

Семинар № 9. Расчет линзовых антенн

Линзовая антенна состоит из электромагнитной линзы и облучателя. Линза представляет собой радиопрозрачную среду, в которой электромагнитная волна движется с определенной фазовой скоростью V_ϕ . Если фазовая скорость волны в линзе меньше скорости света в вакууме ($V_\phi < c$) и коэффициент замедления волны $p = \frac{c}{V_\phi} > 1$, то такая линза называется замедляющей. Если же $V_\phi > c$ и $p < 1$, то линза называется ускоряющей. К облучателям линзовых антенн предъявляются те же требования, что и к облучателям зеркальных антенн.

На рис.1 схематически показаны основные разновидности линзовых антенн: с ускоряющей линзой и с замедляющей линзой. В обоих случаях облучатель располагается в фокусе F линзы. Поверхность линзы, обращенная к облучателю, называется ее раскрывом, ось z , проходящая через фокус и центр раскрыва линзы O - осью линзы. Точка O носит название вершины линзы, а линия AOB - профиля линзы. Величина $FO = f$ - фокусное расстояние линзы.

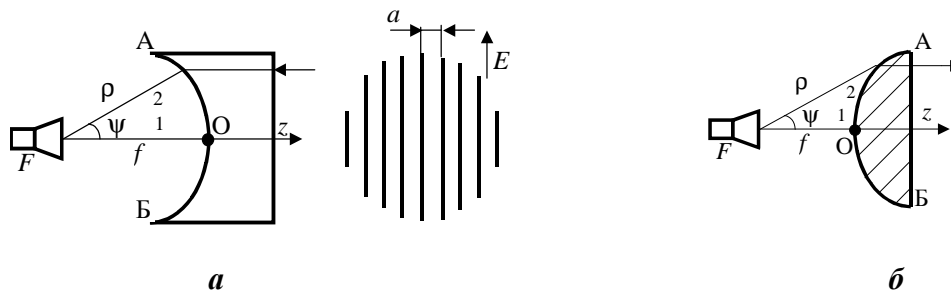


Рис.1. Основные разновидности линзовых антенн:
а - с ускоряющей линзой; б - с замедляющей линзой

Назначение линзы состоит в преобразовании сферической либо цилиндрической волны облучателя в плоский фронт волны в ее раскрыве.

Выравнивание фазового фронта волны облучателя происходит вследствие того, что различные его участки проходят в линзе неодинаковый путь. Так, в ускоряющей линзе (рис.1,а) периферийная часть фронта волны проходит наибольший путь, а центральная часть фронта (вдоль оси z) - наименьший. Поэтому профиль ускоряющей линзы является вогнутым. В замедляющей линзе (рис.1,б) выравнивание фазового фронта волны обусловлено замедлением центральной его части, которая проходит в линзе наибольший путь. Вследствие этого профиль линзы является выпуклым.

С точки зрения геометрической оптики на поверхности, определяемой профилем линзы, происходит преломление лучей, выходящих из точки F . Следовательно, профиль линзы должен обеспечить условие параллельности преломленных лучей оси линзы.

Для получения уравнений профиля линз необходимо приравнять фазовые набегии двух характерных лучей: центрального и направленного под углом ψ - к оси линзы [1]. В результате получается уравнение профиля ускоряющей линзы:

$$\rho = \frac{(1-p)f}{1-p \cos \psi}, \quad p < 1, \quad (1)$$

и замедляющей линзы

$$\rho = \frac{(p-1)f}{p \cos \psi - 1}, \quad p > 1. \quad (2)$$

Уравнение (1) является уравнением эллипса в полярной системе координат (ρ, ψ) , а (2) - уравнением гиперболы.

Рассмотрим особенности замедляющих линз. Линзы выполняются из высокочастотного диэлектрика с малыми потерями: полистирола ($\epsilon = 2,56$), фторопласта ($\epsilon = 2,1$) и др. Коэффициент замедления таких линз равен $p = \sqrt{\epsilon}$ и не зависит от частоты. Существенным недостатком замедляющих линз является высокая стоимость диэлектрика и большой удельный вес линзы. Поэтому наряду с линзами из обычного диэлектрика применяются линзы из искусственного диэлектрика, представляющего собой совокупность металлических включений в форме шариков, дисков или полос, распределенных в пенном полистироле [2]. Величина коэффициента замедления таких линз составляет $1,4 \div 1,6$.

Ускоряющие линзы представляют собой набор из тонких параллельных металлических пластин, образующих вогнутую поверхность (см. рис.1,а). Коэффициент замедления таких линз определяется по формуле

$$p = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \quad (3)$$

и лежит в пределах $0 \div 0,866$. Обычно выбирают $p \cong 0,51$, что соответствует середине диапазона.

Металлопластинчатые линзы являются узкополосными (полоса частот составляет $2 \div 3\%$), поскольку p зависит от частоты. Кроме того, толщина линзы оказывается значительной, что приводит к увеличению габаритов и веса антенны.

Для устранения указанных недостатков применяют зонирование. Суть его состоит в том, что толщина линзы ступенчато уменьшается, как показано на рис.2.

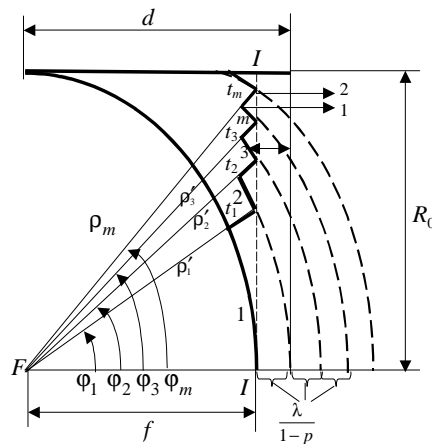


Рис.2. Схема зонирования ускоряющей линзы

Глубина каждой ступеньки t_m выбирается из условия, чтобы скачок фазы за счет сокращения пути луча в линзе от каждой ступеньки был равен 2π . В этом случае синфазность поля в сечении 1-1 сохраняется. Иными словами, разность фаз лучей 2 и 1 в области линзы должна удовлетворять условию

$$kt_m - kpt_m \cos \psi_m = 2\pi,$$

откуда

$$t_m = \frac{\lambda}{1 - p \cos \psi_m}. \quad (4)$$

Каждый однородный участок линзы называется зоной. Зона 1 является центральной; она сохраняет профиль первоначальной линзы. Уравнение профилей остальных линз находится из условия баланса фаз:

$$\rho_m = \frac{(1-p)f + \lambda(m-1)}{1 - p \cos \psi_m}, \quad (5)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ и соответствует номеру зоны.

Уравнение (5) определяет семейство эллипсов с фокусами в точке F . Каждый эллипс имеет свое фокусное расстояние f_m , определяемое формулой (5), в которой $\psi_m = 0$:

$$f_m = p_m|_{\psi_m=0} = f + \frac{\lambda(m-1)}{1-p}. \quad (6)$$

На рис.2 пунктирными кривыми показано семейство эллипсов, причем их фокусные расстояния в соответствии с формулой (6) отличаются на величину $\lambda/(1-p)$.

При $m = 1$ (что соответствует центральной зоне) формулы (5) и (6) определяют соответственно профиль и фокусное расстояние первоначальной ускоряющей линзы.

Определим углы ψ_m , при которых осуществляется зонирование. Эти углы выбираются из условия, чтобы оставшаяся толщина линзы s , обычно равная $2a$, при зонировании не изменялась. Из геометрических построений следует, что

$$(\rho_m + t_m) \cos \psi_m = f. \quad (7)$$

Подстановкой в (7) выражения для ρ_m и t_m находится расчетное соотношение для углов зонирования:

$$\cos \psi_m = \frac{f}{f + m\lambda}, \text{ или } \psi_m = \arccos \frac{f}{f + m\lambda}. \quad (8)$$

Проекция выступов на плоскость раскрыва линзы образуют затененные или вредные зоны - необлучаемые участки линзы. Наличие вредных зон, имеющих кольцеобразную форму, приводит к снижению коэффициента использования поверхности антенны и повышению уровня боковых лепестков.

Пример 1. Определить толщину d диэлектрической линзы из полистирола ($p = 1,6$). Диаметр линзы $2R_0 = 120$ см, $f = 120$ см (рис.3).

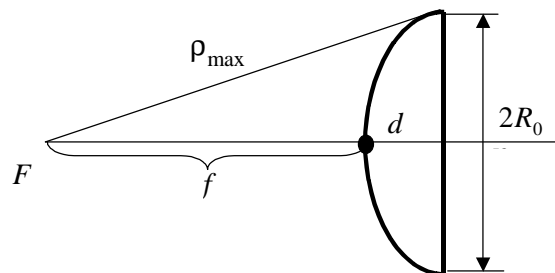


Рис.3. К расчету толщины замедляющей линзы

Решение. Из условия баланса фаз для центрального и крайнего лучей составим уравнение:

$$k\rho_{\max} = fk + kpd.$$

С другой стороны, из геометрических соображений легко получить

$$\rho_{\max}^2 = R_0^2 + (f + d)^2.$$

Решая совместно указанные уравнения, находим выражение для d :

$$d = \pm \frac{f}{p+1} \pm \sqrt{\frac{f^2}{(p+1)^2} \mp \frac{R_0^2}{p^2 - 1}}. \quad (9)$$

Подставляя в формулу (9) исходные данные, находим $d \cong 20$ см. Верхние знаки перед первым слагаемым и под знаком корня соответствуют ускоряющей линзе.

Пример 2. Провести расчет замедляющей полистироловой линзы ($p = 1,6$), поставленной в раскрыв H -секториального рупора, обеспечивающего $D_0 = 20$ см (см. семинар по рупорным антеннам). Оценить преимущества установки линзы.

Решение. Рассчитанный H -секториальный оптимальный рупор имеет следующие размеры: $D_1 = 73$ см, $D_2 = 3,4$ см, $R_p = 178$ см. Выберем фокусное расстояние линзы $f \cong \frac{R_p}{3 \div 5}$, что следует из практических рекомендаций. Пусть $f = 50$ см. Воспользовавшись формулой (9) и приняв в ней $R_0 = 36,5$ см, найдем $d = 16,7$ см. В результате получим антенну, схематично представленную на рис.4.

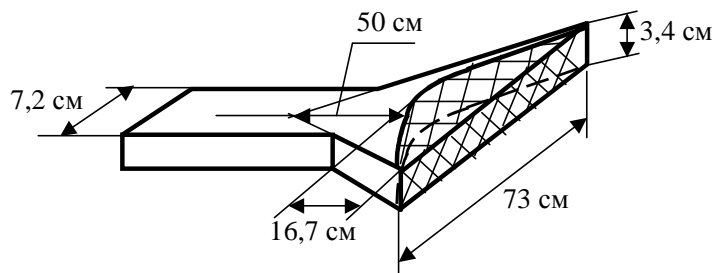


Рис.4. H -секториальный рупор с замедляющей линзой в раскрыве

Таким образом, по сравнению с исходным рупором длина рупора с линзой сократилась примерно в 3 раза. Кроме того, установка линзы в раскрыв рупора приводит к повышению D_0 , поскольку поле в раскрыве стало синфазным. Выигрыш в КНД составит

$$\frac{0,81}{0,64} = 1,27 \text{ раз.}$$

Пример 3. Определить толщину ускоряющей металлопластинчатой линзы (см. рис.2), имеющей размеры $a = 5,5$ см, $f = 2R_0 = 180$ см при $\lambda = 10$ см, и произвести ее зонирование.

Решение. 1. По формуле (3) находим $p = \sqrt{1 - (10/11)^2} = 0,42$.

2. По формуле (9) получаем $d = 64,9$ см.

3. Определяем максимальный угол раскрыва линзы:

$$\psi_{\max} = \text{arctg } R_0 / (f - d) = \text{arctg } 90 / 115 = 38,05^\circ.$$

4. По формуле (8) находим углы зонирования ψ_m и число зон m .

5. По найденным значениям ψ_m с помощью формулы (4) определяем глубину ступенек. Данные расчетов оформляем в виде таблицы:

m	1	2	3
	4		
ψ_m , град	18,7	28,8	31,1
t_m , см	16,6	15,8	15,6
	15,2		

6. По формуле (5) находим профиль каждой из зон и отображаем графически.

Задание 1. Произвести расчет линзы из полистирола, установленной в раскрыве E -секториального оптимального рупора, обеспечивающего $D_0 = 20$ (см. семинар по рупорным антеннам).

Задание 2. Каким должно быть расстояние a между пластинами ускоряющей линзы, чтобы $p = 0,5$ на частоте $f = 7,5$ ГГц?

Литература

1. *Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г.* Антенно-фидерные устройства. - М.: Сов. радио, 1974. - С. 287 - 303.
2. *Чистюхин В.В.* Антенно-фидерные устройства. - М.: МИЭТ, 1997. - С. 132 - 144.

Семинар № 10. Расчет антенн поверхностных волн

К антеннам поверхностных волн следует в первую очередь отнести спиральные и диэлектрические антенны.

Спиральная антенна представляет собой отрезок спирали из металлической проволоки либо ленты, вдоль которого распространяется замедленная (или поверхностная) бегущая волна (рис.1). Спираль с шагом S и диаметром D имеет длину витка L и угол намотки α . Общая длина спирали $l = nS$, где n - число витков. Возбуждающее устройство состоит из экрана диаметром $D_0 \geq \lambda/2$ и питающего фидера. Экран препятствует затеканию тока на внешнюю поверхность коаксиального фидера и выполняет роль рефлектора, ослабляющего излучение в заднюю полусферу.

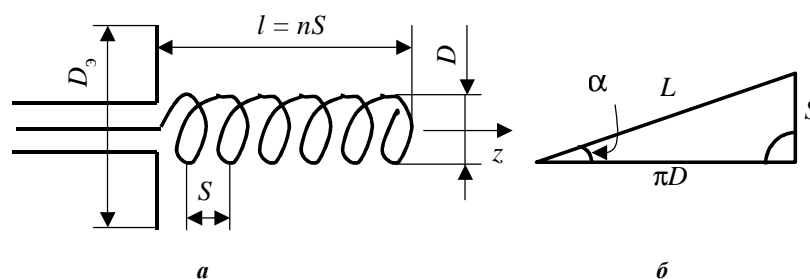


Рис.1. Цилиндрическая спиральная антенна (а) и развертка ее витка (б)

Вдоль витка проволоки распространяется бегущая волна тока с коэффициентом замедления p_i , а вдоль оси системы - замедленная бегущая волна с коэффициентом замедления p . Легко видеть, что $p = p_i / \sin \alpha$.

Направленные свойства спирали зависят от соотношения ее размеров и длины волны. С практической точки зрения представляет интерес режим осевого излучения, когда $L \cong \lambda$. В этом случае вдоль оси спирали распространяется волна T_i , а вдоль провода спирали возникает бегущая волна тока, коэффициент замедления которой в диапазоне длин волн $0,7 < \lambda/L < 1,3$ изменяется линейно, как показано на рис.2, т.е. в этом диапазоне частот длина волны тока $\Lambda_i = \lambda/p_i = \text{const}$. Максимум диаграммы направленности антенны ориентирован вдоль оси z , а поле имеет эллиптическую поляризацию [1].

Как показывают расчеты, один виток спирали обладает слабой направленностью. Обострение диаграммы обеспечивается совокупностью витков, т.е. спиральную антенну можно представить как линейную систему с осевым излучением. Число витков выбирается в пределах $3 < n < 12$. При $n < 3$ поле в антенне не успевает сформироваться, а при

$n > 12$ последующие витки уже не вносят вклад в излучение, поскольку ток в них исчезающе мал.

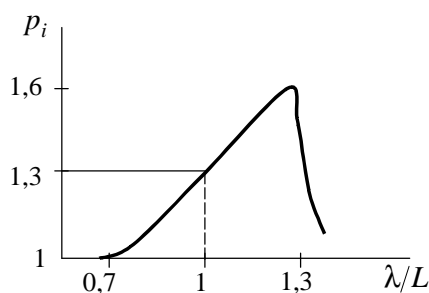


Рис.2. Частотная зависимость коэффициента замедления волны тока в проводе спирали

Существуют два режима осевого излучения: режим круговой поляризации и режим максимального КНД.

Рассмотрим режим круговой поляризации.

Сложение полей отдельных витков в дальней зоне вдоль оси имеет место при условии, что ток в каждом последующем витке отстает по фазе от тока в предыдущем витке на угол ϕ , определяемый выражением

$$\phi - kS = 2\pi. \quad (1)$$

В формуле (1) учтено, что поле от предыдущего витка на пути к последующему витку приобретает фазовый набег kS . С другой стороны, волна тока приобретает на одном витке фазовый набег

$$\phi = kp_i L. \quad (2)$$

Подставляя (2) в (1), находим

$$kpL = kS + 2\pi \quad \text{или} \quad pL = S + \lambda. \quad (3)$$

Из формулы (3) легко получить угол намотки спирали, соответствующий режиму круговой поляризации:

$$p_i = \frac{S + \lambda}{L} = \frac{S}{L} + \frac{\lambda}{L} = \sin \alpha + \frac{\lambda}{L}. \quad (4)$$

Как правило, при $\frac{\lambda}{L} = 1$ $p_i \cong 1,3$, при этом $\sin \alpha = 1,3 - 1 = 0,3$, а $\alpha = 17^\circ$.

В режиме максимального КНД (оптимальный режим) необходимо, чтобы первый и последний витки спирали излучали в противофазе, т.е. чтобы обеспечивалось равенство

$$\phi_n - nkS = 2\pi n + \pi. \quad (5)$$

Учитывая, что фазовый сдвиг последнего витка определяется как

$$\phi_n = kp_{i_{\text{опт}}} L, \quad (6)$$

из формул (5) и (6) легко получить

$$p_{i_{\text{опт}}} = \frac{S + \lambda + \frac{\lambda}{2n}}{L}. \quad (7)$$

Формула (7) позволяет определить оптимальный угол намотки спирали:

$$\sin \alpha_{\text{опт}} = \frac{p_{i_{\text{опт}}} - \frac{\lambda}{L}}{1 + \frac{\lambda}{2l}}, \text{ откуда } \alpha_{\text{опт}} \cong 12^\circ.$$

В режиме максимального КНД поле оси антенны поляризовано эллиптически, но близко к кругу ($\chi > 0,5$).

ДН спиральной антенны рассчитывается по формуле для линейной системы с осевым излучением

$$F(\theta) = f_b(\theta) f(\theta), \quad (8)$$

где $f_b(\theta)$ - ДН одного витка;

$$f(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{nk}{2}(pL - S \cos \theta)\right]}{n \sin\left[\frac{k}{2}(pL - S \cos \theta)\right]}$$

множитель направленности системы; $p = p_i / \sin \alpha$ - коэффициент замедления волны вдоль оси спирали.

Из формулы (8) следуют соотношения для расчета электрических параметров спиральной антенны (при $\alpha = 12 \div 17^\circ$):

$$\Delta\theta_{0,5} \cong 52 \frac{\lambda}{L} \sqrt{\frac{\lambda}{l}}; \quad D_0 = 15 \frac{l}{\lambda} \left(\frac{L}{\lambda}\right)^2; \quad Z_{\text{вх}} = 140 \frac{L}{\lambda}, \text{ [Ом]}. \quad (9)$$

Рабочий диапазон определяется из условия $0,7 < \lambda < 1,3L$. Диаметр экрана выбирается в пределах $(1,0 \div 1,6)l$.

Достоинствами спиральных антенн являются простота конструкции, широкая полоса рабочих частот ($\lambda_{\text{max}} / \lambda_{\text{min}} = 1,7$), недостатком - невозможность получения для одиночной спирали ширины ДН меньше 25° . Для обострения ДН применяют решетку из спиралей. Для получения сверхшироких рабочих полос частот ($\lambda_{\text{max}} / \lambda_{\text{min}} > 3$) применяют конические спиральные антенны. Широкополосность достигается за счет того, что работает та часть конической спирали, где выполняется условие $\lambda \cong L$.

Диэлектрическая антенна представляет собой диэлектрический стержень, выходящий из круглого волновода. Конструкция антенны показана на рис.3.

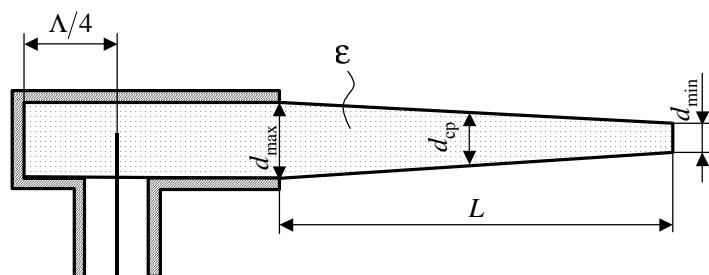


Рис.3. Конструкция стержневой диэлектрической антенны

Принцип работы антенны состоит в том, что вдоль стержня распространяется волна HE_{11} (основной тип), фазовая скорость которой зависит от ϵ , d , λ . Волна HE_{11} вызывает поляризацию диэлектрика. При этом поляризационные токи могут рассматриваться как элементарные излучатели, сдвинутые относительно друг друга по фазе, как в бегущей волне. Поле излучения всей антенны равно сумме полей излучения элементарных излучателей (как в линейной системе):

$$F(\theta) = f_1(\theta)f(\theta), \quad (10)$$

где $f(\theta) = \frac{\sin\left[\frac{kL}{2}(p - \cos\theta)\right]}{\frac{kL}{2}(p - \cos\theta)}$ - множитель направленности; L - длина стержня; p - коэффициент

замедления волны в стержне; $f_1(\theta)$ - ДН элементарного излучателя.

Зависимость $1/p$ от d/λ для различных ϵ представлена на рис.4.

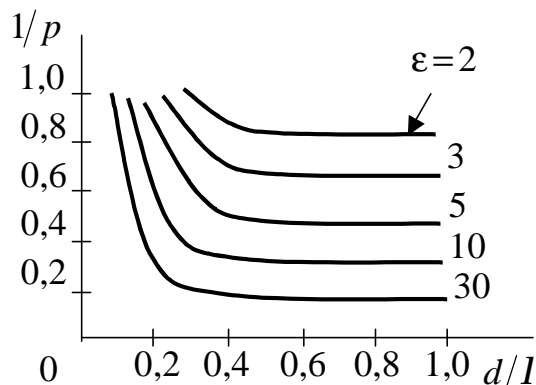


Рис.4. Частотная зависимость коэффициента замедления волны в стержне

Для уменьшения отражения от конца антенны стержень делают коническим, при этом

$$d_{\max} = \lambda\sqrt{\pi(\epsilon - 1)}, \quad d_{\min} = 0,63d_{\max}.$$

Порядок расчета диэлектрической антенны следующий:

- 1) задаются λ , ϵ ;
- 2) определяются d_{\min} и d_{\max} ;
- 3) по графику рис.4 находят p_{\min} и p_{\max} ;
- 4) определяется

$$p_{\text{опт}} = (p_{\max} + p_{\min})/2;$$

5) используя $p_{\text{опт}}$, определяющий оптимальную длину стержня, при которой обеспечивается максимум КНД, определяют

$$L_{\text{опт}} = \frac{\lambda}{2(p_{\text{опт}} - 1)}; \quad (11)$$

- б) определяют электрические параметры антенны из условий

$$\Delta\theta_{0,5}^{\circ} \cong 60^{\circ} \sqrt{\frac{\lambda}{L}}; \quad D_0 = (7 \div 8) \frac{L}{\lambda}. \quad (12)$$

Пример 1. Цилиндрическая спиральная антенна с углом намотки $\alpha = 14^{\circ}$ предназначена для работы в диапазоне $\lambda = 10 \div 15$ см. Определить диаметр витков D , при котором в спирали обеспечивается режим осевого излучения.

Решение. 1. Находим $\lambda_{\text{cp}} = (15 + 10)/2 = 12,5$ см.

2. В режиме осевого излучения $L = \lambda_{\text{cp}} = 12,5$ см.

3. Из развертки спирали (см. рис.1,б) имеем $\cos \alpha = \pi D/L$, откуда $D = \frac{L}{\pi} \cos \alpha = 3,8$ см.

Пример 2. Определить геометрические размеры цилиндрической спиральной антенны, обеспечивающей в режиме круговой поляризации $D_0 = 15$ на длине волны $\lambda = 15$ см.

Решение. 1. Задаемся $p_i = 1,3$ (в соответствии с рис.2).

2. Полагаем $L = \lambda = 15$ см.

3. По формуле (3) находим $S = p_i L - \lambda = 1,3 \cdot 15 - 15 = 4,5$ см.

4. Из развертки спирали находим

$$D = \frac{L}{\pi} \cos \alpha = \frac{15}{\pi} \cos 17^{\circ} = 4,6 \text{ см.}$$

5. По формуле (9) определяем

$$l = nS = \frac{D_0 \lambda}{15} \left(\frac{\lambda}{L} \right)^2 = \frac{15 \cdot 15}{15} = 15 \text{ см, откуда } n \cong 3.$$

Пример 3. Рассчитать относительную длину L/λ диэлектрической антенны из полистирола ($\epsilon = 2,6$) диаметром $d = 0,5\lambda$ и определить ее параметры излучения.

Решение. 1. По графику рис.4 находим $1/p = 0,7$, откуда $p_{\text{отт}} = 1,43$.

2. По формуле (11) определяем $L/\lambda = \frac{1}{2(p-1)} = 1,16$.

3. По формулам (12) получаем

$$\Delta\theta_{0,5}^{\circ} \cong 60^{\circ} \sqrt{\frac{1}{1,16}} = 55,7^{\circ}; \quad D_0 = 7,5 \frac{L}{\lambda} = 7,5 \times 1,16 = 8,7.$$

Задание 1. Определить геометрические размеры и параметры излучения цилиндрической спирали, обеспечивающей в оптимальном режиме $D_0 = 20$ на длине волны $\lambda = 10$ см.

Задание 2. Рассчитать оптимальную коническую диэлектрическую антенну из полистирола ($\epsilon = 2,6$), работающую на длине волны $\lambda = 7$ см.

Литература

1. *Драбкин А.Л., Зузенко В.Л., Кислов А.Г.* Антенно-фидерные устройства. - М.: Сов. радио, 1974. - С. 309 - 328; 393 - 399.

Семинар № 11. Проектирование линейной ФАР с заданным уровнем боковых лепестков

С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ УБЛ В ФАР ПРИМЕНЯЕТСЯ НЕРАВНОМЕРНОЕ АМПЛИТУДНОЕ ВОЗБУЖДЕНИЕ ТИПА “КОСИНУС НА ПЬЕДЕСТАЛЕ”:

$$I(z) = 1 + \Delta \cos(2\pi z/L), \quad |z| \leq L/2, \quad (1)$$

где $I(z)$ - амплитудное возбуждение вдоль антенны; z - текущая координата; Δ - параметр, определяющий относительное уменьшение возбуждения на краю антенны; L - геометрическая длина антенны.

Распределение для данного

ной зависимости $I(z)$ показано на рис.1.

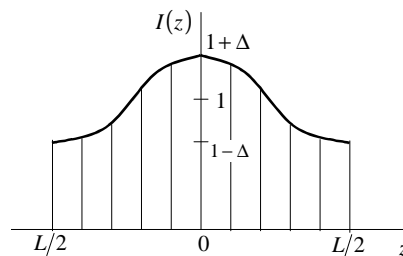


Рис.1. Амплитудное распределение ФАР типа “косинус на пьедестале”

Раскладывая косинус в сумму двух экспонент, приведем амплитудное распределение к сумме трех равномерных распределений с линейно меняющимися фазовыми сдвигами, являющихся членами ряда Фурье:

$$I(z) = \sum_{n=-1}^1 a_n e^{jn\xi kz}, \quad |z| \leq L/2,$$

где коэффициенты равны $a_0 = 1$, $a_1 = a_{-1} = \Delta/2$, а коэффициенты замедления $\xi = \lambda/L$.

Множитель направленности, соответствующий распределению (1), определяется суммой:

$$F(\theta) = \sum_{n=-1}^1 a_n \frac{\sin(\phi_0 - n\pi)}{\phi_0 - n\pi}, \quad (2)$$