

**Российский государственный университет имени И.
Канта**

Кафедра телекоммуникаций

**Проектирование и расчет антенно-
фидерных устройств (АФУ)**

Лекция №4

Линейные излучающие системы

1. Общие сведения и типы антенных

Для передачи информации по радиоканальным системам на дальние расстояния возникла острая необходимость в создании антенн, обладающих высокой способностью концентрировать излучение электромагнитной энергии в достаточно узком телесном угле. В настоящее время известны антенны, обладающие КНД, исчисляемым тысячами и десятками тысяч единиц. Будем относить такие антенны к остронаправленным.

Подобные антенны конструктивно выполняются в виде сложных систем из идентичных слабонаправленных антенн. К таким системам относят антенные решетки, которые состоят из излучающих элементов в виде проволочных вибраторов, открытых концов волноводов, щелей или других типов излучателей. В качестве примеров антенных решеток (АР) можно привести следующие

Примеры антенных решеток

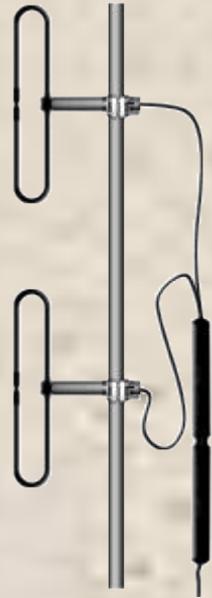
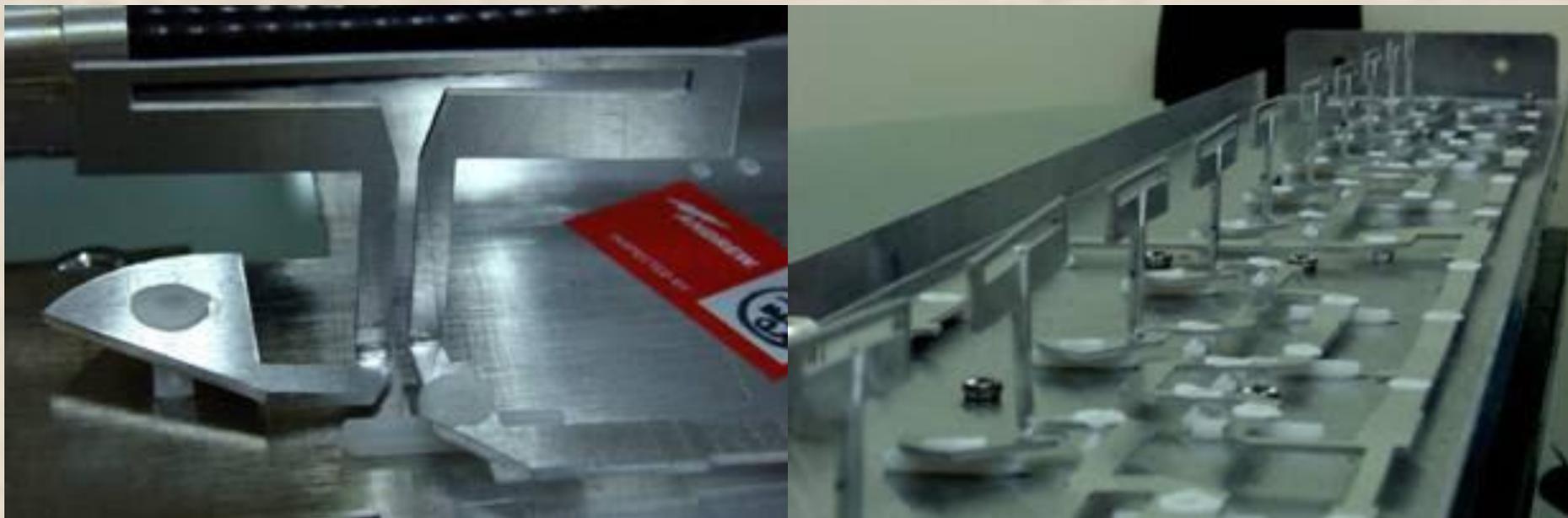


Рисунок 1
Высокоэффективные широкополосные базовые коллинеарные антенны кв (уков) диапазона моделей серии TC100, выполненные на основе петлевых вибраторов, предназначены для работы в составе



**Рисунок 2 - Диполи и система
запитки антенны *Andrew UMW-09015-2D* диапазона
1710-2170 МГц, выполненная в виде единой
штампованной детали**

Антенны для приема телевизионных сигналов

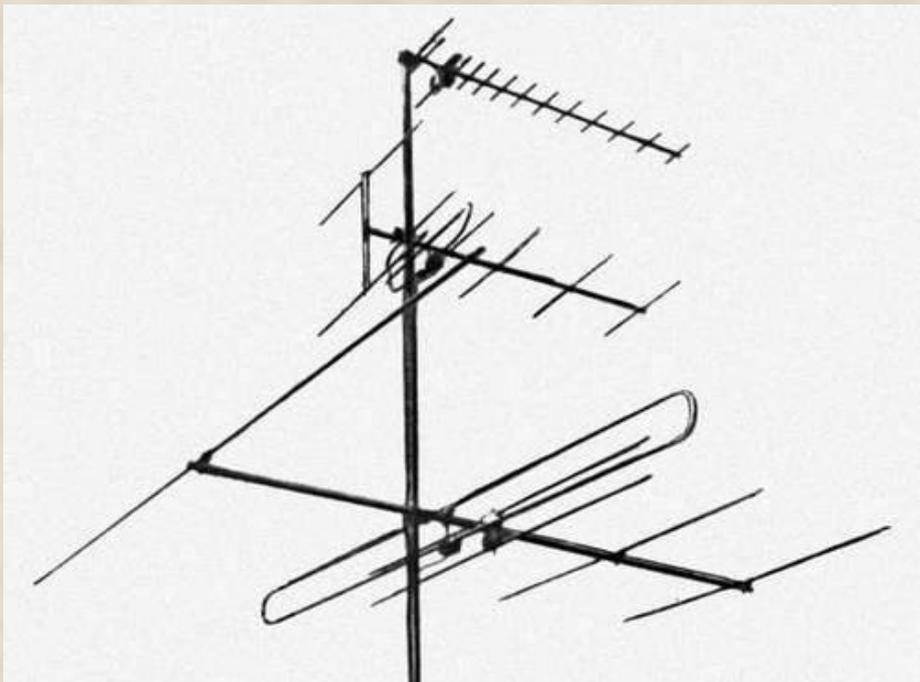


Рисунок 3 – Антенны типа волновой канал на одной стойке

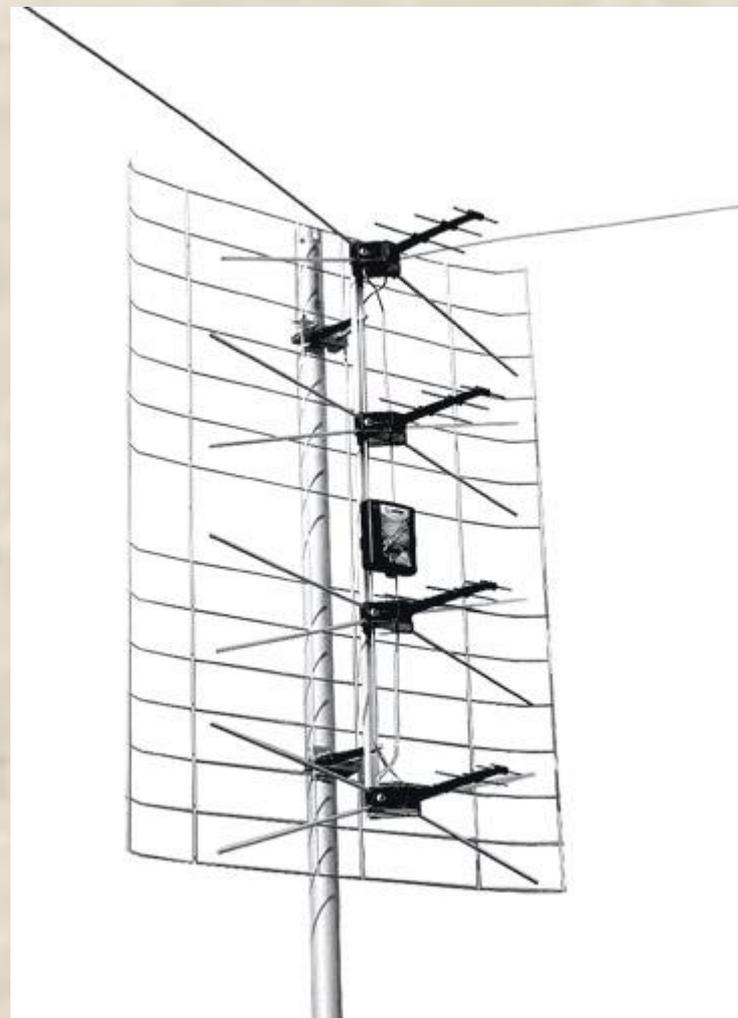
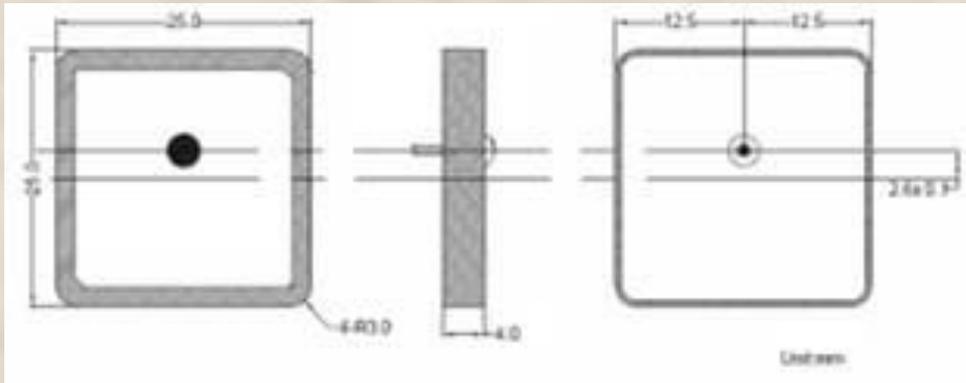


Рисунок 4 - Антенна предназначена для стационарного приема телевизионных сигналов вещательного телевидения горизонтальной поляризации в полосе частот от 40-800 МГц (1-60 каналы)



Микрополосковый антенный элемент компании Amotech: общий вид: состоит из серебряного излучающего элемента, керамической подложки и возбуждающего штыря



Семиэлементная антенная решетка для работы в диапазоне частот $\mathcal{L}1$ на основе керамических микрополосковых элементов.

Классификация антенных решеток

Антенная решетка (АР) представляет собой совокупность дискретных идентичных излучателей, расположенных в определенном порядке и возбуждаемым одним или совокупностью когерентных источников.

1. В зависимости от расположения элементов различают одномерные или линейные, двумерные или плоскостные и трехмерные или поверхностные антенные решетки. Линейные АР представляют собой систему излучателей, расположенных вдоль

пря пря от ИМИ
соо

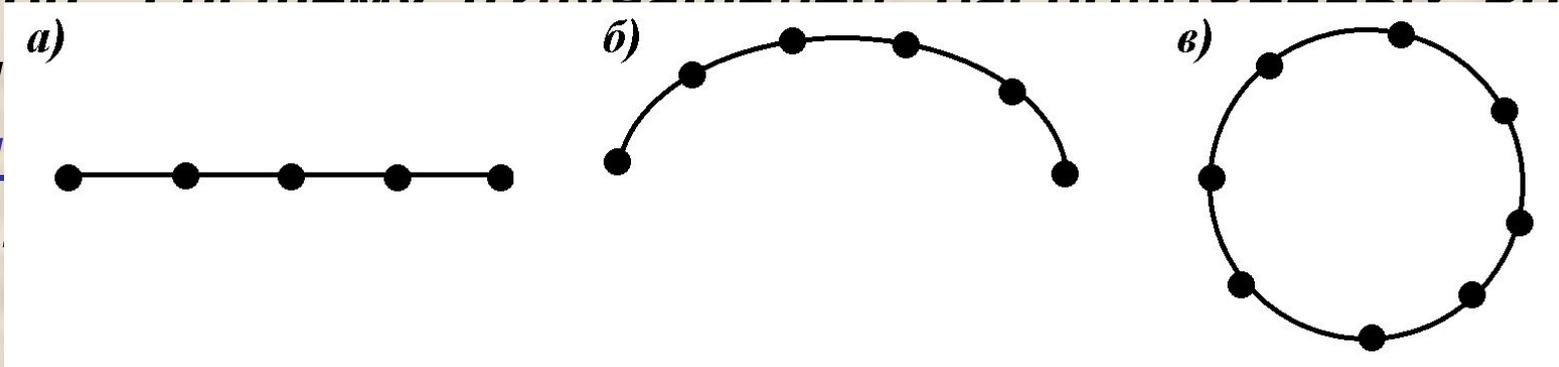
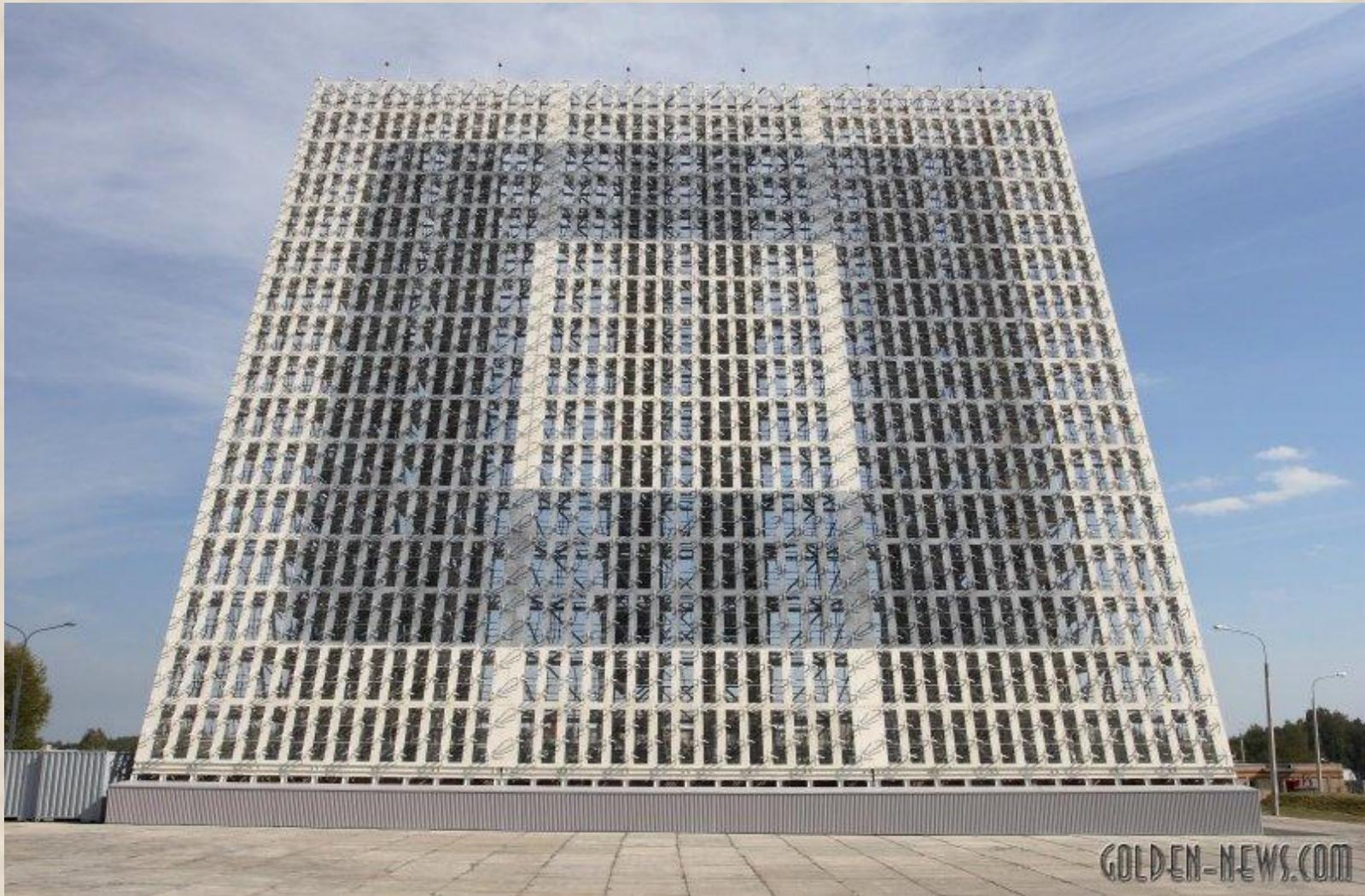


Рисунок 5 – Примеры расположения элементов линейной АР

Среди плоскостных наиболее распространены АР с прямоугольной и треугольной сеткой



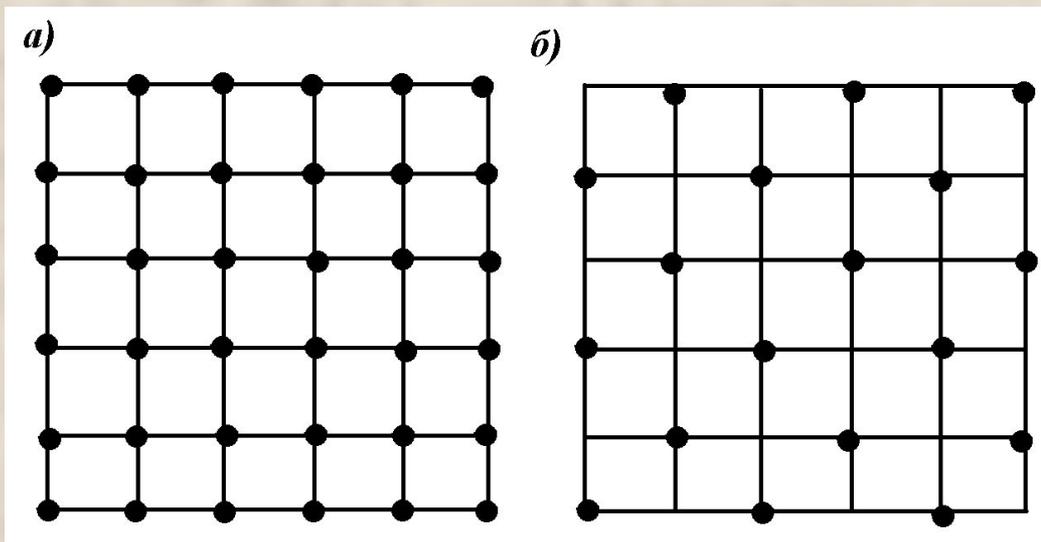


Рисунок 6 – Прямоугольная и треугольная AP

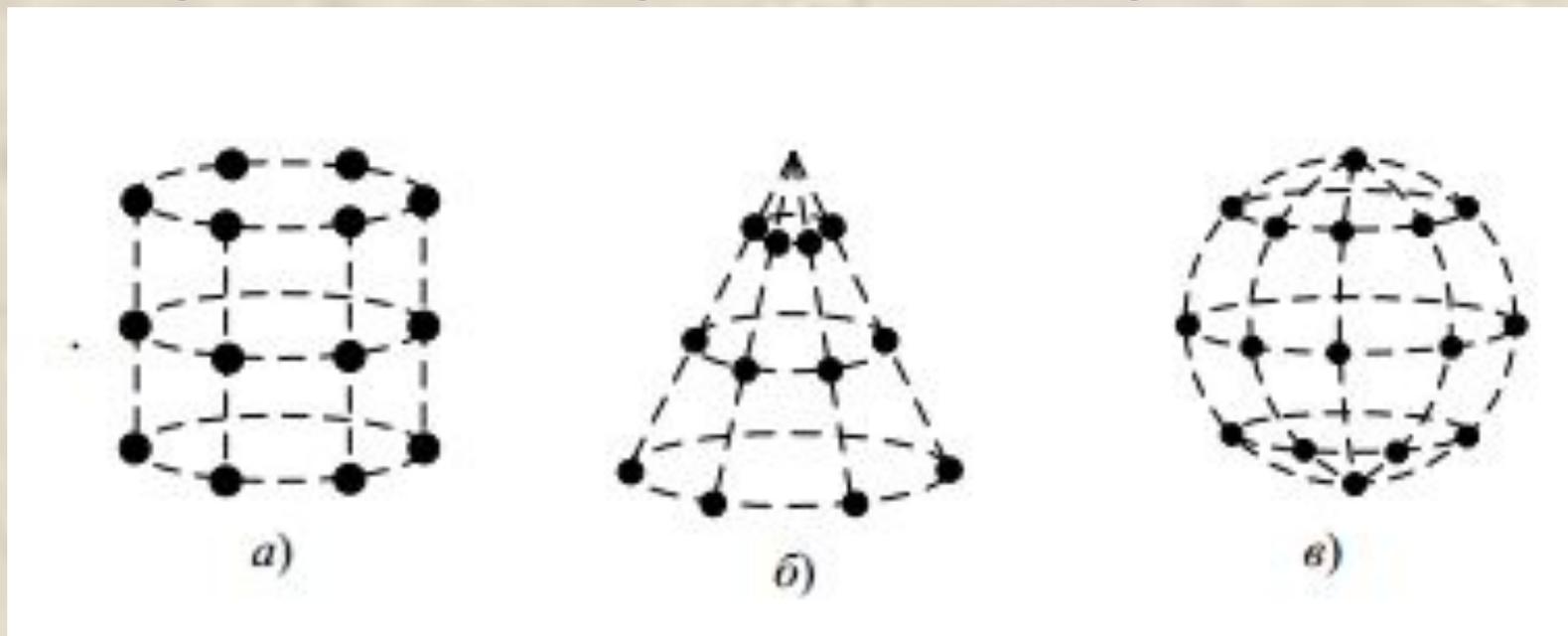


Рисунок 7 – Цилиндрическая, коническая, сферическая AP

2. По расстоянию между элементами: **эквидистантные** и **неэквидистантные**. В эквидистантных АР элементы расположены на равных расстояниях друг от друга. Расстояние между элементами линейной АР назовем **шагом решетки**.

3. По типу возбуждения излучателей:

- **равноамплитудные** (амплитуды токов в элементах одинаковы);
- **неравноамплитудные** (амплитуды токов в элементах изменяются по определенному закону);
- **линейно-фазные** (фазы токов в излучателях изменяются по линейному закону);
- **синфазные** (фазы токов в излучателях одинаковы).

4. По режимам излучения:

поперечного (нормального), **осевого (продольного)** и

2. Формулировка теоремы перемножения диаграмм направленности

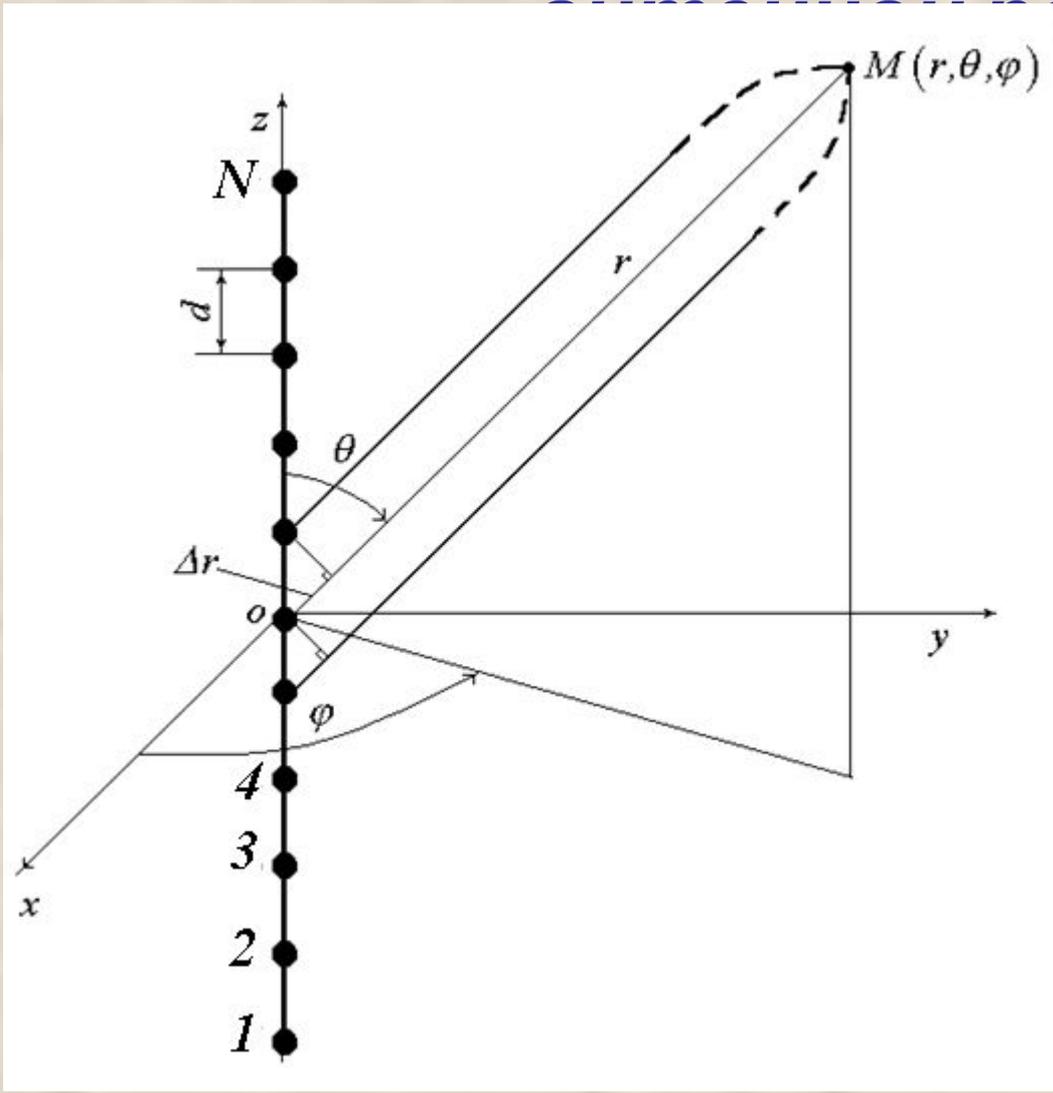
ДН системы из \mathcal{N} – направленных идентичных излучателей с одинаковой ориентацией в пространстве может быть записана в виде:

$$f(\theta, \varphi) = F_1(\theta, \varphi) f_c(\theta, \varphi)$$

Данное выражение носит название **теоремы перемножения ДН** и может трактоваться так: ДН системы из \mathcal{N} – направленных одинаково ориентированных в пространстве идентичных излучателей определяется произведением ДН одиночного излучателя на ДН этой же системы, но составленной из \mathcal{N} – числа абсолютно ненаправленных воображаемых излучателей.

$$f_c(\theta, \varphi) = \left| \sum_{i=1}^{\mathcal{N}} \frac{I_{m_i}}{I_{m_1}} e^{-jkr_i} \right|$$

3. Поле излучения прямолинейной решетки



$f_1(\theta) = f_1(\theta) f_c$ $\varphi = \varphi_c$

$f_c = f_c \cdot e^{j\psi_c}$ - **КОМПЛЕКСНЫЙ**

$f_1(\theta)$ и $f_1(\varphi)$ - **КОМПЛЕКСНЫЕ**
МНОЖИТЕЛИ
ЛАР
характеристики
направленности
одиночного
излучателя в
двух главных
плоскостях

Рисунок 8

$$\dot{E}_m = j \frac{30k\ell_{\text{д}} F_1(\theta, \varphi) \dot{I}_{m_1}}{r} e^{-jk r_1} \sum_{n=1}^N \frac{\dot{I}_{m_n}}{\dot{I}_{m_1}} e^{jk(n-1)d \cos \theta}. \quad (1)$$

Пусть все элементы линейной антенной решетки возбуждаются токами с равной амплитудой и начальными фазами, закон изменения которых вдоль АР от элемента к элементу носит линейный характер. Тогда комплексная амплитуда тока в n -ом элементе излучателя задается выражением:

$$\dot{I}_{m_n} = \dot{I}_m e^{j(n-1)\psi}$$

Токи во всех элементах равны по амплитуде, а фаза тока в каждом элементе отстает от фазы ψ в предыдущем на величину ψ . Такая линейная АР относится к АР с равноамплитудным возбуждением и линейным изменением фазы токов вдоль нее. В данной АР отдельные элементы могут обладать направленностью в рассматриваемой плоскости или быть ненаправленными

$$\dot{f}(\theta) = \dot{f}_c(\theta) = \sum_{n=1}^N e^{j(n-1)(kd \cos \theta - \psi)} \quad (2)$$

$$\dot{f}_c(\theta) = \frac{\sin \left[N \frac{(kd \cos \theta - \psi)}{2} \right]}{\sin \left[\frac{(kd \cos \theta - \psi)}{2} \right]} \quad (3)$$

$$\dot{E}_m(\theta, \varphi) = j \frac{30k\ell_{\text{д}} F_1(\varphi, \theta) \dot{I}_{m_1}}{r} \frac{\sin \left[N \frac{(kd \cos \theta - \psi)}{2} \right]}{\sin \left[\frac{(kd \cos \theta - \psi)}{2} \right]} e^{-jk\eta}. \quad (4)$$

$$E_m(\theta, \varphi) = \left| \frac{30k\ell_{\text{д}} F_1(\varphi, \theta) I_{m_1}}{r} \cdot \frac{\sin \left[N \frac{(kd \cos \theta - \psi)}{2} \right]}{\sin \left[\frac{(kd \cos \theta - \psi)}{2} \right]} \right|. \quad (5)$$

Нормированная амплитудная ДН при абсолютной ненаправленности излучателя $F_c(\theta) = 1$ с ХН соответствует нормированному амплитудному множителю решетки, который определен выражением

$$F(\theta) = F_c(\theta) = \left| \frac{1}{f_c(\theta_{\text{гл}})} \frac{\sin \left[N \frac{(kd \cos \theta - \psi)}{2} \right]}{\sin \left[\frac{(kd \cos \theta - \psi)}{2} \right]} \right| \quad (6)$$

В зависимости от величины сдвига фаз токов в соседних излучателях ЛАР изменяется положение максимума излучения в пространстве. В связи с этим различают три режима работы линейных АР: режим нормального излучения, режим наклонного излучения и режим осевого (продольного) излучения.

Режим нормального излучения реализуется, если

$$0 < \Psi < kd$$

Режим наклонного излучения реализуется, если

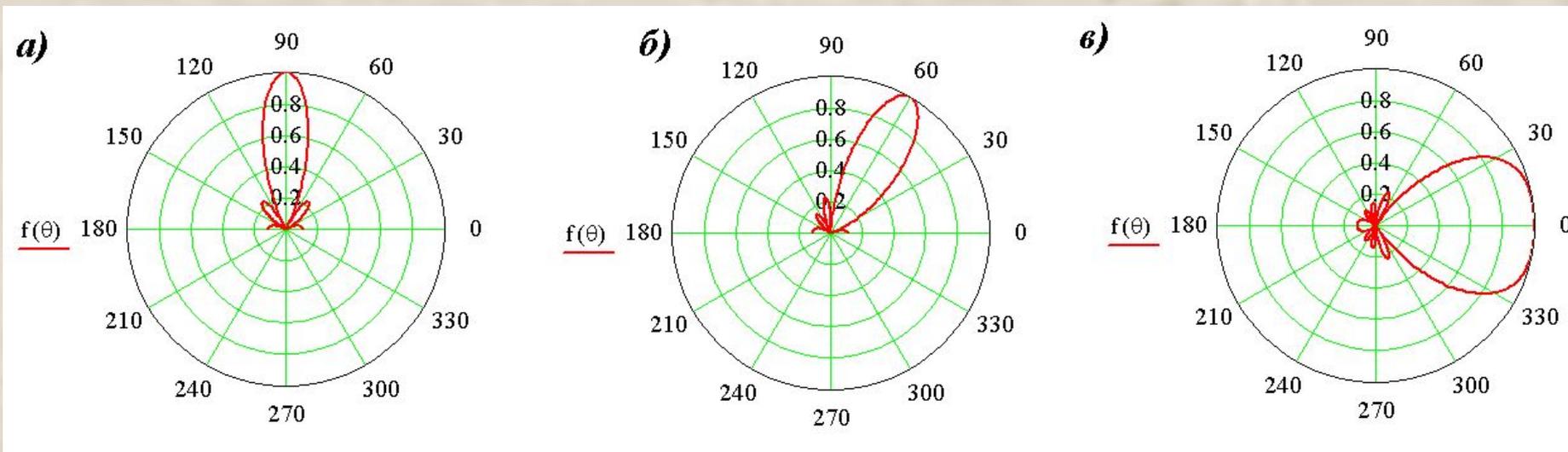


Рисунок 9 – Нормированные диаграммы направленности 9-ти элементной антенной решетки из девяти ненаправленных излучателей в нормальном, наклонном и осевом режимах работы

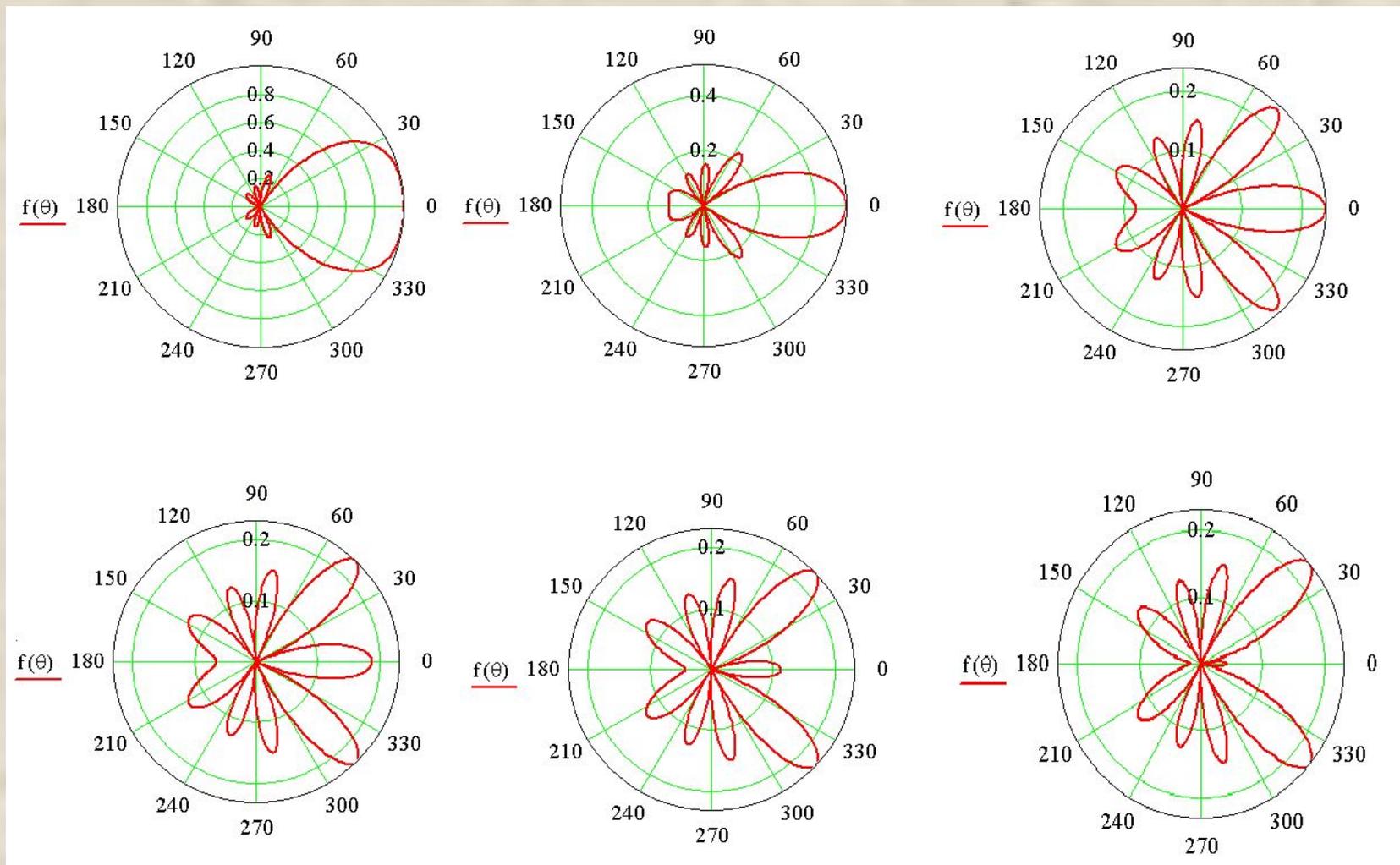


Рисунок 10 – Характерные изменения в ДН 7-ми элементной решетки изотропных излучателей при приближении сдвига фаз токов соседних излучателей к критическому значению

Анализ приведенных ДН показывает, что по мере роста сдвига фаз между токами соседних элементов происходит вначале сужение главного лепестка и увеличение УБЛ (относительного уровня боковых лепестков), а затем уменьшение уровня сигнала в главном лепестке вплоть до исчезновения излучения вперед вдоль оси АР при достижении сдвига фаз критического значения. Оптимальное и критическое значения сдвига фаз при этом можно оценить выражениями вида:

В каждом из режимов излучения существуют ограничения на шаг решетки в части роста уровня боковых лепестков и существования вторичных (дифракционных) максимумов:

$$1) \text{Нормальный режим } d \leq \frac{\lambda}{2} \quad ; \quad 2) \text{Осевой режим } d \leq \frac{\lambda}{2(1 + \cos \theta_{\text{гл}})}$$

$$3) \text{Наклонный режим } d \leq \frac{\lambda}{2(1 + \psi / kd)}$$

4. Направленные свойства плоских

Линейная АР обладает острой направленностью лишь в одной из главных плоскостей, в то время как плоские АР позволяют сформировать излучение в узком телесном угле. Излучатели располагаются в узлах прямоугольной или треугольной сетки. Расположение излучателей в треугольной сетке предпочтительней, так как увеличивается расстояние между излучателями и ослабляется

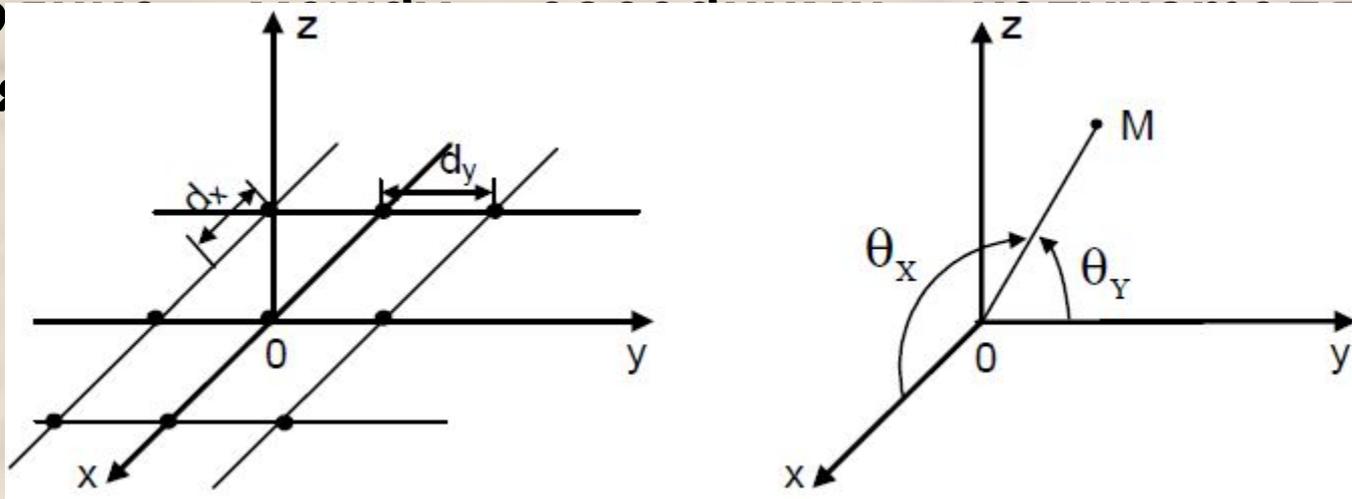


Рисунок 11 – Расположение в пространстве эквидистантной прямоугольной равноамплитудной

Каждый столбец излучателей есть прямолинейная линейно-фазная равноамплитудная АР изотропных излучателей, чья нормированная ХН задана в виде:

$$F_{c_x}(\theta_x) = \left| \frac{1}{f(\theta_{x_{\text{ГП}}})} \cdot \frac{\sin \left[\frac{N_x}{2} (kd_x \cos(\theta_x) - \psi_x) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd_x \cos(\theta_x) - \psi_x) \right]} \right| \quad (1)$$

Теперь заменим каждый столбец на отдельный воображаемый излучатель с ХН, определяемой выражением (1). В результате получим антенную

кennung на рис. 12. По теореме перемножения

ДН:

$$F_c(\theta_x, \theta_y) = \left| \frac{1}{f(\theta_{x_{\text{ГП}}})} \cdot \frac{\sin \left[\frac{N_x}{2} (kd_x \cos(\theta_x) - \psi_x) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd_x \cos(\theta_x) - \psi_x) \right]} \right| \cdot F_{c_y}(\theta_y)$$

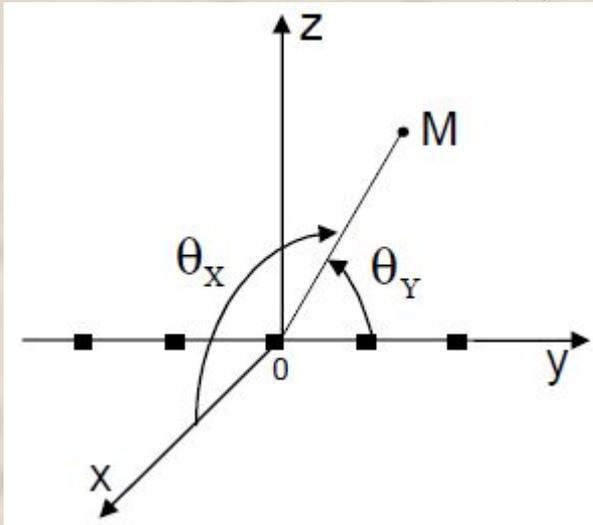


Рисунок 12

ХН прямолинейной ***АР*** из гипотетических излучателей, ориентированных вдоль оси y определим в виде:

$$F_{c_y}(\theta_y) = \left| \frac{1}{f(\theta_{y_{\GammaЛ}})} \cdot \frac{\sin \left[\frac{N_y}{2} (kd_y \cos(\theta_y) - \psi_y) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd_y \cos(\theta_y) - \psi_y) \right]} \right|$$

Окончательное выражение *ХН* плоской *АР* имеет вид:

$$F_c(\theta_x, \theta_y) = \left| \frac{1}{f(\theta_{x_{\GammaЛ}}) f(\theta_{y_{\GammaЛ}})} \cdot \frac{\sin \left[\frac{N_x}{2} (kd_x \cos(\theta_x) - \psi_x) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd_x \cos(\theta_x) - \psi_x) \right]} \cdot \frac{\sin \left[\frac{N_y}{2} (kd_y \cos(\theta_y) - \psi_y) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd_y \cos(\theta_y) - \psi_y) \right]} \right|$$

Перейдем от координат θ_x, θ_y к сферическим координатам, воспользовавшись рисунком 13.

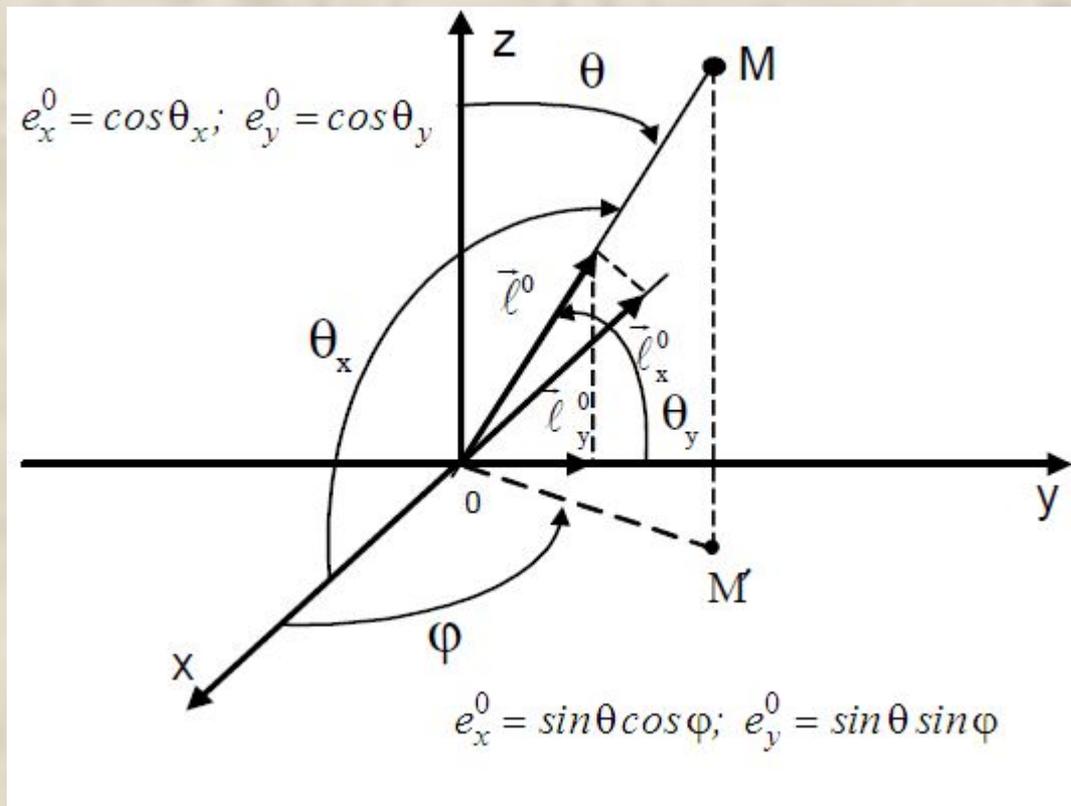
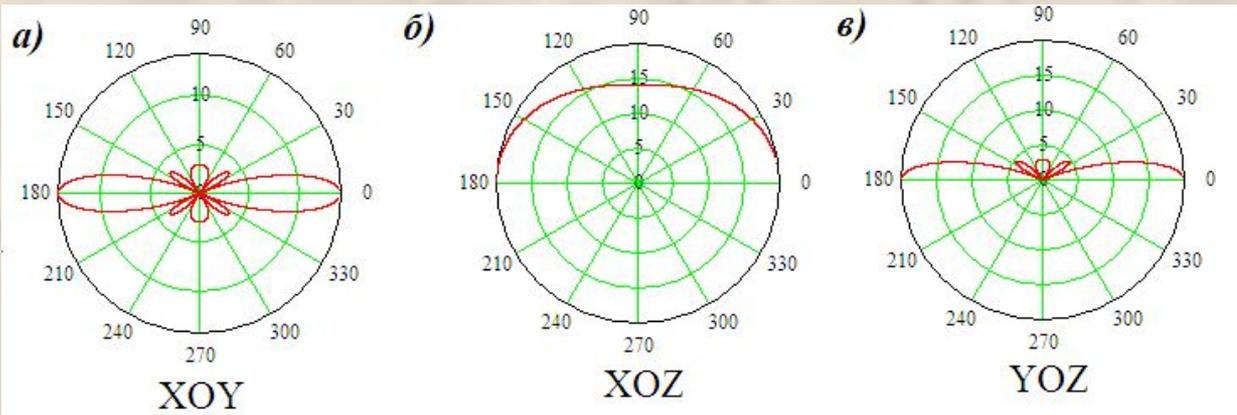
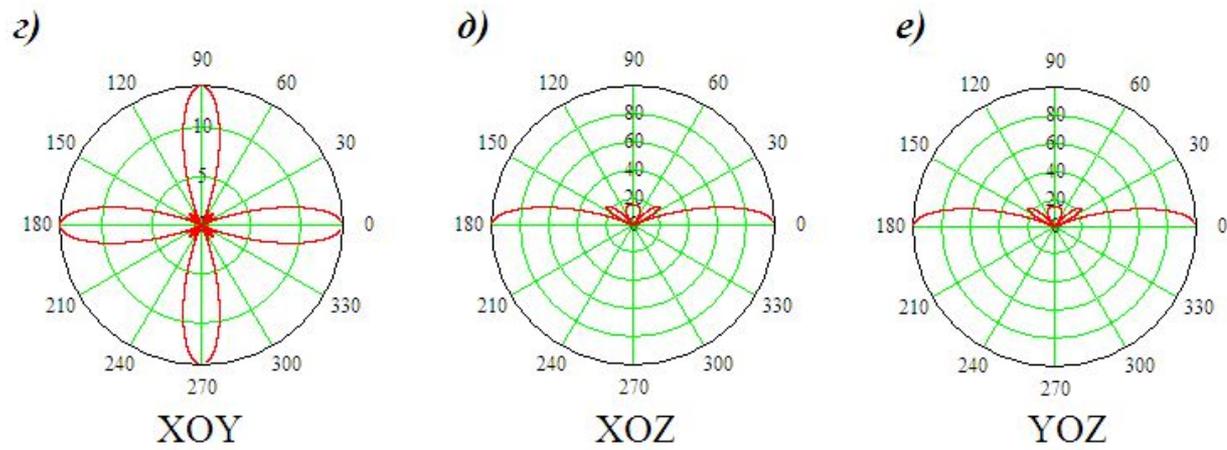
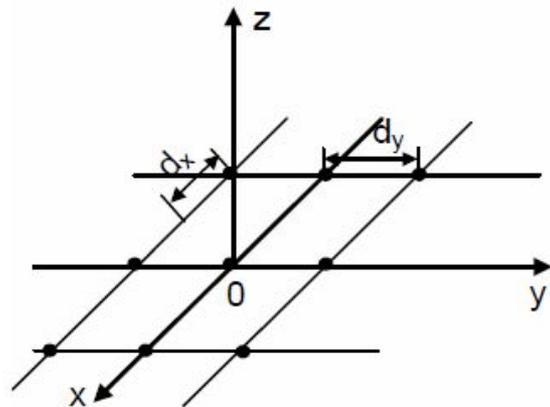


Рисунок 13

$$F_c(\theta_x, \theta_y) = \left| \frac{1}{f(\theta_{x_{\Gamma I}}) f(\theta_{y_{\Gamma I}})} \cdot \frac{\sin \left[\frac{N_x}{2} (kd_x \sin \theta \cos \varphi - \psi_x) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd_x \sin \theta \cos \varphi - \psi_x) \right]} \right| \times \left| \frac{\sin \left[\frac{N_y}{2} (kd_y \sin \theta \sin \varphi - \psi_y) \right]}{\sin \left[\frac{1}{2} (kd_y \sin \theta \sin \varphi - \psi_y) \right]} \right|.$$

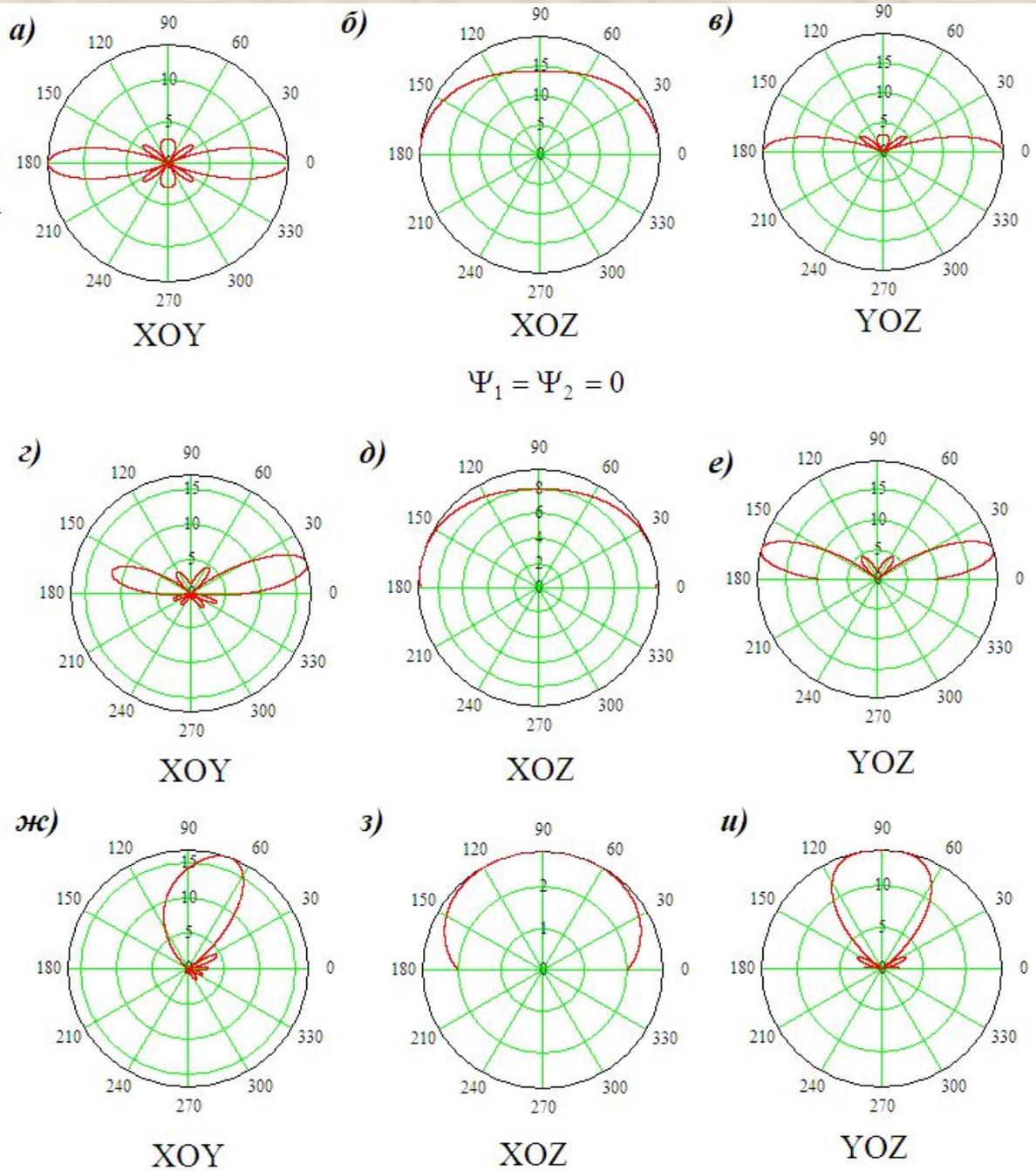


$$N_x = 2; N_y = 10; d_x = d_y = 0,25\lambda; \Psi_1 = \Psi_2 = 0; F_1(\theta, \varphi) = 1$$



$$N_x = N_y = 10; d_x = d_y = 0,25\lambda; \Psi_1 = \Psi_2 = 0; F_1(\theta, \varphi) = 1$$

Рисунок 14 – Ненормированные амплитудные ДН плоской прямоугольной АР из изотропных излучателей в нормальном режиме работы



$$\Psi_1 = \Psi_2 = 0$$

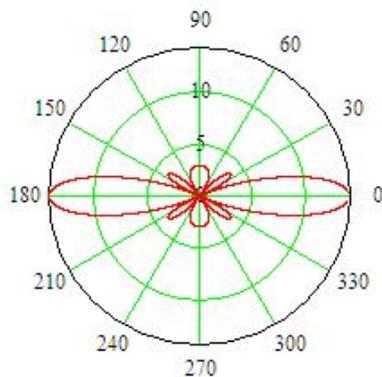
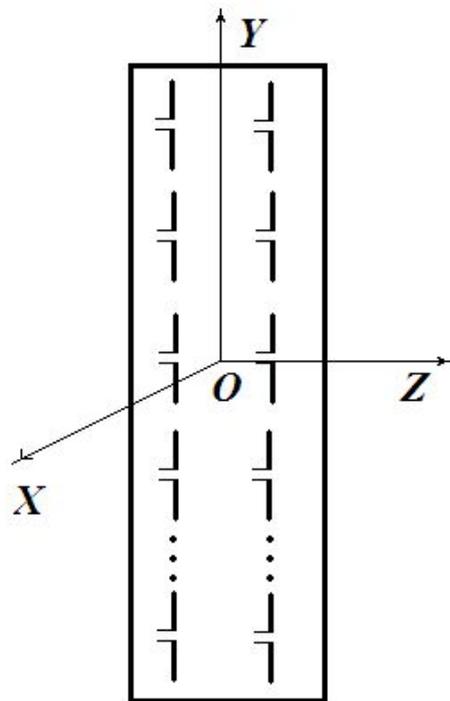
Рисунок 15 – амплитудные ДН АР из изотропных излучателей:

$$N_x = 2; N_y = 10; d_x = d_y = 0,25\lambda;$$

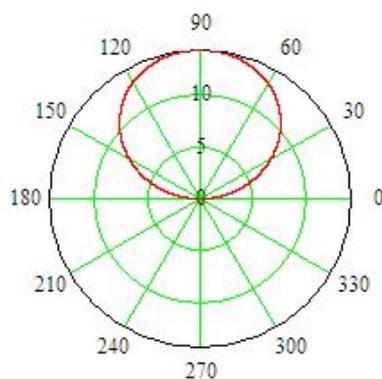
$$\Psi_1 = \Psi_2 = 0 \text{ (а);}$$

$$\Psi_1 = \Psi_2 = 0, 25kd_x = 0, 25kd_y \text{ (б);}$$

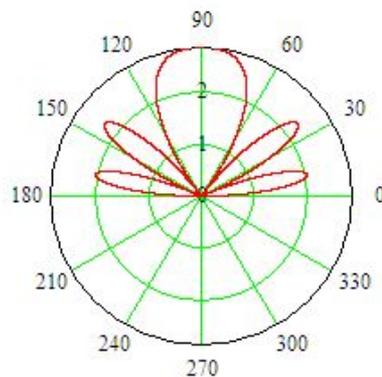
$$\Psi_1 = \Psi_2 = kd_x = kd_y \text{ (в);}$$



XOY



XOZ



YOZ

**Рисунок 16 –
Амплитудны
еДН в
главных
плоскостях
панельной
антенны
базовой**

**$N_x = 2$; $N_y = 10$;
станций:**

$d_x = d_y = 0,25\lambda$;

$\Psi_1 = \Psi_2 = 0$