Кафедра радиосвязи и вещания

Лекция
Основы теории антенных решеток и апертурных антенн

Учебные вопросы:

1. Линейная антенная решетка излучателей и ее направленные свойства.
2. Направленные свойства плоскостных антенных решеток.
3. Сканирующие и многолучевые антенные решетки.
4. Направленные свойства апертурных антенн.

Общие понятия об антенных решетках

№2

Одиночный симметричный вибратор обладает слабой направленностью, его максимальный КНД не более 3,1 в свободном пространстве. ДН симметричного вибратора широкая и имеет два и более лепестков.

Для получения больших значений КНД и резко выраженных направленных свойств применяют антенны в виде системы из большого числа вибраторов или других излучателей. Такие системы излучателей принято называть антенными решетками (АР). Излучатели АР называют элементами.

В зависимости от расположения элементов различают:
- **линейные;**
- **плоскостные;**
- **кольцевые;**
- **дуговые;**
- **объёмные и другие антенные решетки.**

ЭМ поле антенной решетки

№3

Для получения высокой направленности излучения используется система из **N** излучателей.

Поле излучения антенных решеток является результатом интерференции в пространстве поля излучения ее элементов. Амплитуда общей напряженности поля определяется как сумма амплитуд составляющих *En*(θ,φ).

$$E(\theta,\varphi)=\sum_{n=1}^{N}E_n(\theta,\varphi).$$

Характеристика направленности (ХН) антенной решетки (АР) определяется как произведение:

$$f(\theta,\varphi)=f_1(\theta,\varphi)\,f_c(\theta,\varphi).$$

Если имеются другие влияющие факторы, то они также учитываются, например влияние поверхности **земли** тогда:

$$f(\theta,\varphi)=f_1(\theta,\varphi)\,f_c(\theta,\varphi)\,f_з(\theta).$$

Характеристика направленности АР

$$E(\theta,\varphi)=\sum_{n=1}^{N}E_n(\theta,\varphi)$$

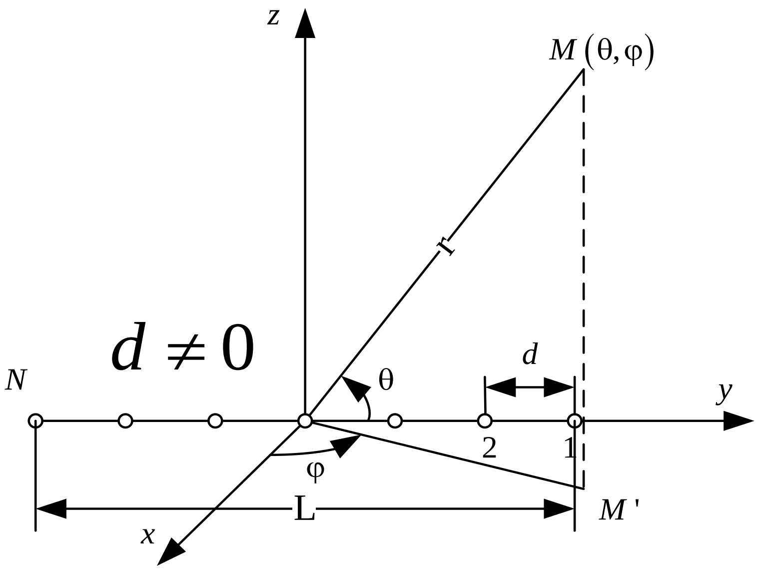
$$f(\theta,\varphi)= f_1(\theta,\varphi)\, f_c(\theta,\varphi)$$

характеристика направленности одного излучателя вне АР

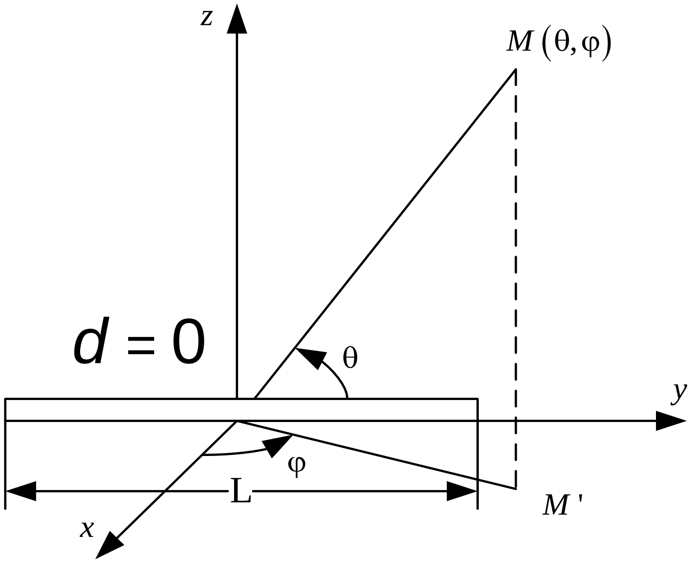
множитель системы из *N* гипотетических ненаправленных излучателей

1. Линейная антенная решетка излучателей и ее направленные свойства

№5



Линейная АР с дискретными элементами



Линейная АР с непрерывными элементами

Питающие токи всех элементов имеют одинаковые амплитуды *Im*, а ток в каждом последующем излучателе опережает по фазе ток в предыдущем излучателе на постоянный угол $\Phi \geq 0$:

$$I_n = I_m e^{i(n-1)\Phi}, \qquad n = 1, 2, 3 \ldots N$$

Поле излучения и ХН линейной антенной решетки

№6

$$E(\varphi) = E_0 f_1(\varphi) \sum_{n=1}^{N} e^{i(n-1)\psi}, \qquad d = \text{const}.$$

где E_0 – постоянный коэффициент, определяемый типом излучателя и его возбуждением; $f_1(\varphi)$ – функция направленности одного излучателя вне антенной решетки. Выражение под знаком суммы является множителем решетки (системы).

Характеристика направленности АР: $f(\theta, \varphi) = f_1(\theta, \varphi) f_c(\theta, \varphi).$

Множитель системы определяется по формуле:

$$f(\varphi) \approx f_c(\varphi) = \frac{\sin(0{,}5N\psi)}{\sin(0{,}5\psi)},$$

$$\psi = \Phi - kd\cos\varphi$$

- фазовый множитель.

Анализ множителя системы

Максимальное значение множителя системы $\boldsymbol{f_c(\varphi)_{max} = N}$ в плоскости решетки, а перпендикулярно оси $\boldsymbol{z}$ $\boldsymbol{f_c(\theta,\varphi) = 1}$, т.е. **КНД** линейной **АР** возрастает только в плоскости расположения элементов.

Нормированная характеристика направленности линейной АР равна

$$F_c(\theta,\varphi) = \frac{f_c(\theta,\varphi)}{f_c(\theta,\varphi)_{max}} = \frac{\sin[0,5N(\Phi - kd\cos\theta\sin\varphi)]}{N\sin[0,5(\Phi - kd\cos\theta\sin\varphi)]}.$$

Для непрерывной излучающей системы $d \to 0$

$$F_c(\theta,\varphi) = \frac{\sin[0,5kL(\xi - \cos\theta\sin\varphi)]}{0,5kL(\xi - \cos\theta\sin\varphi)]},$$

$$\xi = \Phi/kd \qquad Nd \approx L$$

Синфазные антенные решетки

Режим нормального излучения возможен при синфазном питании всех элементов, в частности Ф = 0.

$$F_{\mathrm{c}}(\theta,\varphi)=\frac{\sin(0,5Nkd\cos\theta)}{N\sin(0,5kd\cos\theta)}=\frac{\sin(u)}{N\sin(u/N)},$$

$$u=0,5Nkd\cos\theta.$$

Синфазная АР имеет 2 главных максимума, ортогональных оси.

Ширина ДН:

$$2\Delta\theta_{0,7}=51^\circ\frac{\lambda}{Nd}=51^\circ\frac{\lambda}{L};$$

$$2\Delta\theta_{0}=114^\circ\frac{\lambda}{L}.$$

Антенные решетки продольного излучения

При $\Phi \approx kd$, **главный максимум излучения направлен вдоль оси решетки:**

$$F_c(\theta,\varphi) = \frac{\sin(u)}{N\sin(u/N)},$$

$$u = 0,5kL(\xi - \cos\theta\sin\varphi).$$

$$\xi = \Phi/kd$$

$$Nd \approx L$$

В частности, когда АР непрерывная $d = 0$

$$F(\theta,\varphi) = \sin\theta\frac{\sin\left[0,5kL(\xi - \cos\theta\sin\varphi)\right]}{0,5kL(\xi - \cos\theta\sin\varphi)}.$$

Провод с бегущей волной тока

Переменнофазные антенные решетки

В режиме осевого излучения система дискретных излучателей имеет один главный лепесток ДН, а в проводе с бегущей волной – тока ДН имеет вид конуса с нулем вдоль провода.

Ширина главного лепестка ДН решетки дискретных излучателей определяется приближенными формулами:

$$2\Delta\theta_{0,7} \approx 115^\circ \sqrt{\frac{0,886\lambda}{L}}, \qquad 2\Delta\theta_0 \approx 162^\circ \sqrt{\frac{\lambda}{L}}.$$

Оптимальная длина АР осевого излучения:

$$L_{\text{опт}} \approx \lambda/[2(\xi-1)] \quad \text{при} \quad d=\lambda/4. \qquad (2\Delta\theta_{0,7})_{\text{опт}} \approx 115^\circ\sqrt{\frac{0,28\lambda}{L}}$$

$$\xi \approx 1,1 \ldots 1,2.$$

КНД: $D = 4L/\lambda,$ $\quad D_{\text{опт}} \approx (7\ldots8)L/\lambda.$

2. Направленные свойства плоскостных антенных решеток

№11

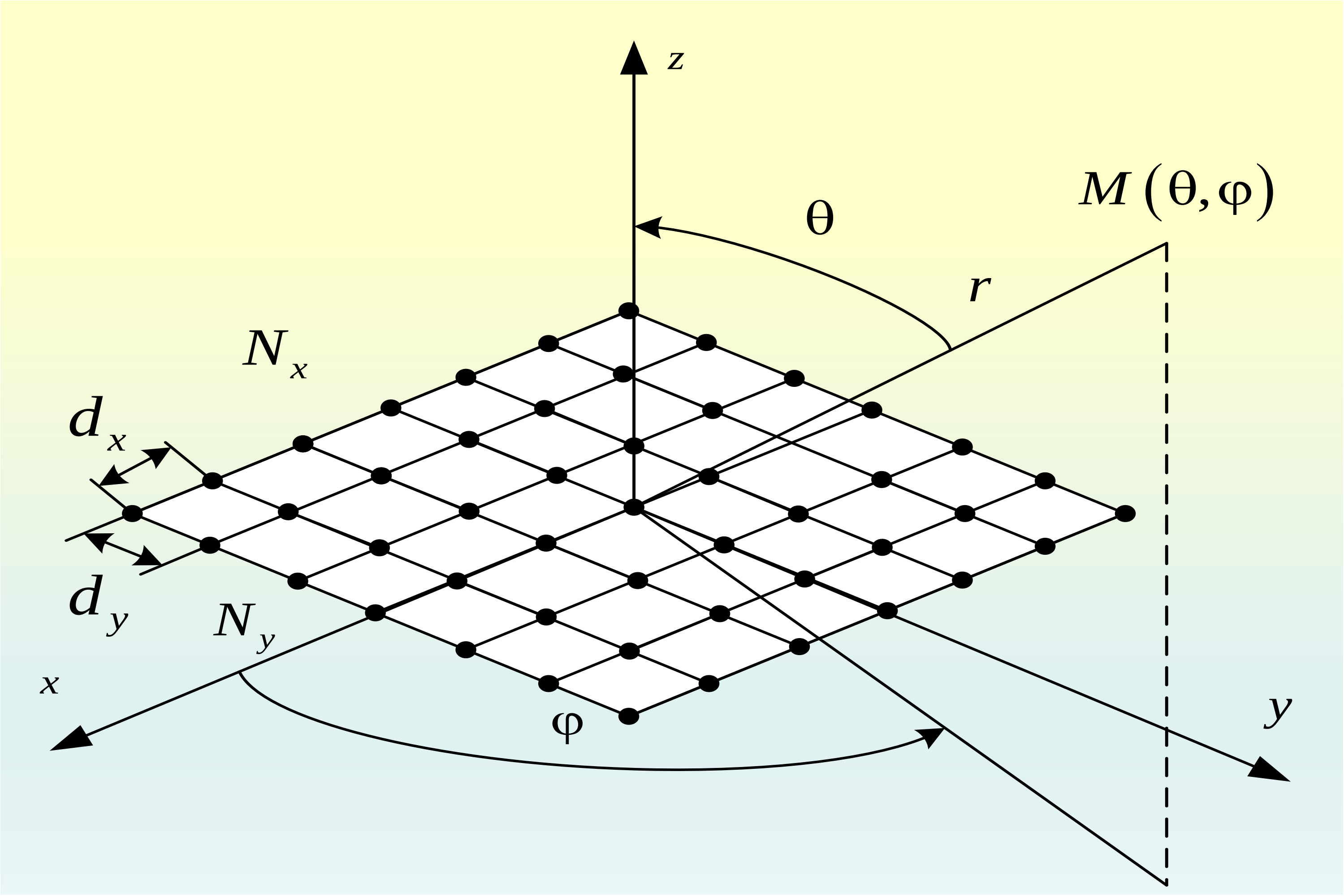
Линейные антенные решетки формирует остронаправленное излучение только в плоскости решетки излучателей. Для формирования острых ДН в двух ортогональных плоскостях, необходимы двумерные решетки излучателей.

Излучатели в плоской АР располагаются в узлах этих сеток: прямоугольной; треугольной или других.

В соответствии с правилом перемножения характеристик суммарное поле излучения плоской двумерной дискретной решетки определяется выражением:

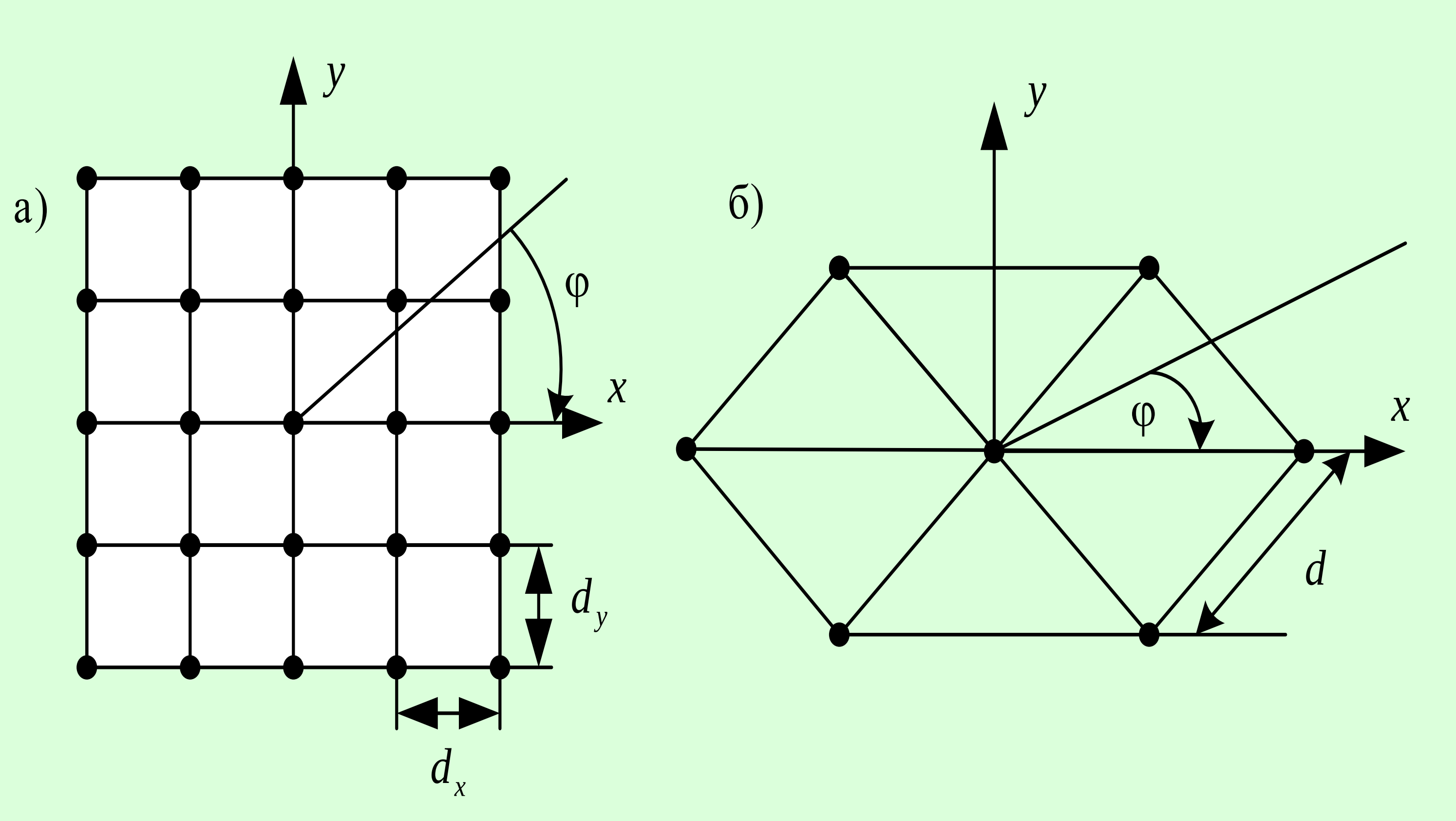
$$\vec{E}(r,\theta,\varphi) = A\overrightarrow{f_1}(\theta,\varphi) f_c(\theta,\varphi)\frac{\mathrm{e}^{-ikr}}{r}.$$

Двумерная (плоская) антенная решетка



Прямоугольная и треугольная (гексагональная) сетки

№13



Направленные свойства двумерной антенной решетки

№14

$$F_c(\theta,\varphi)=F_x(\theta,\varphi)F_y(\theta,\varphi)=\frac{\sin(0{,}5N_x\psi_x)}{N_x\sin(0{,}5\psi_x)}\frac{\sin(0{,}5N_y\psi_y)}{N_y\sin(0{,}5\psi_y)},$$

$$\psi_x=\Phi_x-kd_x\sin\theta\cos\varphi,\qquad \psi_y=\Phi_y-kd_y\sin\theta\sin\varphi.$$

Направления лепестков: $\cos\theta_x=\dfrac{\Phi_x}{kd_x}+\dfrac{2\pi}{kd_x}m;$

$$\cos\theta_y=\frac{\Phi_y}{kd_y}+\frac{2\pi}{kd_y}m,\qquad m=0,\pm1,\pm2\ldots$$

– номера лепестков;

θ_x θ_y – углы между направлением лепестка ДН и осями

Расстояния между элементами (шаг)

Межэлементный шаг для прямоугольной сетки выбирается из условий:

$$d_x \le \lambda/2; \qquad d_y \le \lambda/2.$$

Для гексагональной сетки максимальный шаг выбирается из условия:

$$d \le \lambda/\sqrt{3}.$$

Если излучатели имеют направленные ДН:

$$d \approx \lambda.$$

3. Сканирующие и многолучевые антенные решетки

УПРАВЛЕНИЕ ДН АНТЕНН

Суммарная ДН антенной решетки является результатом интерференции ДН отдельных излучателей в зависимости от длины волны λ, шага решетки *d* и разности фаз питающих токов Ф.

Направление главного максимума **ДН** решетки зависит от результирующего фазового сдвига между полями соседних элементов **ψ**.

Например, для линейной решетки направление главного максимума ДН ($\varphi_{гл}$),

равно $\psi = \Phi - kd\cos\varphi_{гл} = 0.$

$$\cos\varphi_{гл} = \frac{\Phi}{kd}$$

или в вертикальной пл.

$$\theta_{гл} = \arcsin(\Phi/kd).$$

Управление положением главного максимума ДН

№17

Управление ДН решетки можно добиться, меняя Φ, λ **или** d

Поэтому АР могут быть: Фазированные (ФАР), частотные, коммутируемые.

В **линейной решетке** сканирование возможно только в плоскости линейки излучателей.

Для сканирования в двух ортогональных плоскостях антенная решетка должна быть **двухмерной**, в простейшем случае плоскостной.

Для плоскостной антенной решетки направление основного лепестка ДН определяется выражениями:

$$\theta_{x,\text{гл}} = \arccos\left(\Phi_x / \left(kd_x\right)\right), \quad \theta_{y,\text{гл}} = \arccos\left(\Phi_y / \left(kd_y\right)\right).$$

$\theta_{x,\text{гл}}$ **и** $\theta_{y,\text{гл}}$ **– углы, отсчитываемые от осей** x **и** y **соответственно.**

Сектор (углы) сканирования

1) В **ФАР** с **ненаправленными элементами** в линейной или плоской прямоугольной решетке сектор сканирования +/- 60…90 град.

Расстояние между элементами:

$$d < \frac{\lambda}{(1+\sin\theta_{ск})}.$$

2) В **ФАР** с **направленными элементами** в линейной или плоской прямоугольной решетке

Расстояние между элементами выбирается в пределах средней длины волны

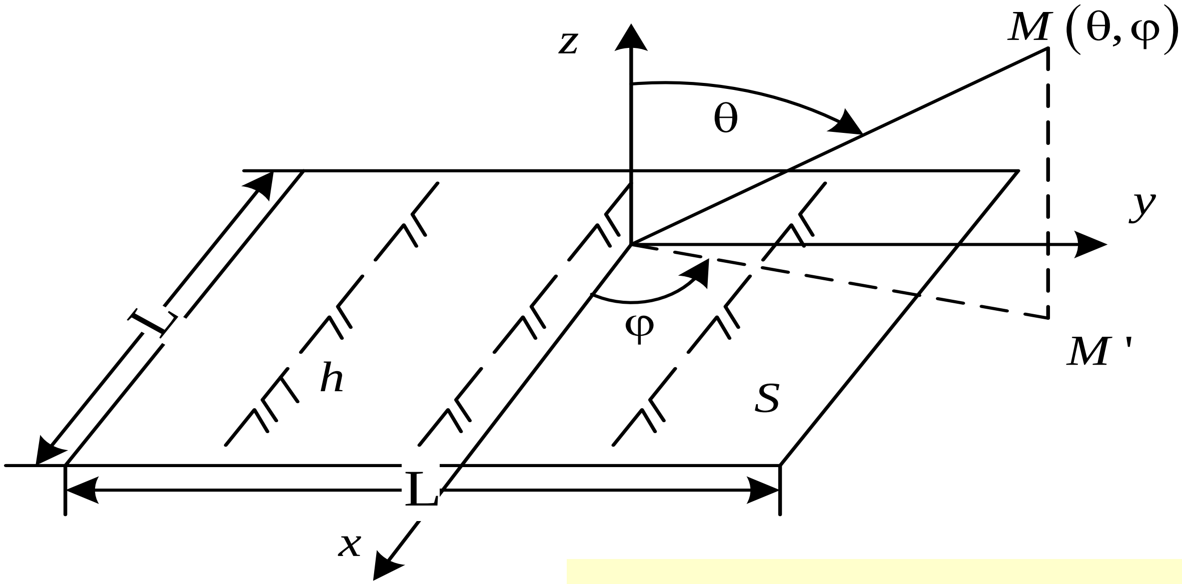
$$d \approx \lambda.$$

При секторе сканирования

$$\theta_{ск} = \pm 30°.$$

Плоскостная вибраторная ФАР

№19



КНД при сканировании:

$$D(\theta,\varphi) = D_0(\theta,\varphi)\cos\theta_{ск},$$

КНД в главном направлении:

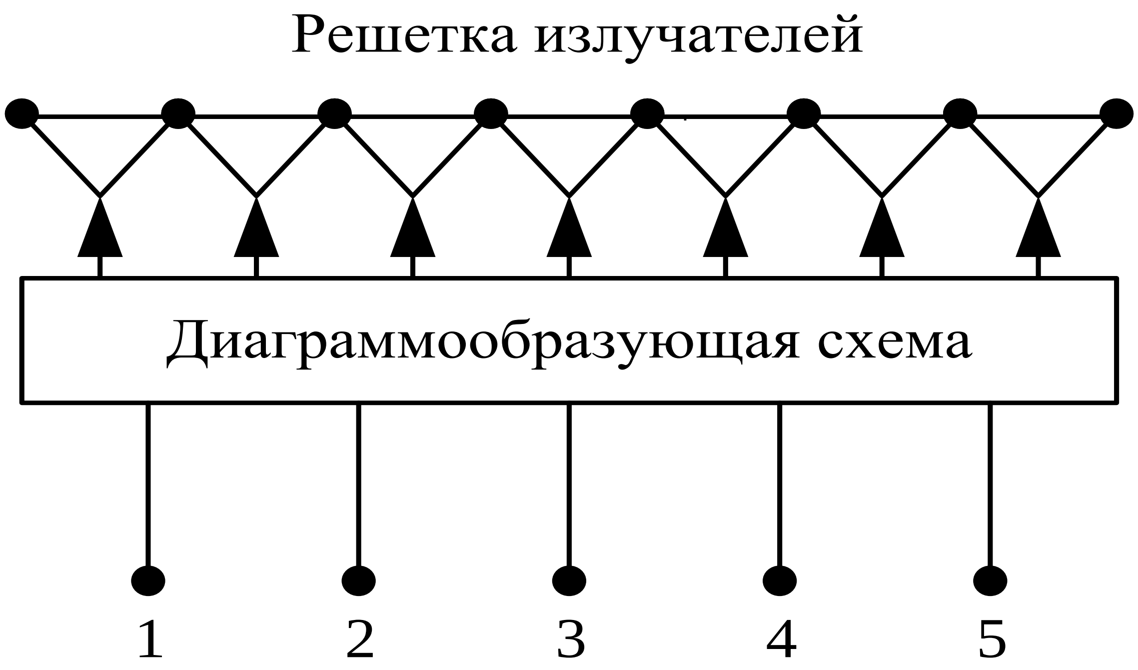
$$D_0(\theta,\varphi) = ND_1(\theta,\varphi).$$

Максимальный КНД при сканировании:

$$D_m = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_1 N \nu_а \cos\theta_{ск}.$$

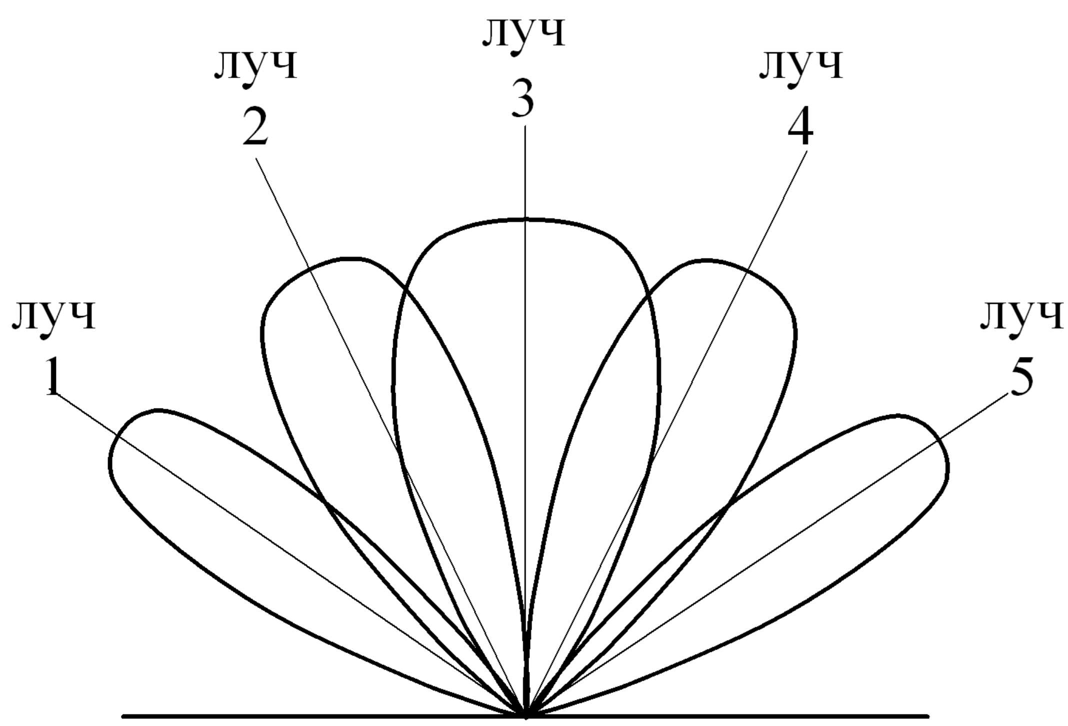
Многолучевые антенные решетки

Антенные решетки, при помощи которых может быть сформирован ряд независимых друг от друга ДН (лучей), называются многолучевыми



Входы ФАР

ДН многолучевой ФАР



ВЫВОДЫ

КНД синфазной плоскостной антенной решетки тем больше, чем больше размеры *Lx* и *Ly*, которые зависят от числа излучателей *Nx* и *Ny*.

Кроме синфазных плоскостных **АР** применяются решетки с переменно фазным питанием. В этом случае Фх < *kdx* и Фу < *kdy*.

Направление главного максимума отклоняется от нормали и определяется из условия равенства нулю числителей обоих сомножителей множителя решетки. Изменение положения максимума ДН решетки **называют сканированием**.

4. Особенности метода анализа апертурных антенн

№23

В диапазонах **дециметровых** и более коротких волн чаще используются антенны, выполненные в виде излучающих поверхностей. Такие антенны называют **апертурными**.

В апертурных антеннах излучение электромагнитной энергии происходит через отверстие, которое еще называют раскрывом или апертурой.

К апертурным относят различные типы зеркальных, рупорных, линзовых, щелевых и других антенн.

При расчете поля излучения апертурных антенн в диапазонах сверхвысоких частот (**СВЧ**) находят широкое применение **принцип Гюйгенса - Кирхгофа и методы геометрической оптики.**

Такой метод расчета антенн принято называть **АПЕРТУРНЫЙ.**

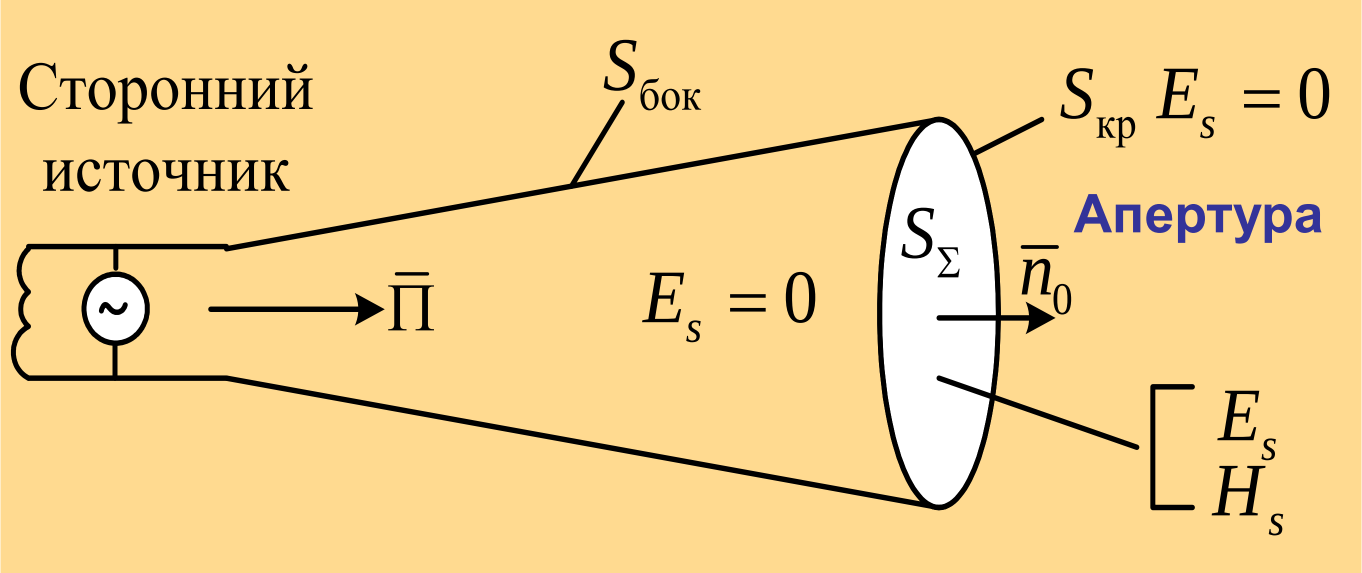
Апертурный метод расчета антенн СВЧ

№24

При определении поля любой антенны решаются **две задачи электродинамики:**

1. Внутренняя задача заключается в определении распределения тока или поля на поверхности антенны. У апертурных антенн поверхность сложная 3 –х мерная, поэтому только на раскрыве антенны задаются эквивалентные источники поля (элементы Гюйгенса).

2. Внешняя задача заключается в определении поля излучения в пространстве вокруг антенны в соответствии с решенной внутренней задачей.



Принцип расчета поля излучения антенн

№25

Каждый элемент апертуры (раскрыва) антенны можно рассматривать как элементарный источник ЭМ волн – излучатель Гюйгенса.

Поэтому поле в дальней зоне определяется по схеме:

$$E(\theta,\varphi) = \int\limits_{S_\text{А}} dE_{\text{ЭГ}} \quad .$$

Поле апертурных антенн имеет 2 составляющих:

$$E_\theta = \pm j \frac{1}{2\lambda} \frac{e^{-jkr}}{r} (1+\cos\theta) \cos\varphi E_S, \qquad E_\varphi = \pm j \frac{1}{2\lambda} \frac{e^{-jkr}}{r} (1+\cos\theta) \sin\varphi E_S.$$

Направленные свойства апертур аналогичны многоэлементным антеннам:

$$f(\theta,\varphi) = f_{\text{ЭГ}}(\theta)\, f_{\text{С}}(\theta,\varphi), \qquad f_{\text{ЭГ}}(\theta) = \frac{1+\cos\theta}{2}.$$

Метод расчете поля апертурных антенн

№26

$$E(\theta,\varphi) = \int_{S_A} E_{\theta,\varphi} dS_n.$$

$$F_c(\theta,\varphi) = \int_{S_A} E_S(x,y) e^{+ik\Delta r} dxdy.$$

Множитель сферической волны:

$$\frac{e^{-ikr_n}}{r_n} \approx \frac{1}{r} e^{-ikr} e^{+ik\Delta r_n}.$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2},$$

$$r_n = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 + z^2}.$$

Амплитудный множитель
1/r = const.

Показатель экспоненты (фазовый множитель) в плоской апертуре аппроксимируется выражением:

$$\Delta r_n = r - r_n = x_n \sin\theta\cos\varphi + y_n \sin\theta\sin\varphi.$$

Характеристики излучения плоской апертуры

При определении поля излучения апертурных антенн необходимо выполнить интегрирования полей элементов Гюйгенса, распределенных на раскрыве S_A.

Если раскрыв антенны плоский, то необходимо выполнить двукратное интегрирование в зависимости от вида апертуры.

Элемент Гюйгенса (элементарная площадка) имеет две составляющих E_θ и E_φ поля вектора, поэтому поле плоской апертуры также имеет две составляющих

$$f_{\mathrm{c}}^{\theta}(\theta,\varphi)=\cos\varphi\int\limits_{S_{\mathrm{A}}} E_S \mathrm{e}^{ik\Delta r_n} dS_n,$$

$$f_{\mathrm{c}}^{\varphi}(\theta,\varphi)=\sin\varphi\int\limits_{S_{\mathrm{A}}} E_S \mathrm{e}^{ik\Delta r_n} dS_n.$$

ВЫВОДЫ

Анализ направленных свойств различных апертур показывает, что при **синфазном возбуждении** максимум **ДН** всегда получается в направлении нормали к ним.

Несинфазность излучающей поверхности может быть вследствие конструктивной особенности или специально устанавливается определенный закон изменения фазы.

Ширина ДН и КНД зависят от относительных размеров апертуры (*a* / λ).

Уменьшение амплитуды возбуждающего поля к краям раскрыва приводит к уменьшению амплитуды боковых лепестков, но при этом расширяется главный лепесток ДН и уменьшается КНД.