

5186 (51E6) Устройства сверхвысоких частот и антенны

Лекция №3 Общие сведения и типы антенн с плоским излучающим раскрывом.

- 1. Методы расчёта полей излучения апертурных антенн. Применение законов геометрической оптики в теории апертурных антенн.*
- 2. Поле излучения плоского раскрыва и его электрические параметры.*
- 3. Влияние поля в раскрыве антенны на её направленные свойства.*

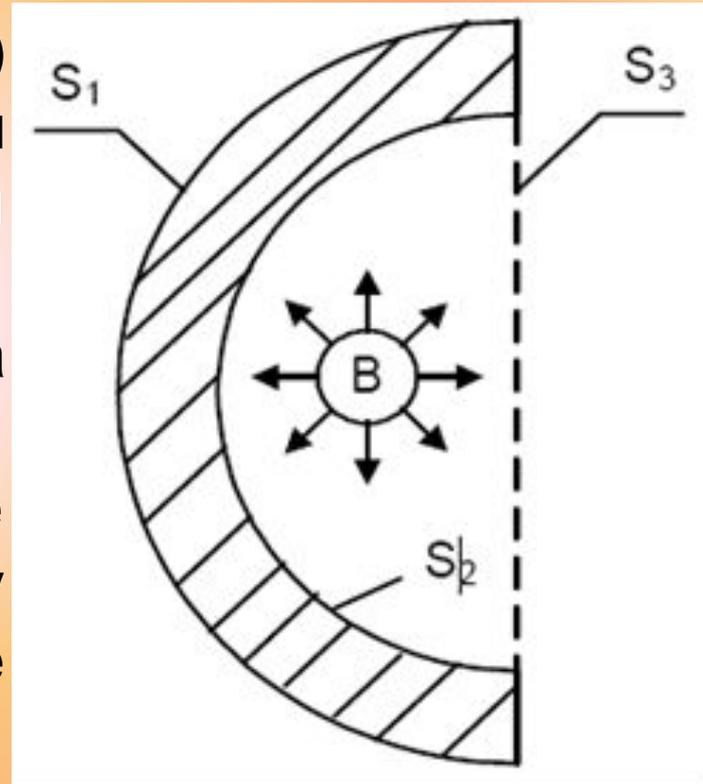
Апертурные антенны (антенны с плоским излучающим раскрытием) – это антенны, у которых излучение (или приём) электромагнитной энергии осуществляется через некоторую воображаемую поверхность (апертуру) антенны, представляемую в виде плоскости, размеры которой обычно много больше длины волны.

Различают следующие типы апертурных антенн:

- рупорные (акустического типа);
- зеркальные (оптического типа);
- линзовые (оптического типа);
- открытые концы волноводов;
- антенны поверхностных волн (АПВ).

1. Методы расчета полей излучения апертурных антенн. Применение законов геометрической оптики в теории апертурных антенн

В общем случае апертурная антенна представляет собой металлическое тело с внешней (S_1) и внутренней (S_2) поверхностями. Первичным источником электромагнитных волн является некоторый возбудитель B (рис. 1). На поверхностях S_1 и S_2 за счёт поля излучения возбудителя наводятся высокочастотные поверхностные токи, поэтому электромагнитное поле в дальней зоне представляет собой сумму полей самого возбудителя и полей, переизлучаемых поверхностями S_1 и S_2 .



Существует два метода нахождения поля излучения апертурной антенны:

- 1) метод поверхностных токов;
- 2) апертурный метод.

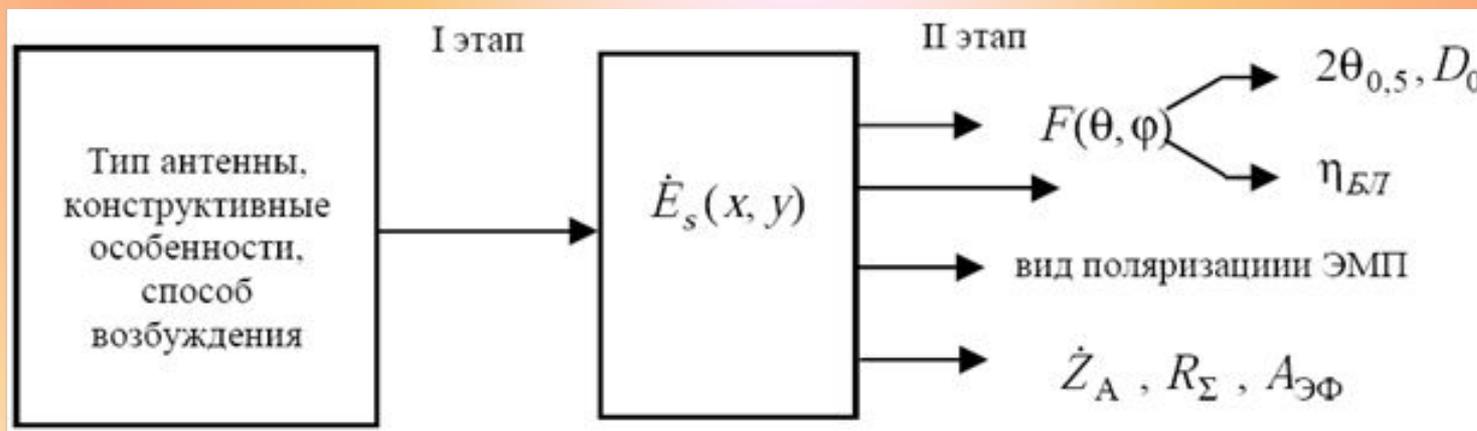
В первом методе задача определения поля излучения решается в два этапа. На первом этапе по известному типу антенны, её геометрическим параметрам и способу возбуждения решается так называемая внутренняя задача теории антенн, т.е. находится распределение поверхностных токов на S_1 и S_2 .

При этом полагают, что поверхности S_1 и S_2 состоят из множества элементарных вибраторов (вибраторов Герца). На втором этапе решается так называемая внешняя задача теории антенн, т.е., используя найденное распределение токов на поверхностях S_1 и S_2 , производится интегрирование этих токов.

Этот метод даёт точный результат, но из-за большого количества вибраторов Герца на поверхностях S_1 и S_2 он является очень сложным

Второй метод – апертурный, основан на принципе Гюйгенса–Френеля: поле в раскрыве, являясь источником излучения, полностью определяет характеристики поля в дальней зоне.

Задача определения поля излучения также решается в два этапа. На первом этапе по известному типу антенны, её геометрическим параметрам и способу возбуждения решается так называемая внутренняя задача теории антенн, т.е. находится распределение амплитуды и фазы поля $\dot{E}_s(x, y)$ в апертуре антенны (на поверхности S_3). При этом полагают, что поверхность S_3 состоит из множества элементарных поверхностных излучателей (элементов Гюйгенса). На втором этапе решается так называемая внешняя задача теории антенн, т.е., используя найденное амплитудно-фазовое распределение поля в апертуре, производится его интегрирование.



Применение законов геометрической оптики в теории апертурных антенн

Принцип Ферма - луч так ориентирован в пространстве, что на прохождение пути между двумя точками вдоль луча ЭМВ затрачивает наименьшее время.

Следствием принципа Ферма являются:

- законы Снеллиуса, описывающие волновые процессы при отражении и преломлении ЭМВ на границе раздела двух сред;
- закон равенства оптических длин путей: между двумя эквифазными поверхностями оптическая длина пути одинакова для любого луча.

Фазу ЭМВ, прошедшей в данной среде путь L от точки A до B можно определить, как произведение волнового числа на пройденный волной путь L :

$$\Psi_{AB} = \frac{2\pi}{\Lambda} \int_A^B n dl = \frac{2\pi}{\Lambda} L. \quad \leftarrow \quad k = \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad \Lambda = \frac{\lambda}{n}, \quad n = \frac{c}{V_\phi}.$$

Расчёт амплитудного распределения поля в раскрыве выполняют, используя закон сохранения энергии. При этом полагают, что электромагнитная энергия, заключённая в трубке лучей, остаётся неизменной при любых преобразованиях трубки.

$$\Pi_1 dS_1 = \Pi_2 dS_2 \quad \longrightarrow \quad \Pi = \frac{E^2}{240\pi}, \text{ а } dP = \Pi dS, \quad \longrightarrow \quad E_B = \sqrt{240\pi \frac{dP}{dS_2}},$$

Определяем напряжённость поля в любой точке, в том числе и на раскрыве

2. Поле излучения плоского раскрыва и его электрические параметры

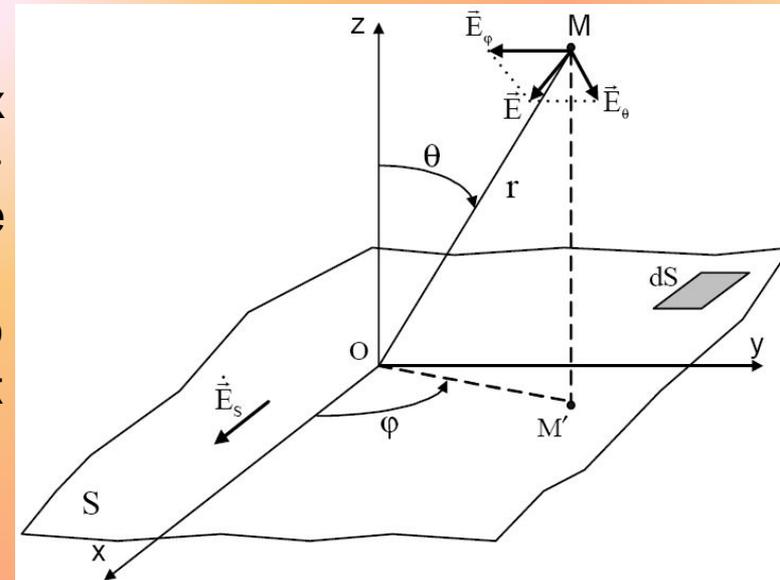
Будем считать, что амплитудно-фазовое распределение поля по раскрыву E_S известно, поляризация линейная, причём вектор E_S всюду параллелен оси OX . Выберем на раскрыве прямоугольную площадку $dS = dx dy$.

$$d\dot{E}_\theta = j \frac{\dot{E}_S}{\lambda r'} e^{-jkr'} \frac{1 + \cos \theta'}{2} \cos \varphi' dS;$$
$$d\dot{E}_\theta = -j \frac{\dot{E}_S}{\lambda r'} e^{-jkr'} \frac{1 + \cos \theta'}{2} \sin \varphi' dS.$$

(1)

r' , θ' , φ' – координаты точки M при условии, что начало системы координат находится в центре площадки.

Можно считать, что для амплитудных множителей $r' = r_0$, $\theta' = \theta$, $\varphi' = \varphi$, где r_0 , θ , φ – координаты точки M в сферической системе координат, центр которой располагается в геометрическом центре раскрыва. Для фазового множителя e^{-jkr} равенство $r' = r_0$ недопустимо, так как этот множитель определяет фазу поля излучения каждого элемента Гюйгенса в точке M .



Результирующие составляющие поля в дальней зоне, создаваемые всем раскрытием, определяются путём интегрирования

$$\begin{aligned} \dot{E}_\theta &= j \frac{1 + \cos \theta}{2\lambda r_0} \cos \varphi \int_S \dot{E}_S e^{-jkr'} dS; \\ \dot{E}_\varphi &= -j \frac{1 + \cos \theta}{2\lambda r_0} \sin \varphi \int_S \dot{E}_S e^{-jkr'} dS. \end{aligned} \quad (2)$$

Из выражений (2) следует:

- поле в дальней зоне находится как прямое преобразование Фурье от амплитудно-фазового распределения поля в раскрытии антенны;
- на значение напряжённости поля в дальней зоне влияют форма и размеры раскрытия антенны, отнесённые к длине волны.

Диаграмма направленности

Амплитуда поля $E = \sqrt{E_\theta^2 + E_\varphi^2}$, (3) 

$$\begin{aligned} E_\theta &= |\dot{E}_\theta| = \frac{1 + \cos \theta}{2\lambda r_0} \cos \varphi \left| \int_S \dot{E}_S e^{-jkr'} dS \right|; \\ E_\varphi &= |\dot{E}_\varphi| = \frac{1 + \cos \theta}{2\lambda r_0} \sin \varphi \left| \int_S \dot{E}_S e^{-jkr'} dS \right|. \end{aligned} \quad (4)$$

$$E(\theta, \varphi) = \frac{1 + \cos \theta}{2\lambda r_0} \left| \int_S \dot{E}_S e^{-jkr'} dS \right|. \quad (5) \quad \xrightarrow{\text{blue arrow}} \quad F(\theta, \varphi) = F(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \left| \int_S \dot{E}_S e^{-jkr'} dS \right|. \quad (6)$$

- ДН зависит только от угла θ ;

- выражение (6) представляет собой запись теоремы перемножения, первый сомножитель его определяет собой ДН одиночного элемента (элементарного излучателя Гюйгенса), а второй сомножитель – это множитель непрерывной плоской антенной решётки.

Коэффициент направленного действия

$$D_0 = \frac{\Pi_{\max}}{\Pi_{\Theta}}, \quad (7)$$

$$\Pi_{\max} = \frac{E_{\max}^2}{240\pi}. \quad (8)$$

из (5)

$\theta = 0^\circ$

$$E_{\max} = E(\theta = 0^\circ) = \frac{1}{\lambda r_0} \left| \int_S \dot{E}_S dS \right|. \quad (9)$$

Для изотропной антенны

$$\Pi_{\Theta} = \frac{P_{\Sigma\Theta}}{4\pi r_0^2}, \quad (10)$$

$$P_{\Sigma\Theta} = \int_S \Pi_S dS = \int_S \frac{|\dot{E}_S|^2}{240\pi} dS. \quad (11)$$

$$\Pi_{\Theta} = \frac{1}{4\pi r_0^2} \frac{1}{240\pi} \int_S |\dot{E}_S|^2 dS. \quad (12)$$

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{\left| \int_S \dot{E}_S dS \right|^2}{\int_S |\dot{E}_S|^2 dS}. \quad (13)$$

Эффективная площадь раскрыва

$$A_{\text{эф}} = \frac{\left| \int_S \dot{E}_S dS \right|^2}{\int_S |\dot{E}_S|^2 dS}. \quad (14)$$

$$A_{\text{эф}} = \frac{\left| \int_S \dot{E}_S dS \right|^2}{\int_S |\dot{E}_S|^2 dS} = \frac{(E_S S)^2}{E_S^2 S} = S. \quad (15)$$

Если раскрыв возбуждается неравноамплитудно и несинфазно, то его эффективная площадь уменьшается

Коэффициент использования площади

Обозначим $A_{\text{эф}} = Sq$, где q – коэффициент использования площади.

$$q = \frac{A_{\text{эф}}}{S} \leq 1.$$

Тогда выражение для КНД апертурной антенны (13) примет вид:

$$D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{\text{эф}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} Sq. \quad (16)$$

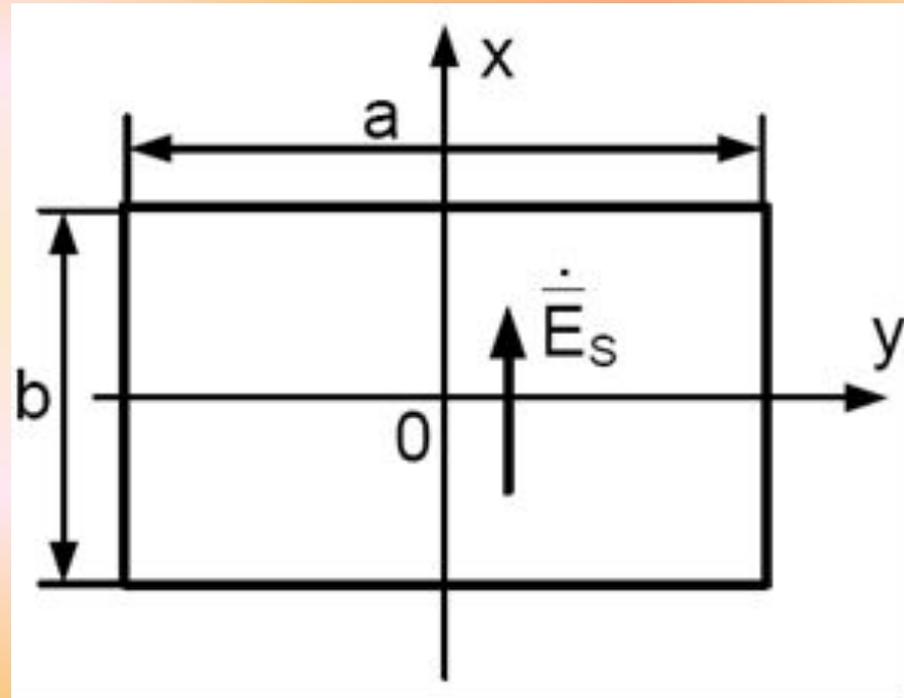
При равноамплитудном, синфазном распределении поля в раскрыве $q=1$; $A_{\text{эф}}=S$, КНД антенны будет максимальным для данного размера раскрыва. При неравноамплитудном распределении поля (спадающем к краям раскрыва) эффективная площадь и КИП уменьшаются, а значит, также уменьшается и КНД. Несинфазность поля в раскрыве также влияет на эти параметры раскрыва аналогичным образом: уменьшается КИП, $A_{\text{эф}}$ и D_0 .

3. Влияние поля в раскрыве антенны на её направленные свойства.

Диаграммы направленности синфазного раскрыва прямоугольной формы с различными видами амплитудного распределения

Рассмотрим два характерных вида амплитудных распределений поля в раскрыве прямоугольной формы. Считаем, что раскрыв антенны лежит в плоскости XOY и имеет линейные размеры a и b . Поле линейно поляризовано.

Направление вектора \vec{E}_s совпадает с осью OX . Требуется определить ДН в двух главных плоскостях: XOZ и YOZ .



Равномерное амплитудное распределение

В этом случае $E_s(x, y) = E_0 = \text{const}$.

В плоскости XOZ (E-плоскости) $\varphi = 0$; $\cos \varphi = 1$; $\sin \varphi = 0$.

$$F_\theta(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \frac{\sin\left(\frac{kb}{2} \sin \theta\right)}{\frac{kb}{2} \sin \theta}. \quad (17)$$

Так как $\sin \varphi = 0$, $F_\varphi(\theta) = 0$.

В плоскости YOZ (H-плоскости) $\varphi = \pi / 2$; $\cos \varphi = 0$; $\sin \varphi = 1$.

$$F_\varphi(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \frac{\sin\left(\frac{ka}{2} \sin \theta\right)}{\frac{ka}{2} \sin \theta}. \quad (18)$$

множитель
непрерывной
линейной АР

в соответствующей
плоскости

Так как $\cos \varphi = 0$, $F_\theta(\theta) = 0$.

ДН излучателя Гюйгенса

Ширина ДН $2\theta_{0,5}^E = 51^\circ \frac{\lambda}{b}$; $2\theta_{0,5}^H = 51^\circ \frac{\lambda}{a}$.

КНД $D_0 = \frac{4\pi}{\lambda^2} ab$.

Неравномерное амплитудное разделяющееся распределение

$$E_s(x, y) = E_0 e_1(x) e_2(y)$$

вдоль оси ОХ распределение поля равномерно - $e_1(x) = 1$

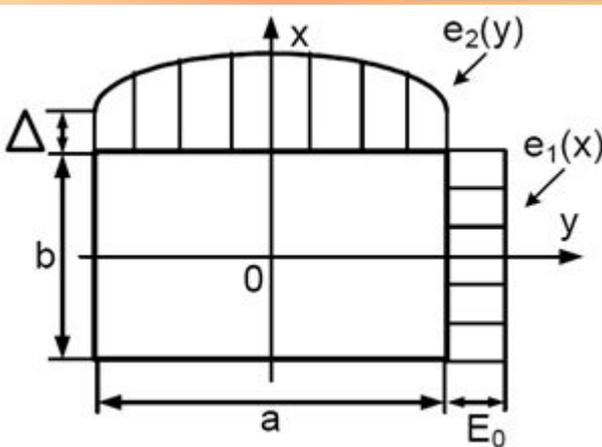
вдоль оси ОУ – спадающим к краям до величины Δ

$$e_2(y) = \Delta + (1 - \Delta) \cos \frac{\pi y}{a}$$

Выражения для ДН:

- в плоскости ХОZ (Е-плоскости) – выражение, аналогичное (17);
- в плоскости YOZ (Н-плоскости):

$$F_\varphi(\theta) = \frac{1 + \cos \theta}{2} \left[\Delta \frac{\sin\left(\frac{ka}{2} \sin \theta\right)}{\frac{ka}{2} \sin \theta} + \frac{\pi}{2} (1 - \Delta) \frac{\cos\left(\frac{ka}{2} \sin \theta\right)}{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 - \left(\frac{ka}{2} \sin \theta\right)^2} \right] \quad (18)$$



$$2\theta_{0,5} = m^\circ \frac{\lambda}{a},$$

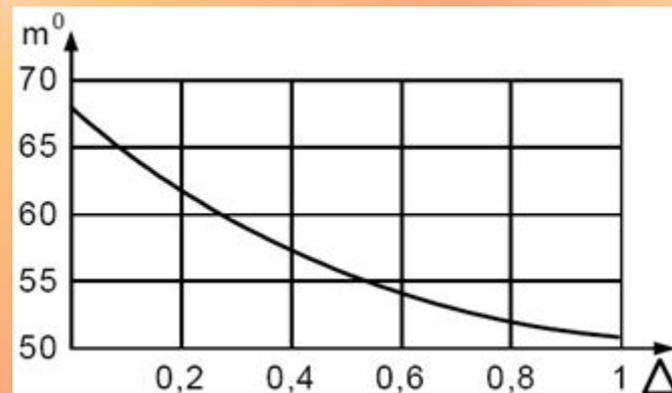
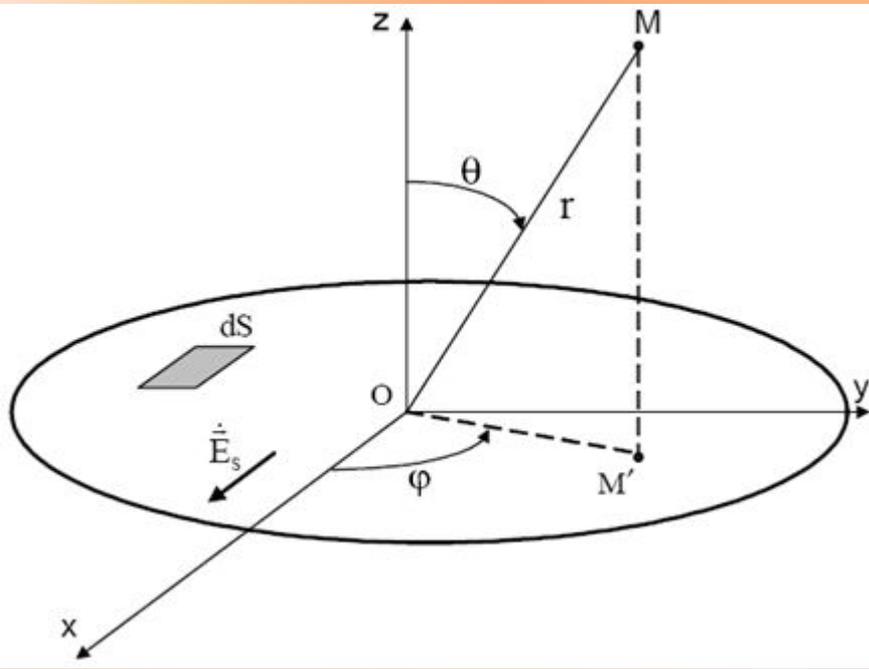


Диаграмма направленности синфазного раскрыва круглой формы с равномерным амплитудным распределением поля



Пусть антенна имеет круглый раскрыв радиуса a с синфазным распределением поля. Электрический вектор E_s полагаем всюду на раскрыве параллельным оси Ox . Для круглого раскрыва распределение поля по раскрыву более удобно выражать не в прямоугольной, а в полярной системе координат. В ней элемент поверхности $d_s = r_s d\varphi_s dr_s$, где r_s и φ_s – координаты элемента на раскрыве.

Если амплитудное распределение по раскрыву – равномерное, то ДН:

$$F(\theta) = (1 + \cos \theta) \frac{J_1(k a \sin \theta)}{k a \sin \theta}, \quad (20)$$

ДН является осесимметричной, т.е. в любой меридиональной плоскости ($\varphi = \text{const}$) – одинаковой.

При использовании спадающих к краям раскрыва амплитудных распределений изменение ширины ДН, уровня боковых лепестков, КИП и ЭПР будет происходить аналогично тому, как и для антенн с прямоугольной формой раскрыва.

Влияние фазовых искажений на форму диаграммы направленности плоского раскрыва

На практике необходимы антенны и с отклонённым от нормали к плоскости раскрыва главным лепестком, либо с расширенным главным лепестком сложной формы. Выполнение этих задач требует использования несинфазных раскрывов. Помимо этого, фазовые искажения появляются в процессе эксплуатации антенны под влиянием внешних факторов.

Фазовое распределение любого вида можно представить в виде степенного ряда

$$\psi(x_S) = a_1 x_S + a_2 x_S^2 + \dots + a_n x_S^n + \dots, \quad (21)$$

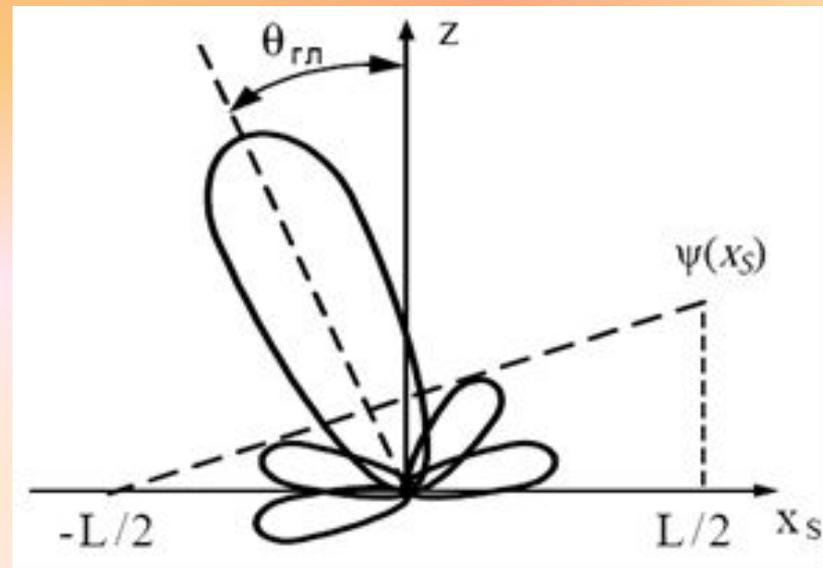
Если все эти коэффициенты равны нулю, то раскрыв является синфазным.

Оценим влияние каждого слагаемого (21) на поведение ДН

Линейный закон изменения фазы

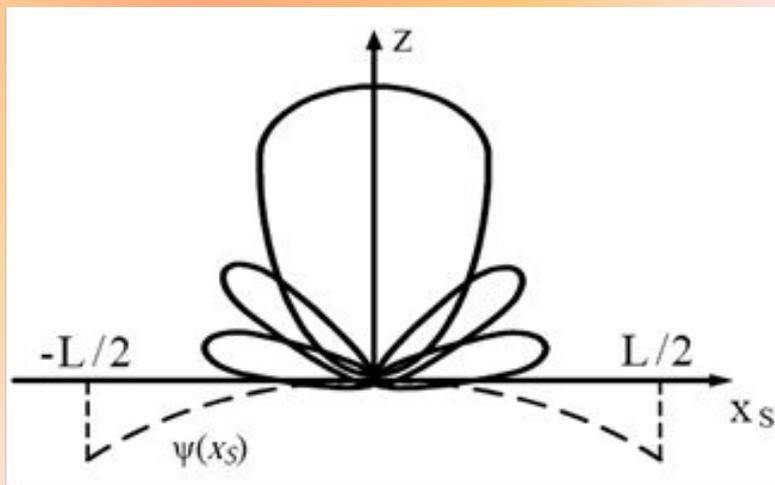
$$\psi(x_s) = a_1 x_s \quad (22)$$

Происходит отклонение максимума главного лепестка ДН относительно нормали к плоскости раскрыва антенны на угол $\theta_{гл} = \arcsin a_1/k$ в сторону края, где наблюдается отставание фазы. Отклонение лепестка сопровождается его расширением и уменьшением КНД антенны.



Квадратичный закон изменения фазы

$$\psi(x_s) = a_2 x_s^2 \quad (23)$$

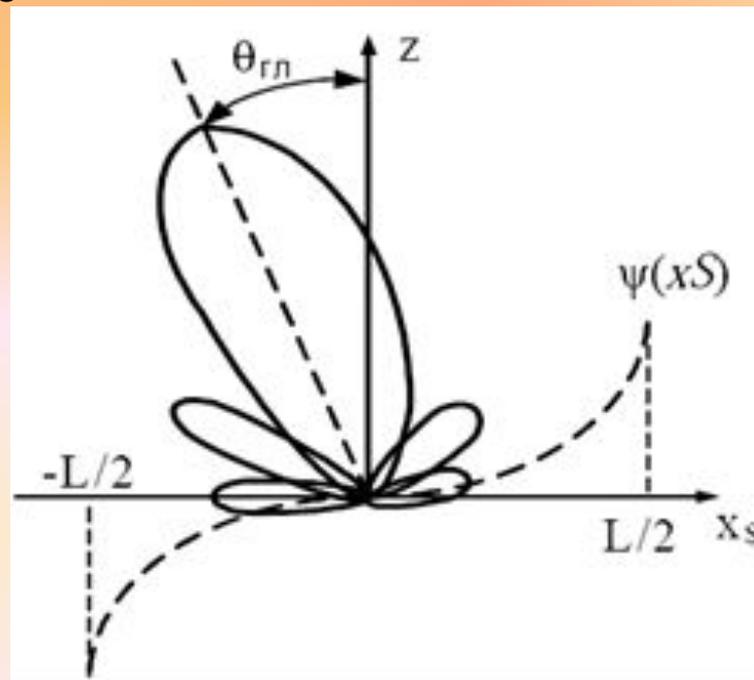


Происходит расширение главного лепестка и рост боковых лепестков. Так как распределение симметрично относительно центра раскрыва, то нарушение симметрии ДН не происходит. С ростом несинфазности заметно падает КНД раскрыва.

Кубический закон изменения фазы

$$\psi(x_s) = a_3 x_s^3 \quad (24)$$

Так как данная функция несимметрична, то при изменении фазы по кубическому закону главный лепесток ДН не только расширяется, но и отклоняется в сторону отставания фазы. Вместе с этим нарушается симметрия ДН. Уровень боковых лепестков в направлении отклонения ДН становится выше, а с другой – ниже.



Случайные фазовые ошибки

Возникают и в процессе изготовления и в процессе эксплуатации антенн. Эти ошибки приводят к случайным изменениям формы ДН, которая, следовательно, может рассматриваться как случайная функция. Поэтому анализ направленных свойств раскрыва в общей постановке требует применения статистической теории антенн.

5186 (51E6) Устройства сверхвысоких частот и антенны

Лекция №3 Общие сведения и типы антенн с плоским излучающим раскрытием.

- 1. Методы расчёта полей излучения апертурных антенн. Применение законов геометрической оптики в теории апертурных антенн.*
- 2. Поле излучения плоского раскрытия и его электрические параметры.*
- 3. Влияние поля в раскрытии антенны на её направленные свойства.*

Задание на самостоятельную работу : Пудовкин А.П., Панасюк Ю.Н., Иванков А.А. Основы теории антенн. [Электронный ресурс]:

учеб. пособие (стр 72-87)