

Многолучевые и сканирующие антенны

Лекция 14

Сканирующие антенны.

Способы сканирования:

1- механический- поворот всей антенны, инерционен;

2-электромеханический-электродвигатели или электромагниты осуществляют перемещение элементов антенн, что приводит к наклону эквифазной поверхности поля при неподвижном раскрыве. Инерционность меньше, т.к. меньше массы.

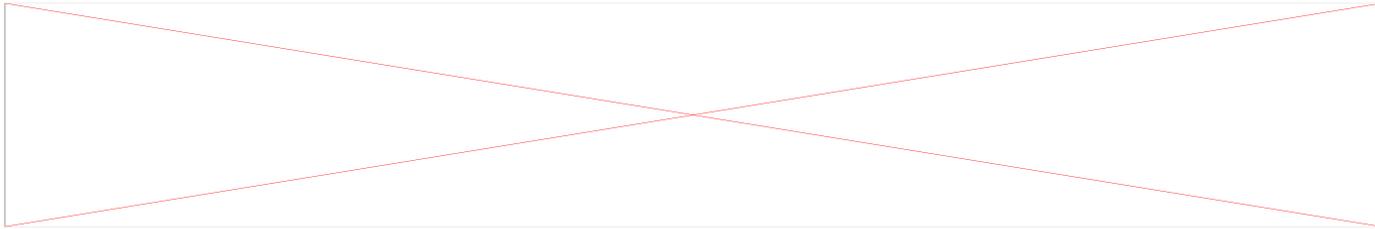
Скорость коммутации луча ДН в обоих способах не удовлетворяет современным скоростям, нельзя одновременно следить за несколькими объектами.

3- электрический- обеспечивает наибольшую скорость перемещения луча ДН, ограничивается переходными процессами в управляющих элементах, инерция на несколько порядков меньше.

$$F(\theta) = \sum_{n=1}^N J_n e^{j\varphi_n} e^{jkd_n \sin \theta} \quad (1)$$

Пусть 

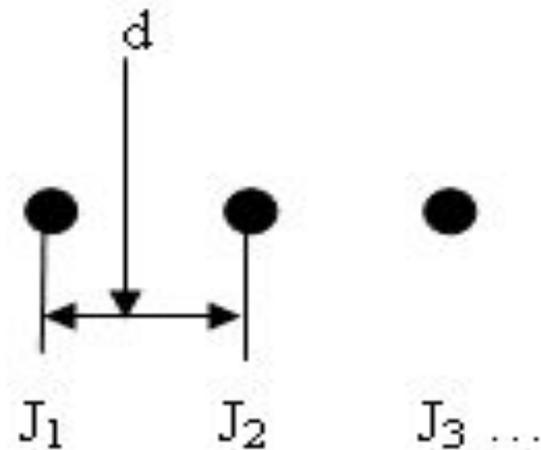
Определяет положение макс в пространстве



$$\sin \theta_m = \frac{\Delta \psi}{2\pi} \frac{d}{\lambda} + \frac{m}{d} = f\left(\Delta \psi, \frac{d}{\lambda}\right) \quad (2)$$

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

применяется в в антенных решетках



Способа электрического сканирования

- фазовый способ - путем регулирования фазовых сдвигов возбуждения элементов решетки;
- амплитудный способ – путем коммутации парциальных ДН в многоуголучевой антенной системе;
- способ частотного сканирования, когда фазовые сдвиги в излучающих элементах решетки регулируются за счет изменения частоты колебаний АР с фазовым сканированием – фазированные АР.

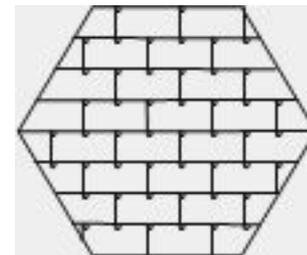
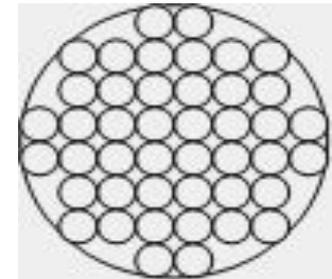
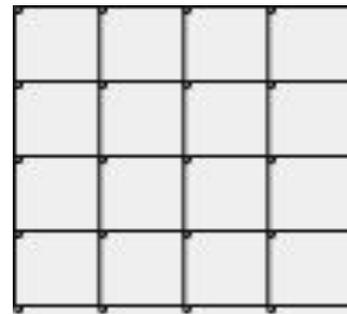
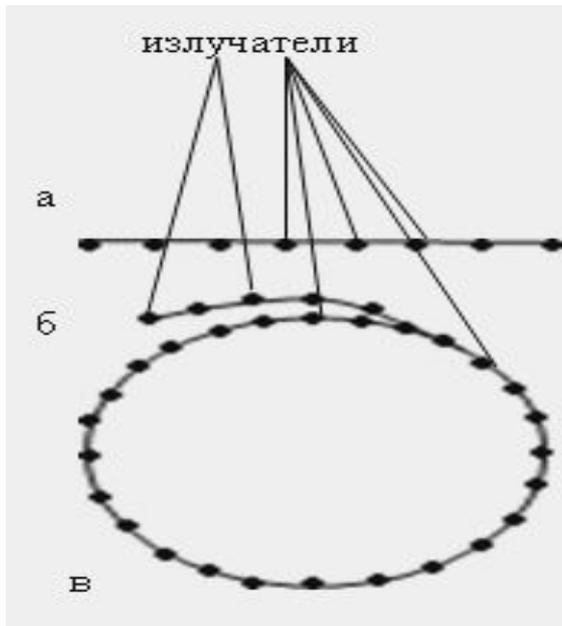
Фазированная антенная решетка - решетка излучателей в которой перемещение луча в пространстве производится путем введения переменных фазовых сдвигов между токами, возбуждающими отдельные излучатели.

По характеру размещения излучателей в решетке бывают:

- Эквидистантные решетки,
- Неэквидистантные.

В зависимости от геометрии расположения излучателей в пространстве ФАР делятся на:

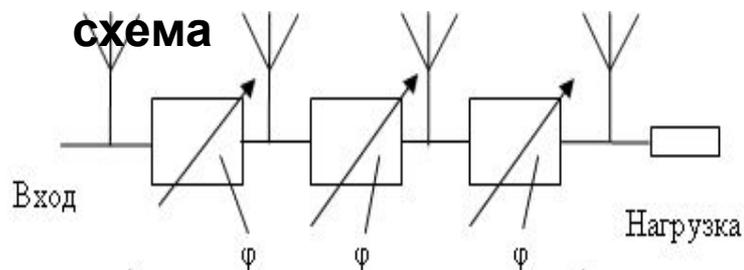
- одномерные,
- двумерные,
- трехмерные .



По способу возбуждения ФАР подразделяются на решетки

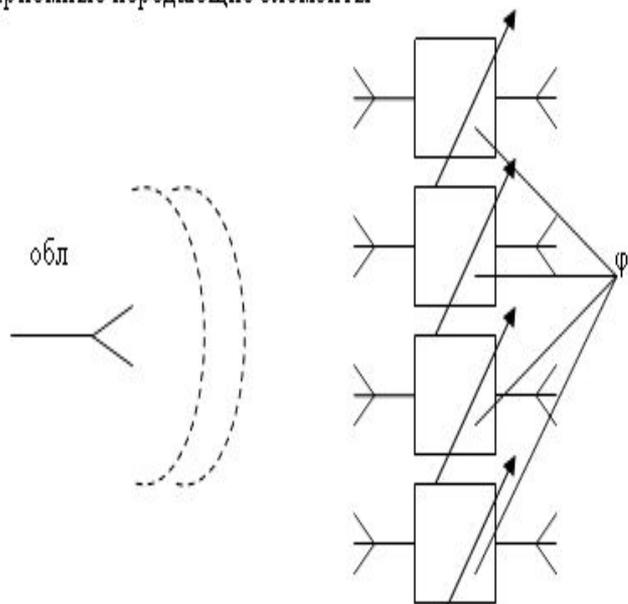
- с фидерным питанием,
- с оптическим питанием- возбуждаются через пространство волной излученной облучателем.

Последовательная схема



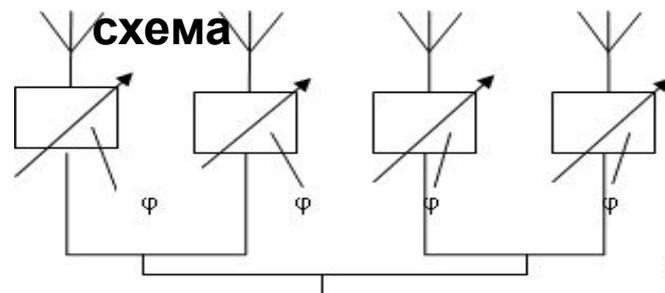
Возбуждение осуществляется волной бегущей вдоль фидера

приемные передающие элементы



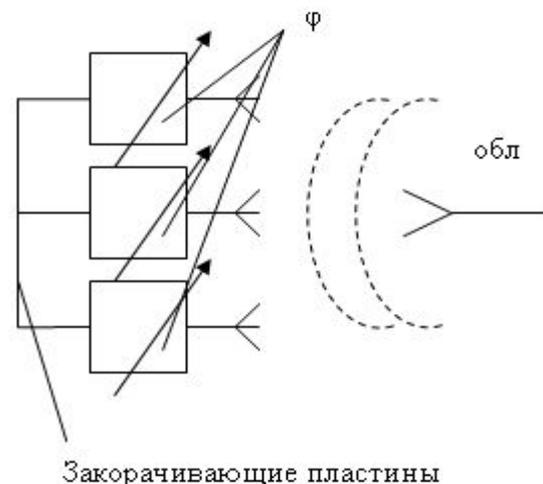
– отдельные решетки;

Параллельная схема



Элементы решетки возбуждается независимо

приемные передающие элементы



Закорачивающие пластины

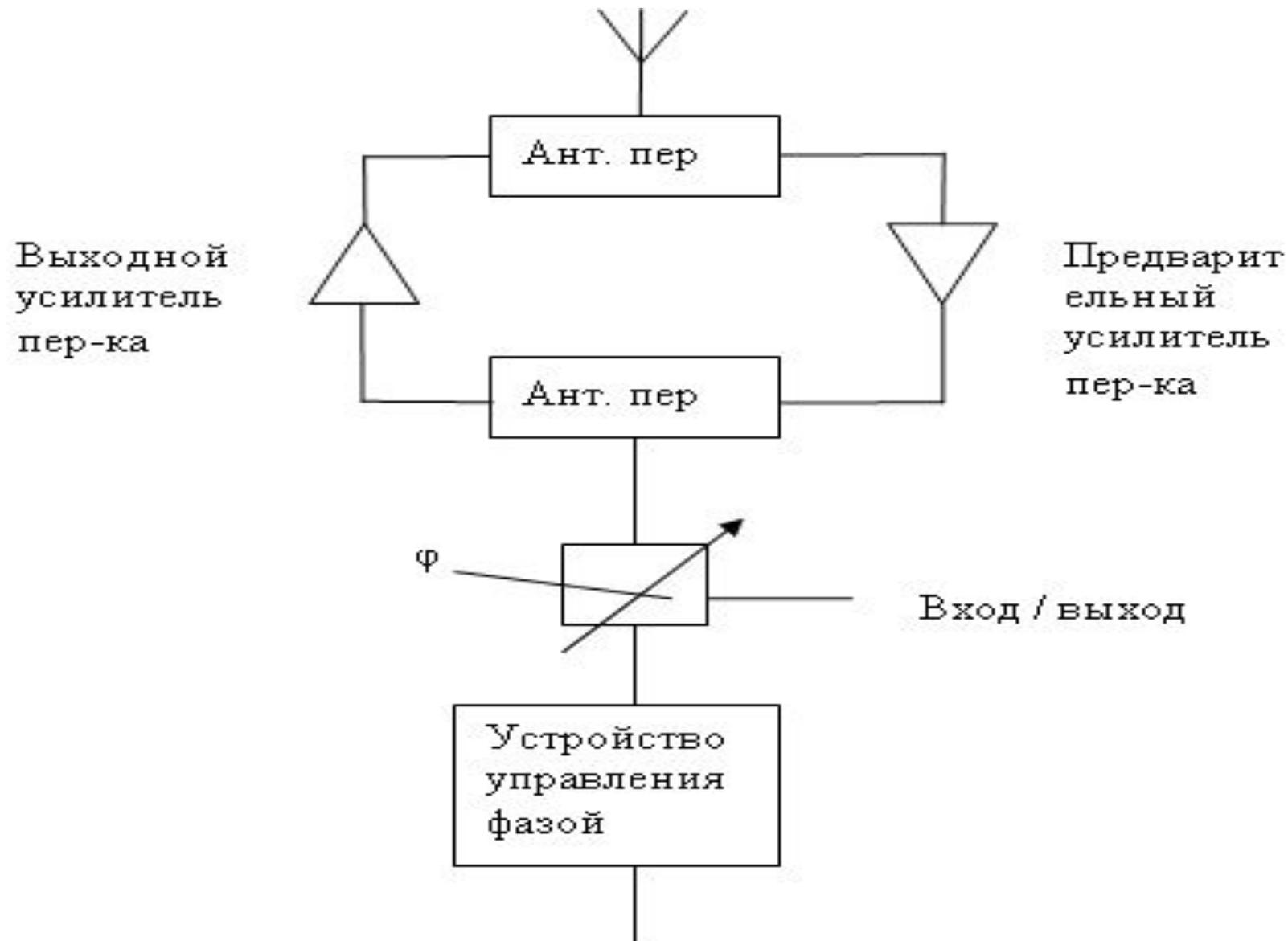
– совмещенные решетки

Типы схем ФАР:

- **пассивная** – а) – проходная ФАР (линзового типа) – трудно генерировать большие мощности.

б) – отражательная ФАР (зеркального типа) облучатель в поле отраженной волны, что уменьшает КИП и увеличивает УБЛ, ухудшается (уменьшается) потери в фазовращателе. $\frac{P_C}{P_{III}}$

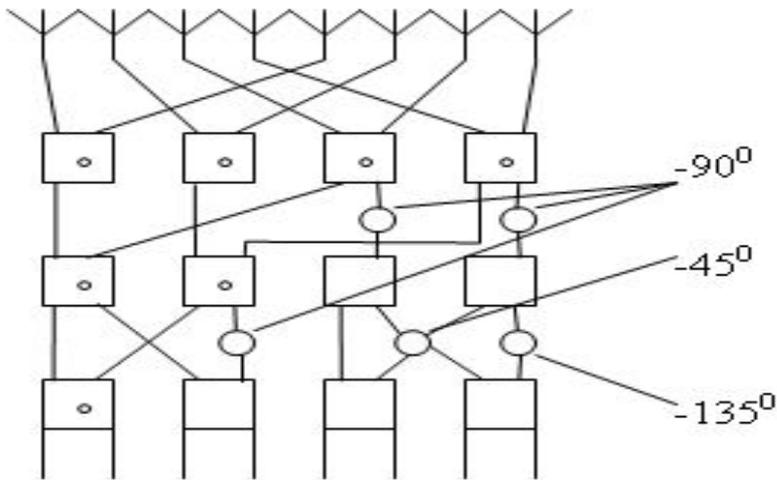
- **активная** – в канале питания каждого элемента решетки имеется фазированный генератор или усилитель мощности.
- **полуактивная** – полуактивная ФАР объединяет достоинства и недостатки схем с пассивными и активными элементами.



Фазовращатель работает при низком уровне мощности

Многолучевые А.Р.

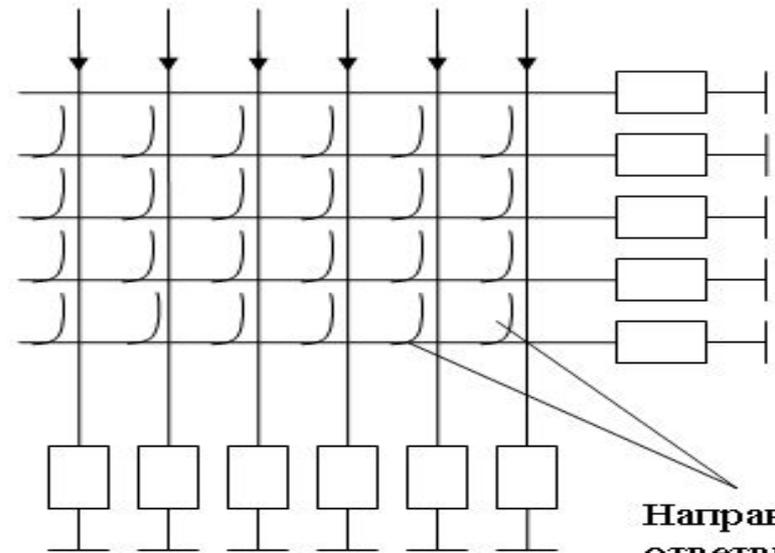
$i = 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8$



$j \ 15 \ 26 \ 37 \ 48$

$j =$

1
2
3
4
5



Направление
ответвит.

матрицы Батлера параллельная
ДОС
число излучателей $2n(n= 2,3\dots)$.

Матрица Бласса последовательная ДОС

Недостаток: большое число
направленных
ответвителей,
снижение из-за потерь мощности

Множитель ФАР

$$f_{\Sigma} = \frac{\sin \frac{N}{2} (kd \sin \theta - \xi)}{\sin \frac{1}{2} (kd \sin \theta - \xi)}$$

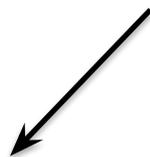
N -число излучателей,

d -расстояние между излучателями,

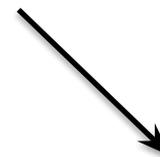
ξ -сдвиг фазы питания между соседними элементами.

$$\xi = \Delta \psi$$

**Способы электрического управления луча в
фазированных антенных решетках**



**1. Частотный способ
качания**



**2. Фазовый способ
качания**

При изменении f (несущая частота гетеродина) направление главного максимума перемещается

- за счет изменения величины λ ,
- за счет зависимости от f (частоты) величины $\Delta\psi$ (сдвига фазы питания).

Углочастотная чувствительность.

$$g = \frac{d\theta}{\frac{df}{f} \cdot 100}, \frac{\text{град}}{\%} \quad (3)$$

определяет отклонение луча в градусах на 1% изменения частоты

Для перемещения луча в достаточно широком спектре $g = 5-10 \frac{\text{град}}{\%}$

$$g = \frac{0,573}{\cos \theta_m} \left(\frac{c}{2\pi d} \frac{d\Delta\psi}{df} - \sin \theta_m \right) \quad (4)$$

$$\lambda \cdot f = c$$

0,573 -коэффициент перехода от радиана к

Схемы возбуждения излучателей

- **Последовательная схема**, излучатели питаются бегущей волной.

сдвиг по фазе:

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{\lambda_{\Phi}} \cdot l \quad (5)$$

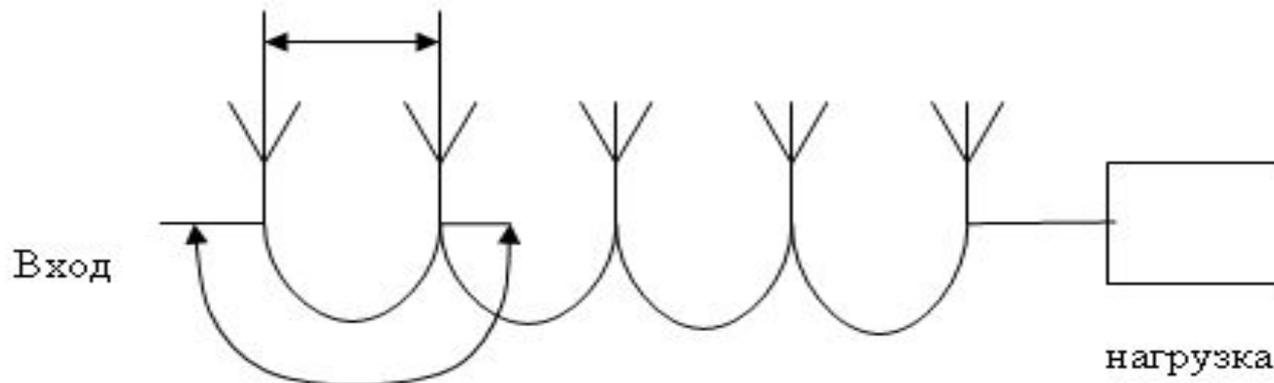
дифференцируя:

$$\frac{d\Delta\psi}{df} = -\frac{2\pi}{\lambda_{\Phi}^2} \frac{d\lambda_{\Phi}}{df} l \quad (6)$$

имеем:

$$g = \frac{0,573}{\cos\theta_m} \left(\frac{C}{\lambda^2} \frac{l}{d} \frac{d\lambda_{\Phi}}{df} + \sin\theta_m \right) \quad (7)$$

d расстояние между излучателями



l длина отрезка фидера между

Для увеличения g надо

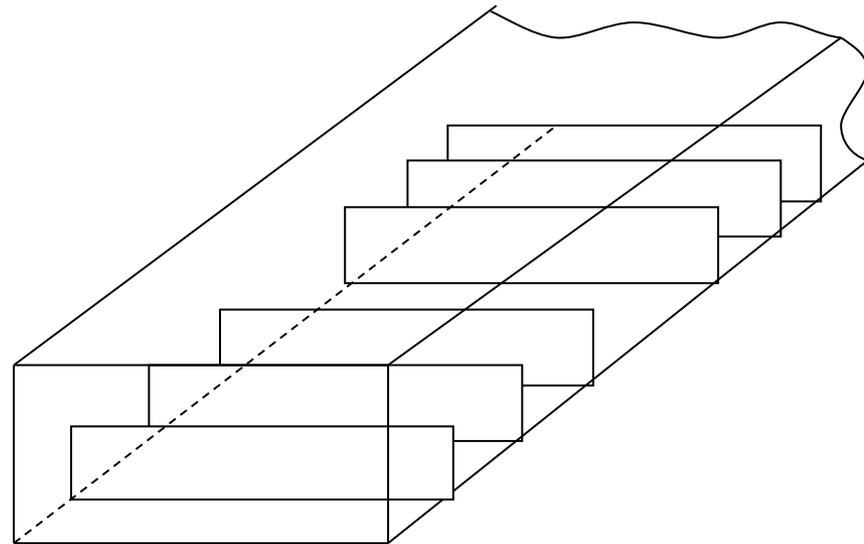
- увеличивать, $\frac{d\lambda_\phi}{df}$ т.е. использовать фидер с ярко выраженной дисперсией (используют замедляющие структуры гребенку)

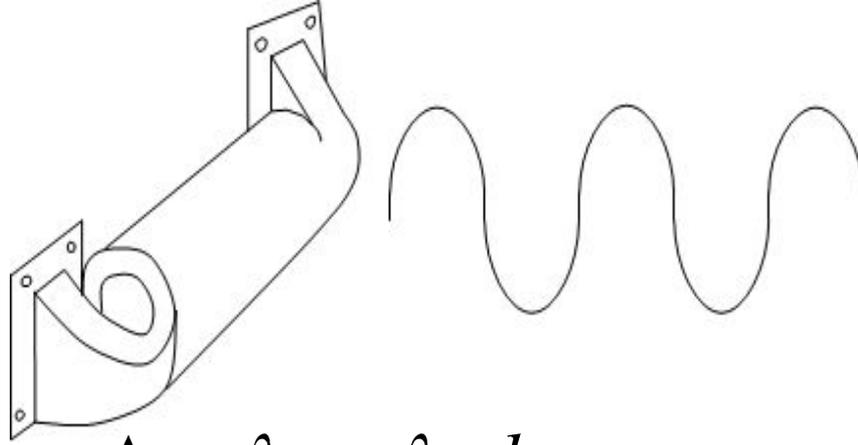
$$g \approx 10 \frac{\text{град}}{\%}$$

- увеличивать отношения $\frac{l}{d}$ геометрическое замедление в системе.

Недостаток:

- ограниченная величина пропускаемой мощности,
- заметные потери, снижающие КПД антенны,
- замедления за счет геометрии системы реализуется с помощью спиральных или змейковых волноводов.





Если $l \gg d$, $\frac{\Delta\psi}{2\pi} \frac{\lambda}{d} = \frac{\lambda}{\lambda_\phi} \frac{l}{d} \gg 1$,

$g = (5-10) \frac{\text{гр.}}{\%}$, $\frac{l}{d} \sim 5$ — относительный набег фазы

Достоинство:

- Простота.

Недостатки:

- большое затухание,
- ограничения по пропускаемой мощности,
- высокие требования к точности изготовления элементов системы.

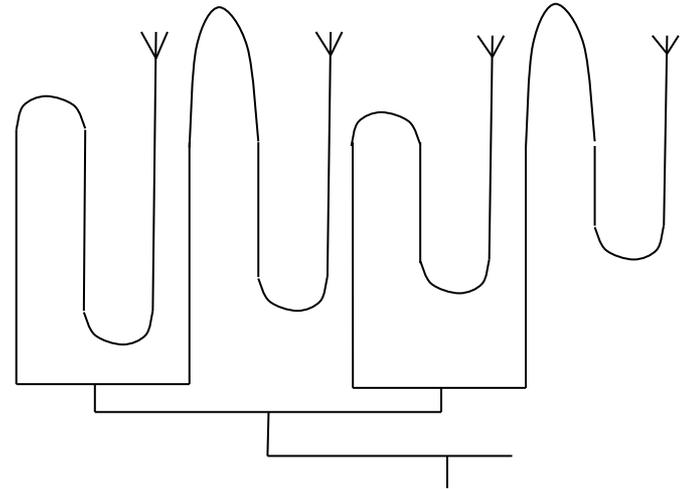
В параллельной схеме питание излучателей производится через отдельные фидеры, длина которых различна и линейно увеличивается при переходе от одного излучателя к другому.

$\Delta\psi$, $\frac{d\Delta\psi}{df}$ определяется выражением (5), (6)

чем больше l тем выше g .

Схема

- более сложна,
- требует применения большого числа диапазонных делителей мощности,
- пропускает большую мощность,
- менее чувствительна к неточностям изготовления.



Фазовый способ управления

Фаза излучателей изменяется по заданному закону с помощью электрически управляемых фазовращателей, линий задержки и других фазосдвигающих устройств.

$$\theta_{ГЛ} = f(\Delta\psi)$$

Основные схемы решеток с фазовым управлением:

- последовательная,
- параллельная,
- смешанная схема.

Последовательная схема.

На участках питающей линии между соседними излучателями включены одинаковые фазовращатели, изменяющие фазу на один и тот же угол. Для управления фазовращателями нужен один управляющий сигнал.

Достоинство

-Проста система управления.

- Недостаток:

- малая пропускаемая мощность,
- большие потери,
- Высокие требования к точности изготовления из-за накопления ошибок фазовращателя(требуется высокая стабильность работы фазовращателя и их источников питания.)

Используется в небольших антеннах с механическими фазовращателями, стабильность которых высока, потери малы, а пропускаемая мощность достаточно велика.

Параллельная схема

Достоинство:

- через каждый фазовращатель проходит $1/N$ часть мощности,
- ограничения по мощности ослаблены,
- общие потери энергии примерно равны потерям в отдельном фазовращателе в последовательной схеме.
- ослаблены требования к стабильности фазовращателей.

Недостаток:

- сложность системы управления,
- каждый фазовращатель должен управляться по своему закону. При этом крайние фазовращатели должны обеспечить весьма большой сдвиг по фазе.

- θ_0 угол отклонения луча антенны.
- $\frac{\Delta\psi}{d}$ изменение фазы на единицу длины и используя соотношение (2) при $m = 0$, получаем:

Сдвиг фазы на половине длины антенны:

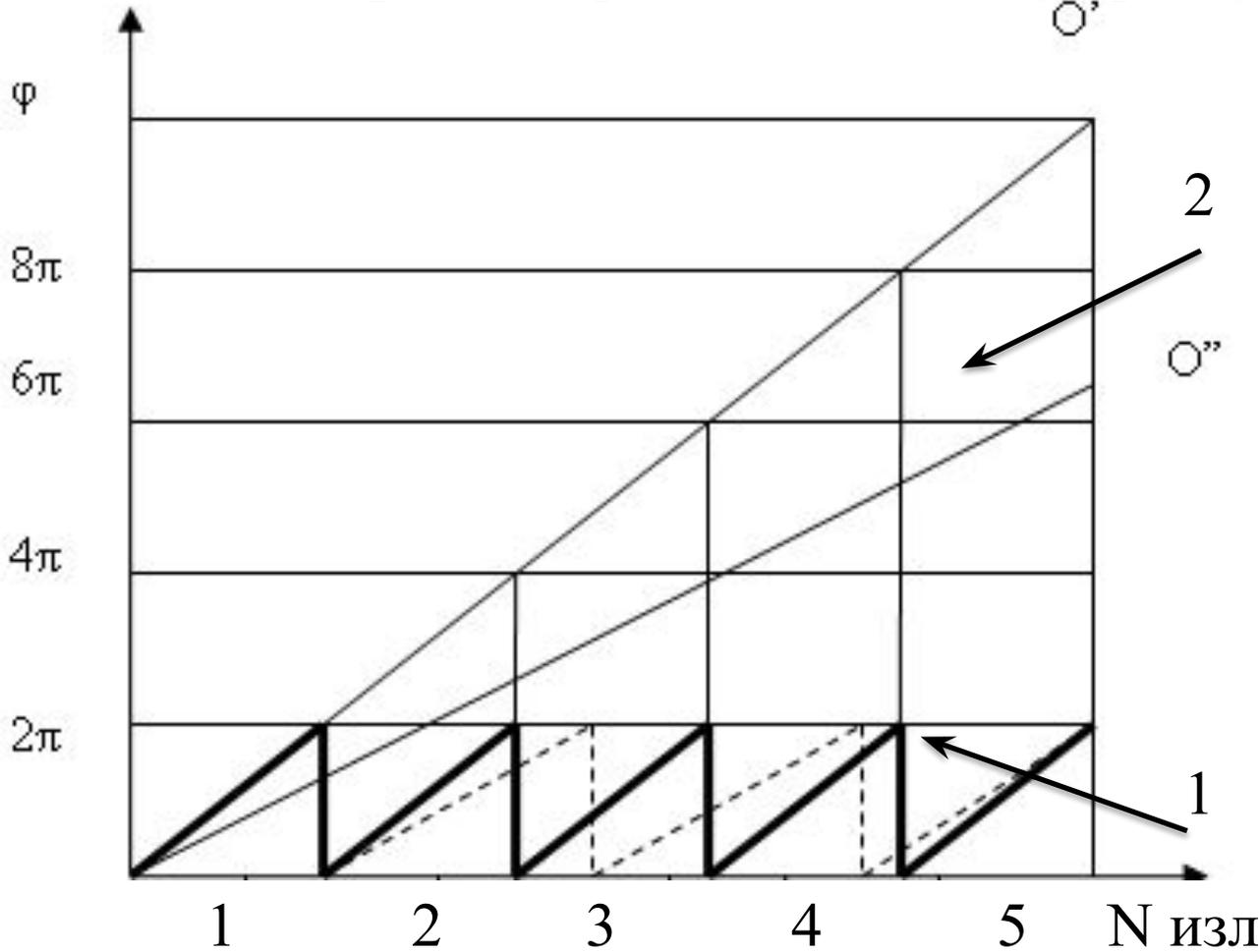
$$\frac{\Delta\psi}{d} \frac{L}{2} = \frac{\pi \sin \theta_0}{\lambda/L} \approx \frac{\pi \sin \theta_0}{2\theta_{0,5P}} \approx \frac{\pi\theta_0}{2\theta_{0,5P}} \quad (8)$$

чем уже ДН, тем требуется большее изменение фазы

$$\frac{\theta_0}{2\theta_{0,5P}} = 10 \quad -1800^\circ < \psi < +1800^\circ$$

Применяют фазовращатели с изменением фазы 2π

Для управления фазовым распределением в решетке используют схемы со «сбросом» фазы на величину кратную 2π



1-пилообразная линия с точностью до 2π определяет линейное фазовое распределение $OO''(2)$

время_запаздывания $\frac{(N-1)d}{c} \sin \theta_0 > T_{вч}$

Обеспечивается узкополосность решетки, усложняет схему управления

Способы управления фазой

1. Непрерывный способ -дает «чистую» ДН, сложен в осуществлении, т.к. на фазовращатель надо подавать плавно меняющиеся управляющие сигналы, на характеристики f сист влияют температурные неустойчивости.

2. Дискретный способ - изменение фазы происходит скачком с дискретом.

$$\Delta\psi = \frac{2\pi}{M_\phi}, \text{ где } M_\phi = 2^\nu, \text{ где } \nu = 1, 2, 3 \dots$$

разрядность фазовращателя

- появляются фазовые ошибки, приводящие к искажениям ДН,
- увеличению УБЛ,
- снижению КНД.

$$\varphi_{TP}(Z) = -kz \sin \theta_0 \quad (9)$$

требуемое идеальное фазовое распределение, обеспечивающее отклонение луча на угол θ .

$$\varphi_P(Z) = -i\Delta\varphi \quad i = 0, 1, \dots, M\phi - 1 \quad (10)$$

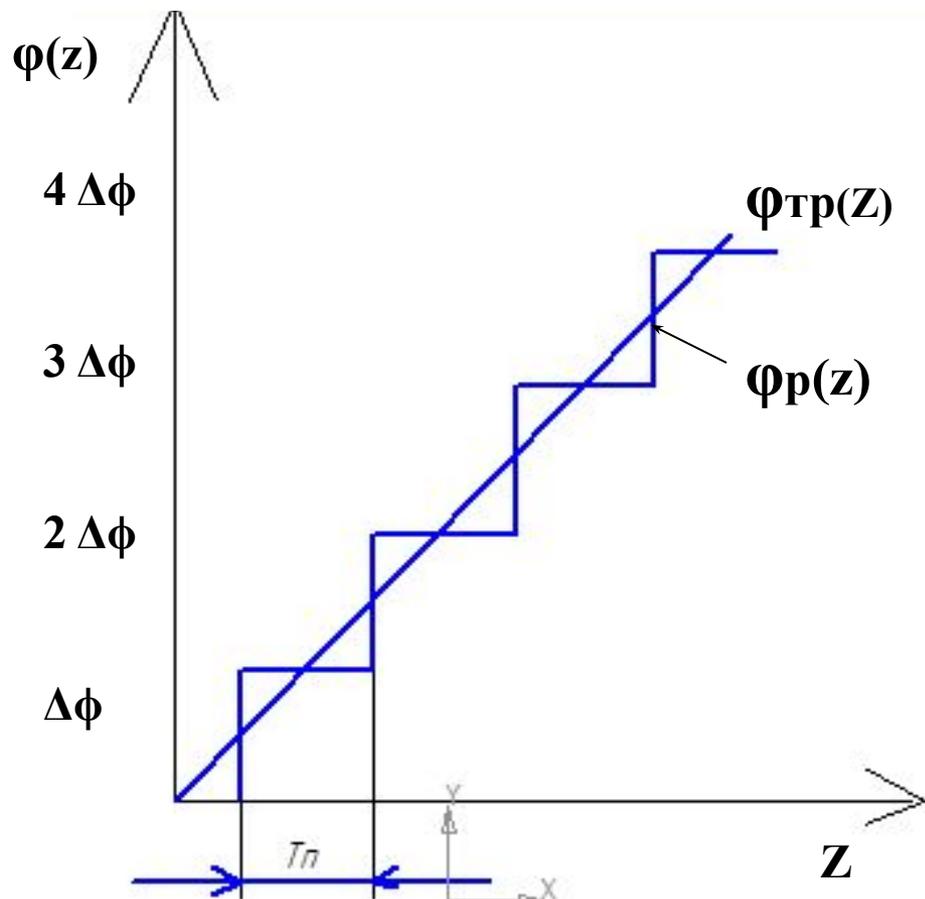
реальное фазовое распределение при дискретном фазировании.

$$\delta\varphi = \varphi_P - \varphi_{TP}$$

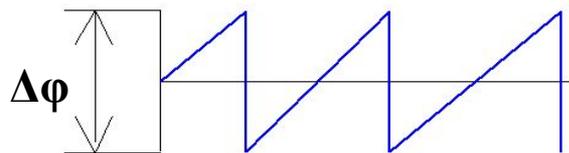
фазовая ошибка, при аппроксимации функции (9), представляет периодическую пилообразную функцию.

$$(11) \quad kT_{\Pi} = \sin \theta_0 = \Delta\varphi$$

$$(11') \quad T_{\Pi} = \frac{\Delta\varphi}{k \sin \theta_0}$$



Комбинация подрешеток
одинаковой
длины **T_{Π} -фазовая ступенька**



Прямофазная равномерная решетка

$$f_{\Sigma}(\theta) = \frac{\sin\left(\frac{M}{2} kd \sin \theta\right) \sin \frac{\rho}{2} (kT_{\Pi} \sin \theta - \Delta\varphi)}{M \sin\left(\frac{1}{2} kd \sin \theta\right) \rho \sin \frac{1}{2} (kT_{\Pi} \sin \theta - \Delta\varphi)}$$

$f_{\text{подр}}$

$f_{\Sigma \text{ подр}}$

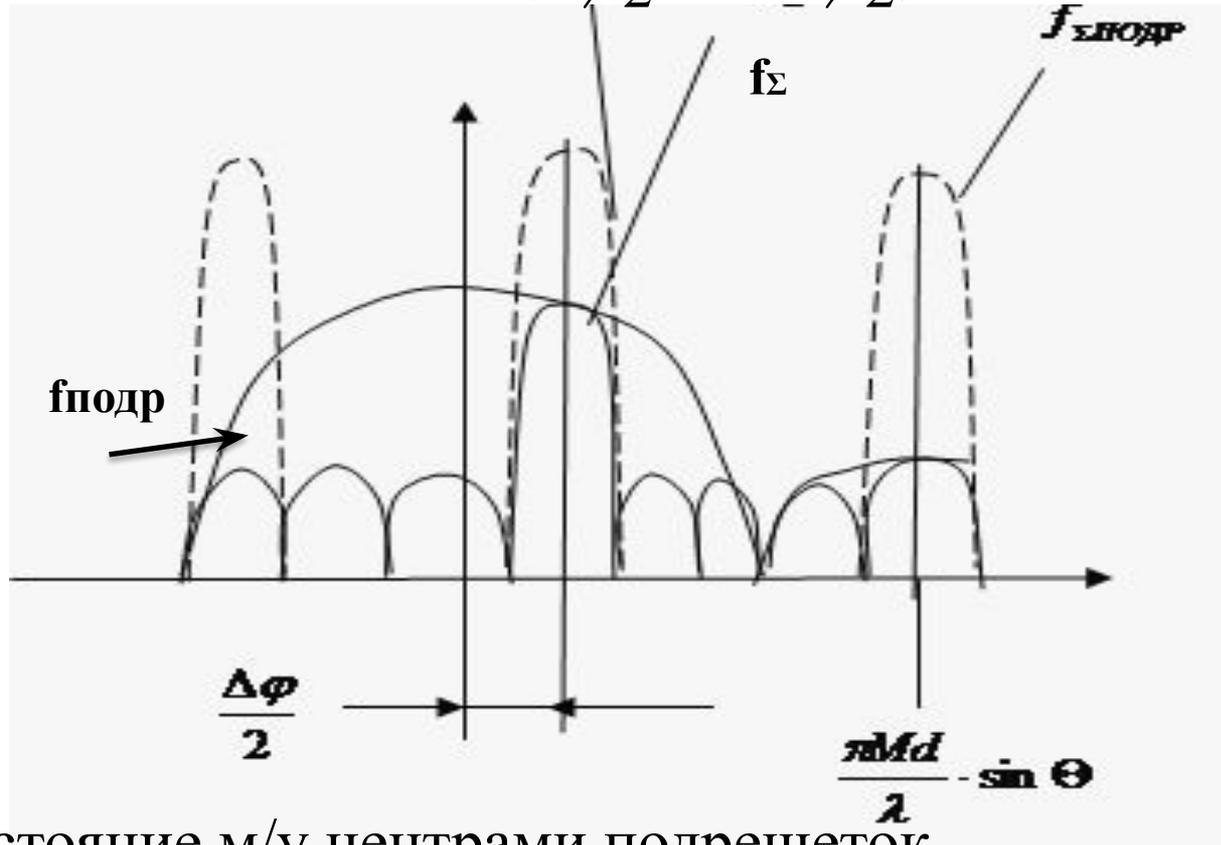
(12)

$$\rho = \frac{L}{T_{\Pi}} \quad \text{- число подрешеток}$$

Множитель подрешетки имеет максимум при

$$kd \sin \theta = n2\pi, n = 0, \pm 1 \dots$$

$d \approx \frac{\lambda}{2}$ между излучателями, $(-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2)$ - 1 максимум при $n=0$



$T_{\Pi} \gg d$ расстояние м/у центрами подрешеток

Условие определения положение главных максимумов

$$kT_{\Pi} \sin \theta_m - \Delta\varphi = m2\pi, m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (13)$$

$$\sin \theta = \frac{\Delta \varphi}{kT_{\Pi}} + m \frac{\lambda}{T_{\Pi}}, \quad (14)$$

$$\sin \theta_m = \sin \theta_0 \left(m \frac{2\pi}{\Delta \varphi} + 1 \right), \quad (15)$$

учитывая $kT_{\Pi} \sin \theta_0 = \Delta \varphi$, (11)

имеем смещение гл. максимума $\frac{\pi M d}{\lambda} \sin \theta_0 = \frac{kT_{\Pi} \sin \theta_0}{2} = \frac{\Delta \varphi}{2}$, (16)

Подставляя (14) в (12), найдем $f_{\Sigma_{\text{сист.}}}$ в точках соответствующих максимумам $f_{\Sigma_{\text{подр.}}}$.

$$f_{\Sigma}(\theta_m) = \frac{\sin \frac{\Delta \varphi}{2}}{M \sin \left(\frac{\Delta \varphi}{2M} + \frac{\pi m}{M} \right)} \quad (17)$$

при $M \gg 1$ получим

$$f_{\Sigma}(\theta_m) \cong \frac{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}{\frac{\Delta\varphi}{2} + m\pi}$$

при $m = 0$

$$f_{\Sigma} = \frac{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}{\frac{\Delta\varphi}{2}} \quad (18)$$

КНД при дискретном способе управления фазой

$$D = D_0 = \frac{\sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}}{\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right)^2} = D_0 KИП_{\text{д}}$$

D_0 - КНД при непрерывном фазировании,

$KИП_{\text{д}}$ - коэффициент, определяющий снижение КНД из-за дискретности фазирования излучателей.

$f_{\Sigma}(\theta_m)$ при $m \neq 0$ характеризует уровни коммутационных лепестков – паразитных боковых лепестков, обусловленных дискретностью фазирования.

При $d \approx \frac{\lambda}{2}$ число коммутационных лепестков M .

$M-1$ лепесток (кроме лепестка $m = 0$) – коммутационные боковые лепестки,

Наибольшую величину имеет лепесток с номером $m = -1$.

$$F_B \Big|_{m=-1} = \frac{\frac{\Delta\varphi}{2}}{\frac{\Delta\varphi}{2} - \pi} \quad (19)$$

Снижение КНД и уровни паразитных коммутационных лепестков при различных дискретах фазы

| $\Delta\varphi$ | π | $\pi/2$ | $\pi/4$ | $\pi/8$ |
|-----------------|-------------|--------------|-------------|---------------|
| D/D_0 | 0,405(3,92) | 0,811(-0,91) | 0,95(-0,22) | 0,987(-0,056) |
| F_B | 1(0) | 0,333 | 0,143 | 0,067 |
| $m = -1$ | | (-9,54) | (-16,9) | (-23,5) |