}{2} = \frac{13}{2} = 6{,}5 \text{ см};$$

$$\Delta a_1 \le \frac{n\lambda a_1}{2d_р(1+n)} = \frac{0{,}5\cdot 13\cdot 7{,}5}{2\cdot 216\cdot 1{,}5} \approx 0{,}75 \text{ мм}.$$

11. Рассчитать H-плоскостной рупор с корректирующей металлопластинчатой линзой внутри него. Антенна должна работать на волне длиной $\lambda = 8$ см и иметь КНД в осевом направлении $D_0 = 15$.

Решение

Размеры поперечного сечения рупора в месте соединения его с волноводом определяются стандартом волновода и составляют:

$$a = 0{,}71\lambda = 0{,}71 \cdot 8 = 5{,}8 \text{ см}; \quad b = 0{,}32\lambda = 0{,}32 \cdot 8 = 2{,}6 \text{ см}.$$

Благодаря корректирующей линзе поле в раскрыве рупора синфазно. Это позволяет считать, что КИП антенны в плоскости E, где амплитуда постоянна, равен $\nu_E = 1$, а в плоскости H, где амплитуда поля меняется по косинусоидальному закону, равен $\nu_H = 0{,}81$. Зная КИП, можно по формулам (7.12), (7.13) найти КНД в плоскостях E и H в направлении максимума ДН:

$$D_0^H = \frac{4\pi}{\lambda^2}\nu_H S_\text{р} = \frac{4\pi}{8^2} \cdot 0{,}81 S_\text{р} = 0{,}16 S_\text{р},$$

$$D_0^E = \frac{4\pi}{\lambda^2}\nu_E S_\text{р} = \frac{4\pi}{8^2} \cdot S_\text{р} = 0{,}2 S_\text{р}.$$

Следовательно, средний КНД антенны равен

$$D_0 = \sqrt{D_0^H D_0^E} = \sqrt{0{,}2 \cdot 0{,}16 \cdot S_\text{р}^2} = 0{,}18 S_\text{р}.$$

Отсюда определим геометрическую площадь раскрыва антенны

$$S_\text{р} = \frac{D_0}{0{,}18} = \frac{15}{0{,}18} = 83 \text{ см}^2.$$

Найдем размеры раскрыва рупора $a_\text{р}, b_\text{р}$. Поскольку рупор секториальный, то $b_\text{р} = b = 2{,}6$ см, а для $a_\text{р}$ имеем

$$a_\text{р} = \frac{S_\text{р}}{b_\text{р}} = \frac{83}{2{,}6} = 31{,}9 \text{ см}.$$

Выберем оптимальное значение показателя преломления линзы, которое равно $n = 0{,}5$. Найдем угол раскрыва рупора $\psi_\text{р}$. Известно, что с уменьшением $\psi_\text{р}$ линза облучается более равномерно, но при этом возрастает длина рупора. Поэтому возьмем промежуточное значение угла раскрыва $\psi = 25°$.

Длину рупора L определим из простого геометрического соотношения $\sin\psi = \frac{a_\text{р}}{2L}$, откуда находим $L = \frac{a_\text{р}}{2\sin\psi_\text{р}} = \frac{31{,}9}{2 \cdot 0{,}4226} = 37{,}7$ см.

По формуле (7.60) рассчитаем толщину линзы h, полагая, что выполняется соотношение $f_\text{а} = L = 37{,}7$ см:

$$h = \frac{f_\text{а}}{1+n} - \sqrt{\left(\frac{f_\text{а}}{1+n}\right)^2 - \frac{a_\text{р}^2}{4(1-n^2)}} =$$

$$= \frac{37{,}7}{1+0{,}5} - \sqrt{\left(\frac{37{,}7}{1+0{,}5}\right)^2 - \frac{31{,}9^2}{4(1-0{,}5^2)}} = 8 \text{ см}.$$

Найдем расстояние между пластинами линзы a_1. Показатель преломления волноводной линзы равен $n = \sqrt{1-(\lambda/2a_1)^2}$, поэтому

$$a_1 = \frac{\lambda}{2\sqrt{1-n^2}} = \frac{8}{2\sqrt{1-0{,}5^2}} = 4{,}7 \text{ см}.$$

Количество пластин m в линзе определим из соотношения

$$m = \frac{a_\text{р}}{a_1} + 1 = \frac{31{,}9}{4{,}7} + 1 = 7{,}8.$$

Округляем значения m до восьми и соответственно увеличиваем размер раскрыва до $a_\text{р} = 7a_1 = 7 \cdot 4{,}7 = 32{,}9$ см, а длину рупора до значения $L = \frac{a_\text{р}}{2\sin\psi_\text{р}} = \frac{32{,}9}{2 \cdot 0{,}4226} = 38{,}9$ см.

Фокусное расстояние оставляем прежним. Форму пластин рассчитываем, исходя из уравнения профиля линзы (7.57).

Определим ширину ДН антенны. Считаем, что линза обеспечила синфазность поля в раскрыве антенны и не нарушила существенно распределение амплитуды поля. Поэтому ширина ДН может быть найдена по формулам (7.21) и (7.22):

в плоскости H $2\theta_{0,5}^H \approx 1{,}4\frac{\lambda}{a_\text{р}} = 57{,}3 \cdot 1{,}4\frac{8}{31{,}9} = 20{,}1°$;

в плоскости E $2\theta_{0,5}^E \approx 0{,}89\frac{\lambda}{b_\text{р}} = 57{,}3 \cdot 0{,}89\frac{8}{2{,}6} = 156{,}9°$.

Задачи для самостоятельного решения

Волноводные излучатели

7.1. Определить максимальный коэффициент усиления и эффективную площадь излучателя в виде открытого конца прямоугольного волновода с поперечным сечением $a \times b = 2{,}3 \times 1$ см, работающего на волне длиной $\lambda = 3$ см. Потери не учитывать.

7.2. Определить ширину ДН (в радианах) в H- и E-плоскостях и максимальный КНД излучателя в виде открытого конца прямоугольного волновода сечением $a \times b = 6{,}1 \times 1$ см, возбуждаемого на волне длиной $\lambda = 6$ см.

7.3. Максимальный КНД открытого конца прямоугольного волновода, возбуждаемого на волне длиной $\lambda = 8{,}6$ см, равен $D_0 = 3{,}4$. Размер широкой стенки волновода $a = 7{,}2$ см. Определить размер его узкой стенки.

7.4. Во сколько раз ширина ДН открытого конца прямоугольного волновода на уровне 0,5 по мощности в плоскости E больше ширины ДН на том же уровне в плоскости H, если размеры сечения волновода связаны соотношением $a = 2b$?

7.5. Открытый конец прямоугольного волновода характеризуется параметрами: $2\theta^H_{0,5} = 2$ рад, $D_0 = 1{,}5$. Определить относительные (волновые) размеры поперечного сечения волновода.

7.6. Излучатель в виде открытого конца прямоугольного волновода характеризуется параметрами: $2\theta^H_{0,5} = 1{,}75$ рад; $2\theta^E_{0,5} = 1{,}4$ рад. Определить КНД излучателя в направлении максимума ДН.

7.7. Определить ширину ДН (в радианах) в главных плоскостях и максимальный КНД излучателя в виде открытого конца круглого волновода, возбуждаемого на волне длиной $\lambda = 3{,}2$ см. Внутренний диаметр волновода $2a = 2{,}4$ см.

7.8. Максимальный КНД открытого конца круглого волновода, возбуждаемого на волне длиной $\lambda = 10$ см, равен $D_0 = 3$. Определить внутренний диаметр волновода.

7.9. Определить длину волны, на которой возбуждается открытый конец круглого волновода диаметром $2a = 3{,}6$ см, если его максимальный КНД равен $D_0 = 3{,}7$.

7.10. Во сколько раз ширина ДН открытого конца круглого волновода на уровне 0,5 по мощности в плоскости H больше ширины луча на том же уровне в плоскости E?

7.11. Максимальный КНД открытого конца круглого волновода $D_0 = 5$. Определить ширину ДН (в радианах) на уровне 0,5 по мощности в плоскостях H и E.

7.12. Ширина ДН открытого конца круглого волновода на уровне 0,5 по мощности в плоскости H равна $2\theta^H_{0,5} = 1{,}75$ рад. Определить максимальный КНД антенны и ширину ее ДН на указанном уровне в плоскости E.

7.13. Прямоугольная апертура с размерами $a \times b = 30 \times 150$ см излучает на волне длиной 3 см. Распределение фазы поля в пределах апертуры постоянное, а амплитуда поля постоянна вдоль размера b, а вдоль размера a изменяется по косинусоидальному закону от максимума в середине до нуля на краях. Определить эффективную поверхность и максимальный КНД апертуры.

Рупорные антенны

7.14. Определить максимальный КНД H-плоскостного секториального рупора оптимальных размеров, который, имея $a_р = 60$ см и $b_р = 6{,}4$ см, принимает волны длиной $\lambda = 20$ см.

7.15. Определить в плоскостях E и H ширину ДН (в радианах) H-плоскостного секториального рупора оптимальных размеров ($a_р = 60$ см, $b_р = 6{,}4$ см), который принимает волны длиной $\lambda = 20$ см.

7.16. Определить оптимальные размеры H-плоскостного секториального рупора, имеющего на волне длиной 10 см максимальный КНД, равный 20.

7.17. Определить оптимальные размеры прямоугольного H-плоскостного секториального рупора, максимальный КНД которого на волне длиной 3 см равен 30.

7.18. Определить ширину ДН (в радианах) в H- и E-плоскостях и максимальный КНД оптимального H-плоскостного секториального рупора, возбуждаемого прямоугольным волноводом на волне длиной $\lambda = 3{,}2$ см. Длина рупора $L^H_{опт} = 25$ см. Размеры горловины рупора: $a = 2{,}3$ см, $b = 1$ см.