

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.

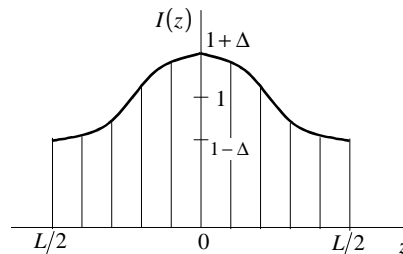


Рис.1. Амплитудное распределение ФАР типа “косинус на пьедестале”

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:

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

где $\phi_0 = 0,5kL \cos \theta$.

Метод, с помощью которого был получен множитель направленности (2), в теории антенн называется методом парциальных ДН. Согласно этому методу каждому члену ряда, представляющего амплитудно-фазовое распределение антенны, соответствует своя парциальная ДН. Суммирование трех парциальных ДН, входящих в (2), показано на рис.2 для случая $\Delta = 0,4$.

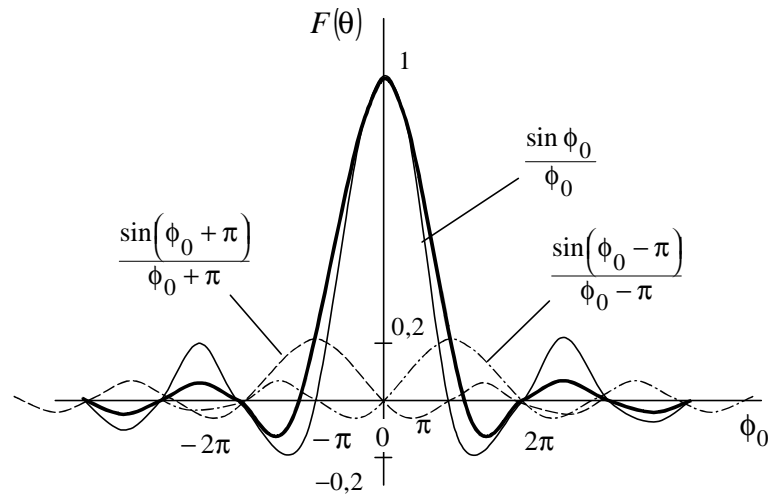


Рис.2. Снижение УБЛ при спадающем амплитудном распределении

Из рис.2 видно, что добавление к основной ДН вида $(\sin \phi_0)/\phi_0$ двух сдвинутых на $\pm \pi$ поправочных ДН с амплитудой $\Delta/2$ приводит к резкому уменьшению УБЛ, сопровождаемому некоторым расширением главного лепестка.

Изменяя значение Δ , можно снизить уровень наибольшего бокового лепестка (в дБ) до значений

$$t \approx -(13 + 13\Delta + 22\Delta^2). \quad (3)$$

При этом ширина луча по половинной мощности

$$\Delta\theta_{0,5} \approx (1 + 0,636\Delta^2) \cdot 51^\circ \lambda/L, \quad (4)$$

где множитель в скобках представляет собой так называемый коэффициент расширения луча.

Расширение главного лепестка приводит к снижению КНД с нижней оценкой

$$D = \frac{D_0}{1 + 0,5\Delta^2},$$

где D_0 - КНД антенны с равномерным амплитудным распределением.

Одной из ключевых задач при проектировании линейных (плоских) антенных решеток является грамотный (оптимальный) выбор межэлементного расстояния. Этим объясняется стремление разработчика максимально “растянуть” межэлементное расстояние, что однозначно минимизирует количество каналов (излучателей) и удешевляет проектируемую систему. Препятствием этому является возможность появления побочного дифракционного максимума в секторе обзора (сканирования).

При применении ненаправленных (изотропных) излучателей формула для расчета межэлементного расстояния имеет следующий вид:

$$d_{\max} \leq \frac{\lambda}{1 + \sin \theta_{\text{ск}}},$$

где $\theta_{\text{ск}}$ - предельный угол сканирования антенной решетки (угол θ отсчитывается от нормали к плоскости решетки); λ - длина волны.

Эта формула предполагает, что для выбранного межэлементного расстояния дифракционный максимум вообще не появится в “видимой” области.

Однако в случае применения направленных излучателей, что обычно имеет место на практике, формула для межэлементного расстояния трансформируется в следующую:

$$d_{\max} \leq \frac{\lambda}{\sin \theta_{\text{д}} + \sin \theta_{\text{ск}}}, \quad (5)$$

где $\theta_{\text{д}}$ - направление дифракционного максимума.

Применение этой формулы обусловлено теоремой перемножения в теории антенн, в соответствии с которой полная ДН антенной решетки есть произведение ДН одного элемента на множитель направленности решетки. В связи с этим становится справедливым следующее утверждение: если один элемент имеет незначительное излучение в направлении побочного максимума решетки, то последний окажется подавленным, как показано на рис.3.

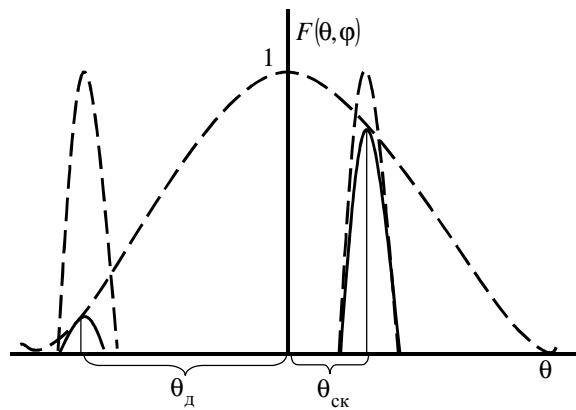


Рис.3. Влияние ДН элементов ФАР на уровень основного луча и дифракционного максимума

Формула (5) имеет очень важное значение при проектировании антенных решеток с малым сектором сканирования ($\theta_{ск} \leq 30^\circ \div 40^\circ$).

Пример 1. Выбрать вид амплитудно-фазового распределения для линейной антенной решетки с заданным уровнем максимального бокового излучения $t \leq -20; 25; 30$ дБ. Для каждого случая оценить коэффициент в формуле определения ширины луча по половинной мощности и коэффициент уменьшения КНД.

Решение. 1. Для решения поставленной задачи воспользуемся распределением (1) типа “косинус на пьедестале”

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

Значение Δ (уменьшение амплитуды возбуждения на краю антенны) определяем из выражения (3):

$$t \approx -\left(13 + 13\Delta + 22\Delta^2\right),$$

т.е.

$$22\Delta^2 + 13\Delta + 13 = 20; \quad 25; \quad 30.$$

Решая квадратное уравнение для каждого случая, находим

$$\Delta_1 = 0,34; \quad \Delta_2 = 0,5; \quad \Delta_3 = 0,63.$$

Соответствующие распределения имеют следующий вид:

$$I_1(z) = 1 + 0,34 \cos(2\pi z/L); \quad I_2(z) = 1 + 0,5 \cos(2\pi z/L); \\ I_3(z) = 1 + 0,63 \cos(2\pi z/L).$$

2. Для равноамплитудного распределения формула, определяющая ширину главного лепестка, имеет следующий вид:

$$\Delta\theta = \frac{A\lambda}{L}, \quad \text{где } A \approx 51^\circ.$$

Для определения коэффициента A в каждом случае воспользуемся формулой (4). Коэффициент A определяется как

$$A \approx (1 + 0,636\Delta^2) \cdot 51^\circ.$$

$$\text{ОТСЮДА } A_1 \approx 54,7^\circ; \quad A_2 \approx 59^\circ; \quad A_3 \approx 63,8^\circ.$$

3. Значение КНД может быть записано в виде

$$D = \beta D_0,$$

где $\beta \approx 1/(1 + 0,5\Delta^2)$. Тогда $\beta_1 \approx 0,945$; $\beta_2 \approx 0,89$; $\beta_3 \approx 0,84$.

Для других типов амплитудных распределений (например, “парабола на пьедестале”, “линейное спадающее к краям” и т.д.) значения Δ_i , A_i , β_i можно взять из таблиц, которые имеются в соответствующих справочниках по антенной технике.

Пример 2. Спроектировать антенную решетку с сектором сканирования $\Delta\theta_{\text{ск}} = \pm 30^\circ$ с максимальным уровнем боковых лепестков $t \leq -22$ дБ. Определить значения Δ , A , β и d_{max} . Считать, что ДН излучателя подчиняется закону $f(\theta) = \cos^\alpha(\theta)$.

Решение. 1. При проектировании АР предполагается, что ее усиление меняется в секторе сканирования на величину порядка -3 дБ, т.е. обычно падение усиления на краю сектора сканирования составляет эту величину. Учитывая, что усиление пропорционально квадрату амплитуды, а также то, что падение усиления всей АР на краю сектора сканирования определяется ДН излучателя, можно записать

$$f^2(\theta) = 0,5, \quad \text{т.е. } \cos^{2\alpha}(30^\circ) = 0,5.$$

Отсюда находим значение α :

$$\alpha = \frac{1}{2} \frac{\lg 0,5}{\lg(\cos 30^\circ)} \approx 2,5; \Rightarrow f(\theta) = \cos^{2,5}(\theta).$$

2. Воспользуемся формулой (5) для определения d_{\max} :

$$d_{\max} \leq \frac{\lambda}{\sin \theta_{\text{д}} + \sin \theta_{\text{ск}}}.$$

При определении $\theta_{\text{д}}$ вспомним, что при этом значении угла возникший дифракционный максимум должен “подавляться” ДН элемента до заданного уровня $t \approx -22$ дБ, что составляет по мощности величину порядка 0,006. Тогда можем записать

$$\cos^5(\theta_{\text{д}}) = 0,006; \Rightarrow \theta_{\text{д}} = \arccos(\sqrt[5]{0,006}) \approx 69^\circ.$$

Окончательно вычислим значение d_{\max} :

$$d_{\max} \leq \frac{\lambda}{\sin 69^\circ + \sin 30^\circ} \approx 0,7\lambda.$$

3. Значения Δ , A , β найдем по методике, приведенной в предыдущем примере:

$$\Delta \approx 0,41; \quad A \approx 56,4^\circ; \quad \beta \approx 0,92.$$

Допустим, что проектируется плоская решетка. Усиление элемента может быть оценено по формуле

$$g_0 = \frac{4\pi S_{\text{эф}}}{\lambda^2} = \frac{4\pi d_{\max}^2 \sigma}{\lambda^2}, \quad \text{где } \sigma \approx 0,7.$$

Тогда

$$g_0 = \frac{4\pi(0,7\lambda)^2 \cdot 0,7}{\lambda^2} \approx 4,3 \text{ ед.}$$

Задание 1. Спроектировать антенную решетку с сектором сканирования $\Delta\theta_{\text{ск}} = \pm 15^\circ$, с максимальным УБЛ $t \leq -18$ дБ. Определить значения Δ , A , β и d_{\max} . Считать, что ДН излучателя подчиняется закону $f(\theta) = \cos^\alpha(\theta)$.

Задание 2. Выбрать вид амплитудного распределения для линейной антенной решетки с заданным УБЛ $t \leq -17; -35$ дБ. Для каждого случая оценить коэффициент в формуле определения ширины луча по половинной мощности A_i и коэффициент уменьшения КНД β_i .

Литература

1. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ. - М.: Высшая школа, 1988. - С. 283 - 296; 292 - 298.
2. *Чистюхин В.В.* Антенно-фидерные устройства. - М.: МИЭТ, 1997. - С. 170 - 175.

Семинар № 12. Эффективность параболических зеркальных антенн

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПАРАБОЛИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ В ОСНОВНОМ ИХ КОЭФФИЦИЕНТОМ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ, КОТОРЫЙ В СВОЮ ОЧЕРЕДЬ МОЖЕТ БЫТЬ ОПРЕДЕЛЕН ФОРМУЛОЙ

$$D = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \sigma, \quad (1)$$

где S - площадь возбуждаемой поверхности; λ - рабочая длина волны; σ - суммарный коэффициент использования площади антенны.

Суммарный КИП антенны определяется через произведение всех коэффициентов, влияющих на эффективность работы ПЗА. Рассмотрим эти коэффициенты более подробно.

Апертурный коэффициент использования k_a . Рассмотрим раскрыв параболоида как излучающую поверхность. Во многих практических случаях распределение поля в раскрыве антенны может считаться синфазным и осесимметричным. Достаточно часто амплитуду поля можно аппроксимировать параболическим распределением с пьедесталом:

$$E(R) = 1 - \Delta(R/R_0)^2, \quad (2)$$

где R - текущий радиус-вектор от центра плоскости раскрыва антенны до любой точки плоскости раскрыва; R_0 - радиус плоскости раскрыва; Δ - уменьшение поля на краю раскрыва.

Для апертурного коэффициента использования антенны с параболическим распределением можно записать следующее выражение:

$$k_a = \frac{1 - \Delta + \frac{1}{4}\Delta^2}{1 - \Delta + \frac{1}{3}\Delta^2}. \quad (3)$$

Коэффициент перехвата k_0 . Обозначим полную мощность, излученную облучателем, через P_Σ , а мощность, попадающую на зеркало антенны, через P_Π . Тогда коэффициент

$$k_o = P_n / P_\Sigma$$

характеризует эффективность канализации энергии облучателя на зеркало антенны и называется коэффициентом перехвата. Для хорошо спроектированной ПЗА этот коэффициент имеет значение $k_o \approx 0,95$.

Затенение раскрыва антенны. Пусть часть раскрыва антенны затенена какими-либо предметами (облучатель, питающая фидерная линия, элементы крепления облучателя и т.д.). Обозначим через S_3 затененную часть раскрыва антенны. Будем считать, что поле на незатененной части раскрыва $S - S_3$ остается таким же, как если бы затенения не существовало, а поле на затененной части было бы равно нулю. Такое предположение достаточно точно, если характерные размеры затенения поверхности превосходят λ .

Обозначим через k_3 коэффициент, характеризующий уменьшение КНД антенны из-за затенения части ее раскрыва. Предполагая распределение поля в раскрыве антенны параболическим на пьедестале (см. формулу (2)), можно записать:

$$k_3 = \left(1 - \frac{\eta^2}{1 - \Delta/2}\right)^2, \quad (4)$$

где $\eta = R_{\text{обл}} / R_0$; $R_{\text{обл}}$ - характерный размер раскрыва облучателя.

Для оптимального облучения, когда поле на краю антенны составляет около 30% от поля в центре антенны, формула (4) приобретает вид:

$$k_3 = (1 - 1,5\eta^2)^2. \quad (5)$$

Рассмотрим теперь эффект затенения, даваемый линией питания, расположенной в раскрыве антенны. Обозначив ширину линии через t , можно записать (для $t \ll R_0$):

$$k_3 = \left(1 - \frac{t}{\pi R_0} \frac{1 - \Delta/3}{1 - \Delta/2}\right)^2. \quad (6)$$

Для случая оптимального возбуждения ($1 - \Delta \approx 0,3$) имеем:

$$k_3 = \left(1 - 0,37 \frac{t}{R_0}\right)^2. \quad (7)$$

Интерференция поля антенны и поля облучателя. При определении поля антенны в главном направлении обычно учитывается только излучение токов, текущих по поверхности параболоида. В ряде случаев, однако, необходимо учитывать также задний лепесток диаграммы облучателя. Интерференция этих двух полей приводит к изменению (увеличению или уменьшению) эффективности антенны. Коэффициент $k_{\text{инт}}$, учитывающий эту интерференцию, определяется равенством

$$k_{\text{инт}} = \left[1 + \sqrt{D_{\text{обл}}/D} \cdot F_{\text{обл}}(\pi) \cdot e^{j\phi} \right]^2, \quad (8)$$

где $D_{\text{обл}}$ и D - коэффициенты направленного действия облучателя и антенны соответственно; $F_{\text{обл}}(\pi)$ - уровень поля облучателя в заднем направлении; ϕ - угол сдвига фаз между полями антенны и облучателя.

Расчеты показывают, что для высоконаправленных антенн коэффициент $k_{\text{инт}}$ колеблется в зависимости от фазы ϕ в пределах $0,994 \div 1,006$. Однако в случае сравнительно слабонаправленных параболических антенн, встречающихся часто в метровом и дециметровом диапазонах волн, где к тому же применяются вибраторные облучатели с невысоким защитным действием, учет коэффициента $k_{\text{инт}}$ становится необходимым.

Фазовый фронт облучателя (точность установки облучателя по фокальной оси). В раскрыве антенны волна будет плоской, если фазовый фронт облучателя является точно сферическим и фазовый центр облучателя совмещен с фокусом параболоида. На практике, однако, фронт волны облучателя вблизи поверхности зеркала часто существенно отличается от сферического и, кроме того, возможна неточность в установке облучателя. Все это приводит к ухудшению эффективности антенны.

Если принять максимально допустимую величину искажения фазы в раскрыве равной $\pi/8$, точность установки облучателя по фокальной оси определяется неравенством

$$|\Delta f| < \frac{\lambda}{32 \sin^2(\phi_0/2)}, \quad (9)$$

где ϕ_0 - угол между фокальной осью и прямой, проведенной из фокуса к кромке параболоида.

Из (9) видно, что необходимая точность установки облучателя уменьшается с ростом фокусного расстояния. В случае короткофокусных антенн необходимая точность установ-

ки облучателя весьма высока. Так, при $2\phi_0 = 180^\circ$ облучатель должен быть установлен с точностью $\pm \lambda/16$. Поэтому целесообразно при разработке антенны обеспечить возможность перемещения облучателя вдоль оси, что дает возможность экспериментальным путем выбрать оптимальное место установки.

Точность обработки поверхности антенны. Отклонения формы поверхности зеркала от параболической приводят к нарушению синфазности поля в раскрыве антенны и ухудшают ее эффективность. Требования к точности выполнения поверхности зеркала можно получить, исходя из необходимой точности обеспечения синфазности поля в раскрыве. Обычно считают достаточным обеспечить синфазность возбуждения раскрыва с точностью $\pm \pi/8$. При этом потери коэффициента усиления антенны не превосходят нескольких процентов.

Если распределение фазы в раскрыве антенны можно считать случайной величиной, то потери коэффициента усиления антенны определяются формулой

$$k_{\text{нт}} = e^{-\tilde{\phi}^2},$$

где $\tilde{\phi}$ - среднеквадратическое отклонение фазы в раскрыве от ее среднего значения.

Для длиннофокусных антенн, когда можно считать, что $\cos(\phi_0/2) \approx 1$, получаем:

$$k_{\text{нт}} = e^{-(4\pi\tilde{\delta}_n/\lambda)^2} = e^{-158(\tilde{\delta}_n/\lambda)^2}, \quad (10)$$

где $\tilde{\delta}_n$ - среднеквадратическое отклонение поверхности от расчетной. Фазу поля в раскрыве (или распределение отклонений зеркала) при анализе обычно считают распределенной по нормальному закону. Поэтому допуск на точность изготовления поверхности зеркала $\delta_{\text{доп}}$ связан со среднеквадратическим отклонением соотношением $\delta_{\text{доп}} = 2,6\tilde{\delta}$. При этом из условия $|\phi| < \pi/8$ получаем:

$$|\tilde{\delta}_n| < \frac{\lambda}{32 \cos(\phi_0/2)}. \quad (11)$$

Эффективность параболической антенны. В реальных условиях при расчете коэффициента направленного действия антенны необходимо учитывать не только распределе-

ние поля в раскрыве антенны и утечку энергии облучателя за края зеркала, но и ряд других факторов, влияющих на эффективность антенны. Если коэффициенты k_3 , $k_{\text{инт}}$, k_o , $k_{\text{нт}}$ мало отличаются от единицы, коэффициент использования поверхности антенны может быть определен по формуле

$$\sigma = k_a k_o k_3 k_{\text{инт}} k_{\text{нт}}. \quad (12)$$

В силу рассмотренных причин полный коэффициент использования параболической антенны с обычным, например, рупорным облучателем на практике не превосходит $0,5 \div 0,6$. Коэффициент использования может быть увеличен до $0,65 \div 0,7$ и более путем применения специальных облучателей с ДН, близкой к столообразной.

Пример. Спроектировать параболическую зеркальную антенну с коэффициентом усиления $G = 40$ дБ на частоте $f = 10$ ГГц с уровнем боковых лепестков, не превышающих -22 дБ. Считать распределение поля по раскрыву параболическим. Величина фокуса параболы равна его радиусу ($F = R_0$).

Решение. 1. Оценим размер раскрыва параболы, исходя из того, что $G \approx D$ и ориентировочно суммарный КИП $\sigma = 0,7$ (см. формулу (1)):

$$G = D = 10000 \text{ ед.} \quad G = \frac{4\pi S}{\lambda^2} \sigma,$$

отсюда

$$S = \frac{\lambda^2}{4\pi} \frac{G}{\sigma} \approx 10200 \text{ см}^2,$$

тогда $R_0 \approx 57$ см.

2. Используя формулу для параболического распределения поля по раскрыву $E(R) = 1 - \Delta(R/R_0)^2$ из табл. 5.1, [1, с. 113] найдем значение $\Delta \approx 0,65$.

3. Параболическая антенна - длиннофокусная, тогда

$$\text{tg}(\phi_0/2) = R_0/2F = 0,5,$$

отсюда $\phi_0 \approx 53^\circ$.

4. По формуле (3) рассчитаем апертурный КИП антенны:

$$k_a = \frac{1 - 0,66 + \frac{0,435}{4}}{1 - 0,66 + \frac{0,435}{3}} \approx 0,92.$$

5. Значение коэффициента перехвата k_0 примем равным 0,95.

6. При заданном УБЛ примем $R_{\text{обл}} \approx 2\lambda$, тогда

$$\eta = R_{\text{обл}}/R_0 \approx 0,15; \quad k'_3 = (1 - 1,5\eta^2)^2 \approx 0,93.$$

Предположим, что имеется волновод, питающий облучатель, шириной $t = \lambda$ и три тяги шириной $t = \lambda/2$:

$$k''_3 = (1 - 0,37\lambda/R_0)^2 \approx 0,945; \quad k'''_3 = (1 - 0,37\lambda/2R_0)^2 \approx 0,97;$$

$$k_3 = k'_3 k''_3 (k'''_3)^3 \approx 0,8.$$

Здесь использованы формулы (4) - (7).

7. Для вычисления $k_{\text{инт}}$ по формуле (8) потребуем, чтобы уровень заднего облучения не превышал значения $F_{\text{обл}}(\pi) \leq -20$ дБ. Тогда

$$k_{\text{инт}} = \left[1 \pm 0,01\sqrt{18/10^4} \right]^2 = \frac{1,0008}{0,9992} \approx 1.$$

8. Прежде чем рассчитывать коэффициент $k_{\text{нт}}$, оценим необходимую точность выполнения нашей параболы по формуле (11):

$$\delta_n < \frac{\lambda}{32 \cos(\phi_0/2)}.$$

Из формулы видно, что вблизи центра параболоида ($\phi = 0$) необходимая точность выполнения зеркала максимальна:

$$\delta_n \approx \pm \lambda/32 \approx \pm 0,093 \text{ мм.}$$

На краю параболы $\delta_n \approx \pm 1,05$ мм. С учетом этих значений и соотношения $\delta_n \approx 2,6\tilde{\delta}_n$, используя формулу (10), получим:

$$k_{\text{нт}} = e^{-158(\tilde{\delta}_n/\lambda)^2} = e^{-158(1/2,6 \cdot 30)^2} = e^{-0,026} = 0,97.$$

9. Окончательно суммарный КИП проектируемой ПЗА равен:

$$\sigma = k_a k_o k_3 k_{\text{инт}} k_{\text{нт}} \approx 0,68.$$

10. Площадь раскрыва зеркала:

$$S = \pi R_0^2 = \frac{G\lambda^2}{12,56 \cdot 0,6} = \frac{10^4 \cdot 9}{7,54} \approx 1,2 \cdot 10^4 \text{ см}^2; \quad R_0 \approx 60 \text{ см}.$$

11. Для определения ширины луча проектируемой ПЗА воспользуемся табл. 5.1, [1, с. 113]:

$$\Delta\theta_{0,5} \approx \frac{65^\circ \lambda}{D} = 1,625^\circ.$$

Задание. Спроектировать и оценить точность изготовления параболической зеркальной антенны с коэффициентом усиления $G = 27$ дБ на частоте $f = 3$ ГГц с уровнем боковых лепестков, не превышающим 25 дБ. Считать распределение поля по раскрыву параболическим. Величина фокуса параболы равна $F = R_0/2$.

Литература

1. *Кочержевский Г.Н., Ерохин Г.А. Козырев Н.Д.* Антенно-фидерные устройства. - М.: Радио и связь, 1989. - С. 133.
2. *Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г.* Антенны УКВ. - М: Связь, 1977. - Т. 1. - С. 325 - 326.