

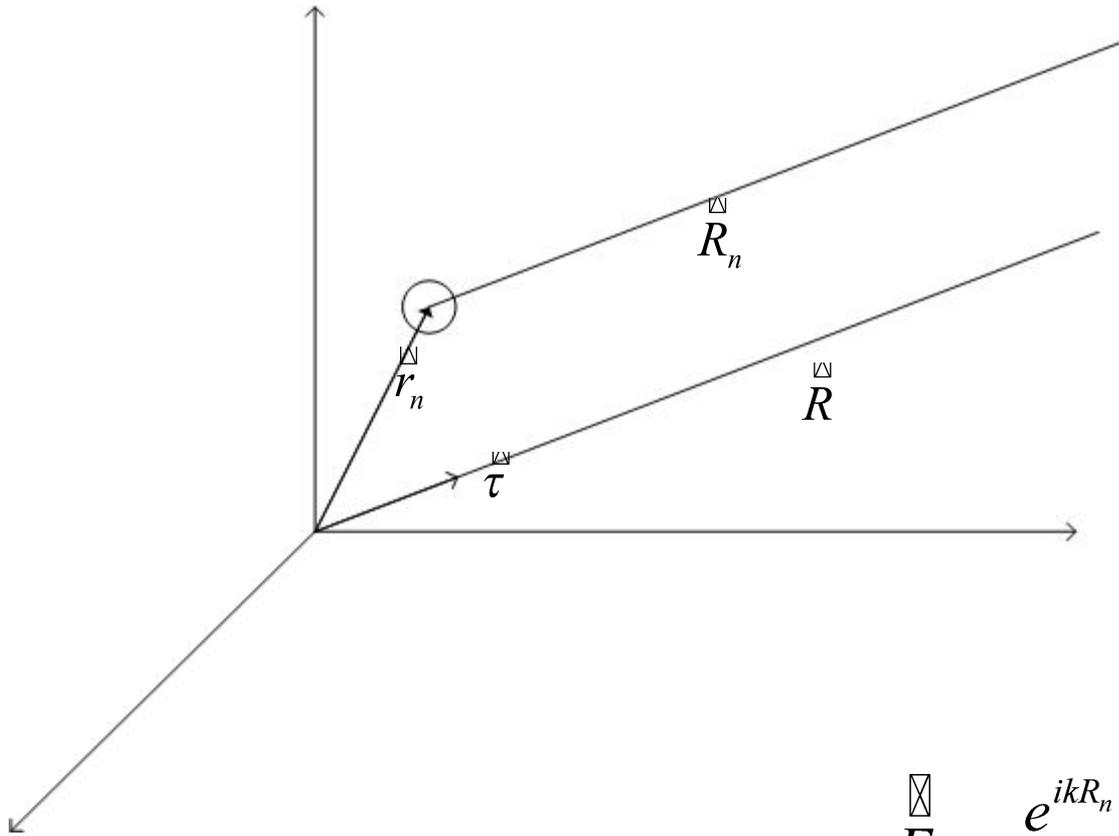
Структура курса

- Введение
 - Фазированные антенные решетки и их назначение
- Теория ФАР
 - **Основные характеристики ФАР**
 - Диаграммоформирование в ФАР
- Техника ФАР
 - Схемы возбуждения ФАР
 - Широкополосные ФАР
 - Принципы конструирования ФАР
 - Калибровка и контроль ФАР

Фазированные антенные решетки

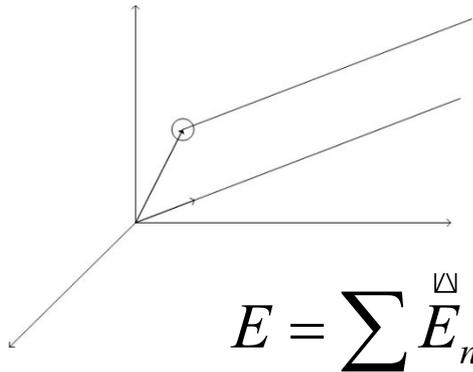
Антенная решетка – система токов,
разнесенных в пространстве,
имеющая дискретную структуру

Поле отдельного излучателя



$$\vec{E}_n = \frac{e^{ikR_n}}{R_n} A_n e^{i\Psi_n} f_n(\theta, \phi) \vec{\rho}_n(\theta, \phi)$$

Поле системы элементов



$$\vec{E} = \sum \frac{e^{ikR_n}}{R_n} A_n e^{i\Psi_n} f_n(\theta, \phi) \rho_n(\theta, \phi)$$

$$R_n = R - \frac{(\vec{\tau} \vec{r}_n)}{|\tau|}$$

$$\vec{E} = \sum \frac{e^{ikR} e^{-ik \frac{(\vec{\tau} \vec{r}_n)}{\tau}}}{\left(R - \frac{(\vec{\tau} \vec{r}_n)}{|\tau|} \right)} A_n e^{i\Psi_n} f_n(\theta, \phi) \rho_n(\theta, \phi)$$

Поле системы элементов

Упрощая :

$$\vec{E} = \frac{e^{ikR}}{R} \sum e^{-ik(\vec{r}r_n)} A_n e^{i\Psi_n} f_n(\theta, \phi) \vec{\rho}_n(\theta, \phi)$$

Член перед суммой представляет собой типовое амплитудное ослабление и фазовый набег. Итого, для ДН ФАР имеем

$$f_{\Sigma}(\theta, \phi) = \sum A_n e^{i\Psi_n} f_n(\theta, \phi) \vec{\rho}_n(\theta, \phi) e^{-ik(\vec{r}r_n)}$$

Поле системы элементов

Если все элементы одинаковы, то :

$$\begin{aligned} f_n(\theta, \phi) &= f(\theta, \phi) \\ \rho_n(\theta, \phi) &= \rho(\theta, \phi) \end{aligned}$$

Итого :

$$f_{\Sigma}(\theta, \phi) = f(\theta, \phi) \rho(\theta, \phi) \sum A_n e^{i\Psi_n} e^{-ik(\tau r_n)}$$

Или, проще :

$$f_{\Sigma}(\theta, \phi) = f(\theta, \phi) \rho(\theta, \phi) \sum A_n e^{-ik(\tau r_n)}$$

ДН ФАР

Диаграмма направленности ФАР

$$f_{\Sigma}(\theta, \phi) = f(\theta, \phi) \rho(\theta, \phi) \sum A_n e^{-ik(\tau r_n)}$$

Есть произведение ДН элемента
(парциальная ДН)

$$f(\theta, \phi) \rho(\theta, \phi)$$

На множитель решетки

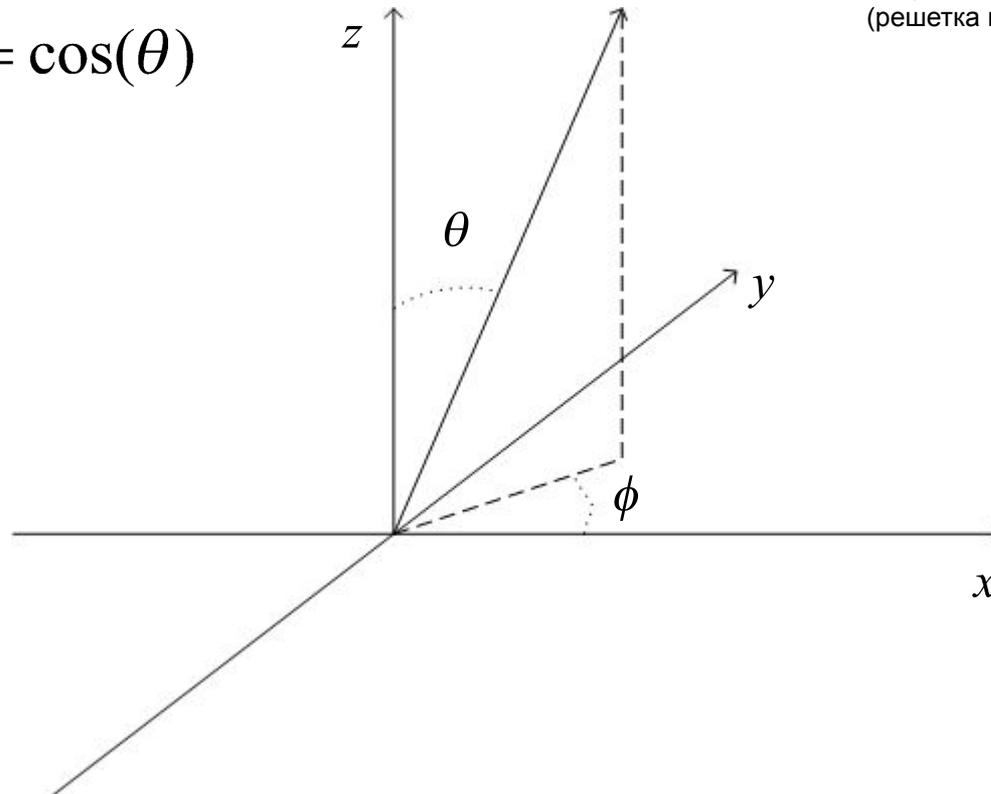
$$\sum A_n e^{-ik(\tau r_n)}$$

От углов к обобщенным координатам

$$\begin{cases} x & : & u = \sin(\theta) \cos(\varphi) \\ y & : & v = \sin(\theta) \sin(\varphi) \\ z & : & w = \cos(\theta) \end{cases}$$

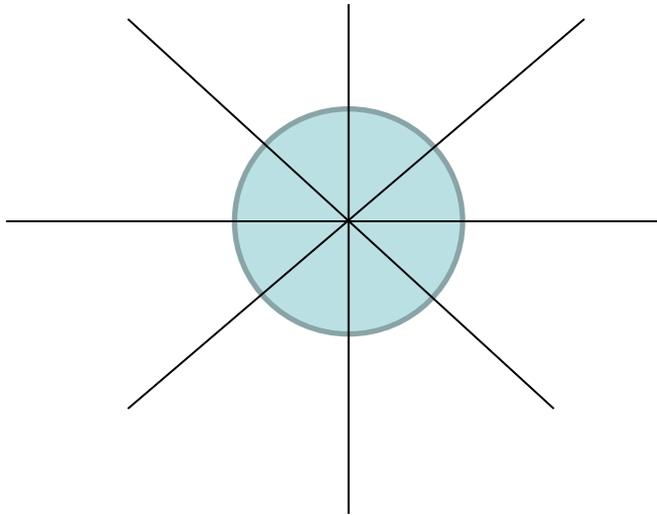
$$\left(\begin{array}{c} \boxtimes \\ \tau r_n \end{array} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} (ux_n + vy_n)$$

Координата Z обычно равна нулю
(решетка плоская)

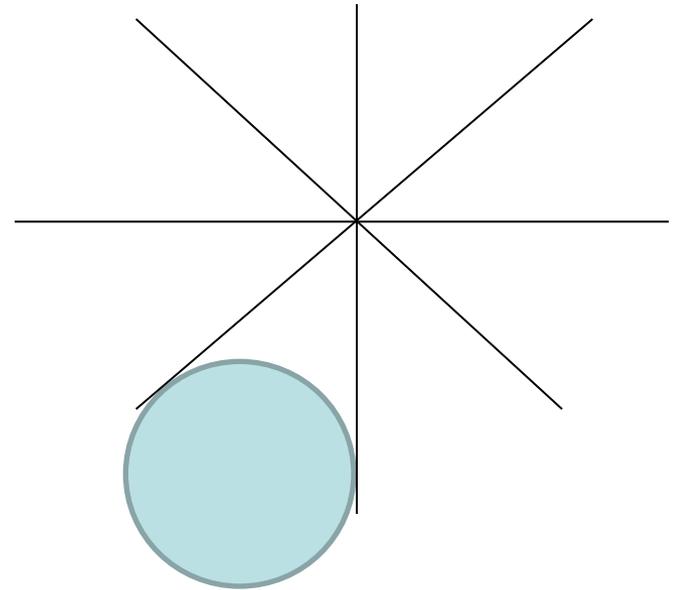


Сечения ДН при смещении

ДН в начале
координат

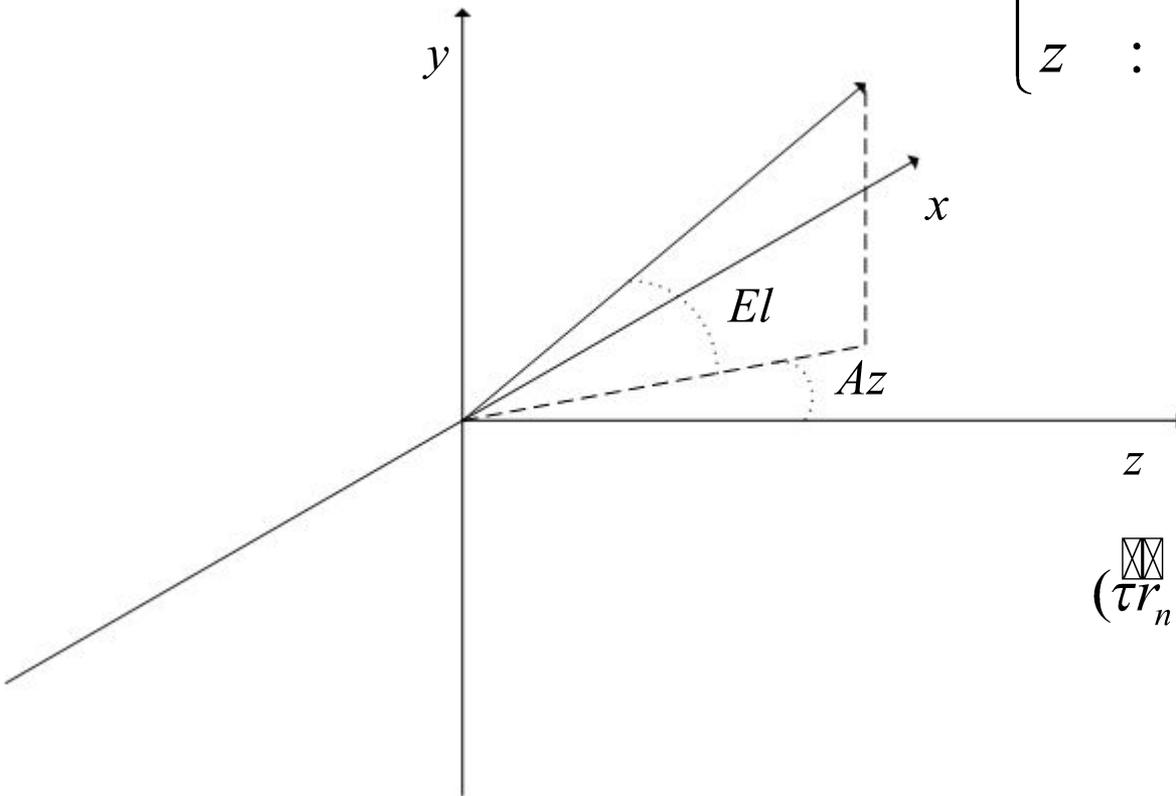


ДН смещена



От углов к обобщенным координатам

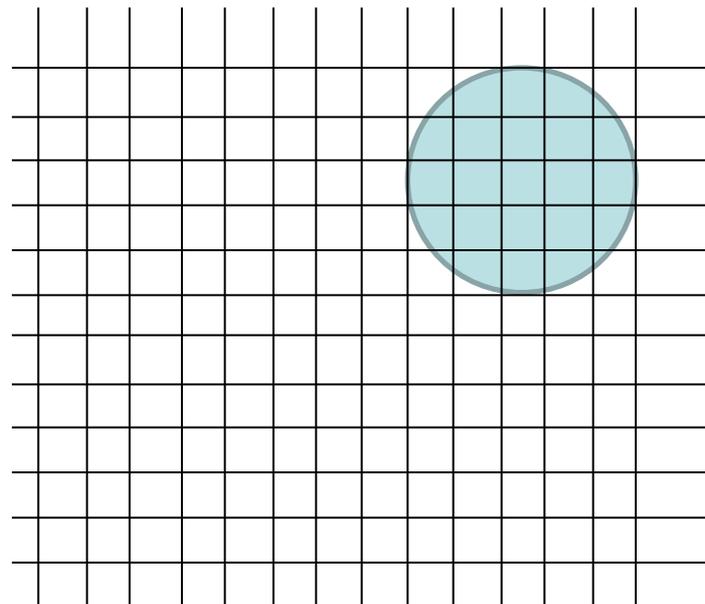
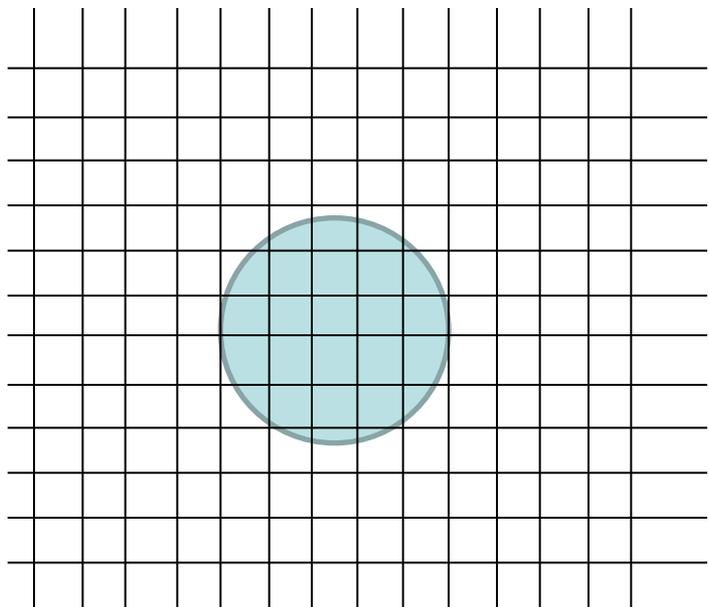
$$\begin{cases} x & : & u = \cos(El) \sin(Az) \\ y & : & v = \sin(El) \\ z & : & w = \cos(El) \cos(Az) \end{cases}$$



$$\begin{pmatrix} \boxtimes \\ \tau r_n \end{pmatrix} = \frac{2\pi}{\lambda} (ux_n + vy_n)$$

Координата Z обычно равна нулю
(решетка плоская)

ДН в начале
координат



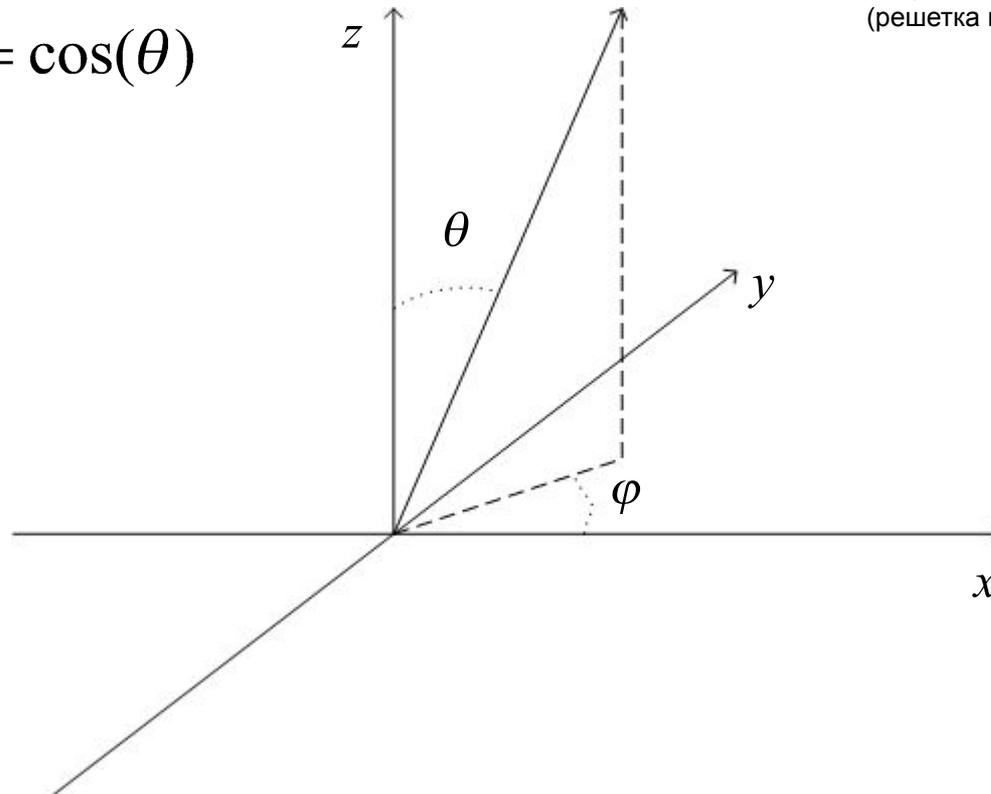
ДН смещена

От углов к обобщенным координатам

$$\begin{cases} x & : & u = \sin(\theta) \cos(\varphi) \\ y & : & v = \sin(\theta) \sin(\varphi) \\ z & : & w = \cos(\theta) \end{cases}$$

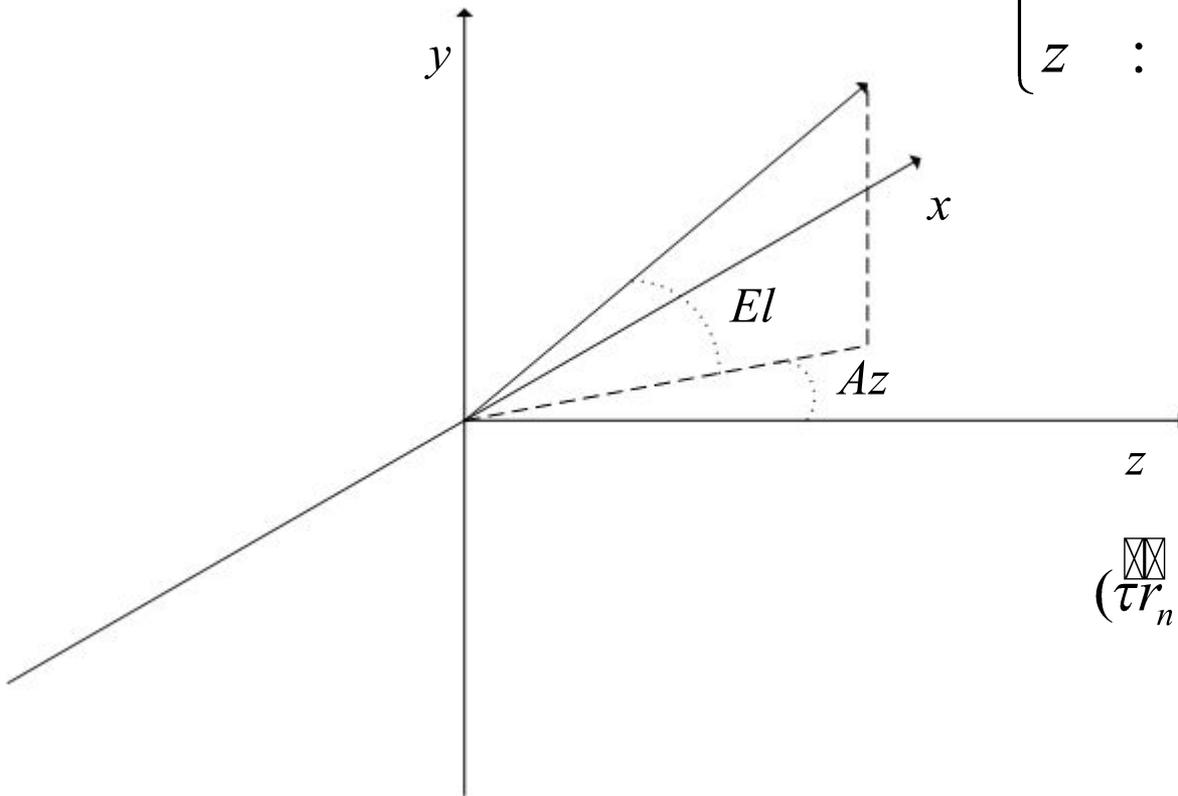
$$\left(\begin{array}{c} \boxtimes \\ \tau r_n \end{array} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} (ux_n + vy_n)$$

Координата Z обычно равна нулю
(решетка плоская)



От углов к обобщенным координатам

$$\begin{cases} x & : & u = \cos(El) \sin(Az) \\ y & : & v = \sin(El) \\ z & : & w = \cos(El) \cos(Az) \end{cases}$$



$$\begin{pmatrix} \boxtimes \\ \boxtimes \\ r_n \end{pmatrix} = \frac{2\pi}{\lambda} (ux_n + vy_n)$$

Координата Z обычно равна нулю
(решетка плоская)

Множитель решетки

$$\sum A_n e^{-ik(\vec{r}_n)} = \sum A_n e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}(ux_n + vy_n)}$$

Перепишем, с использованием дельта-функций :

$$\sum A_n e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}(ux_n + vy_n)} = \iint A(x, y) \sum \delta(x - x_n, y - y_n) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}(ux + vy)} dx dy$$

$$B(u, v) = \iint A(x, y) e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}(ux + vy)} dx dy$$

Итак, множитель решетки есть преобразование Фурье от распределения в апертуре (двумерное)

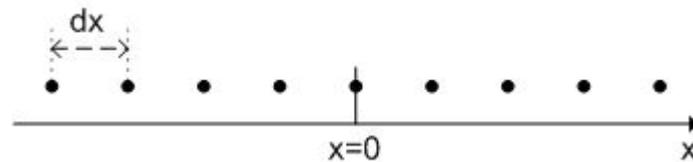
Линейная решетка

$$x_n = nd_x (n = -N/2 \dots N/2)$$

$$y_n = 0$$

$$z_n = 0$$

Нечетное число элементов, числом $N+1$

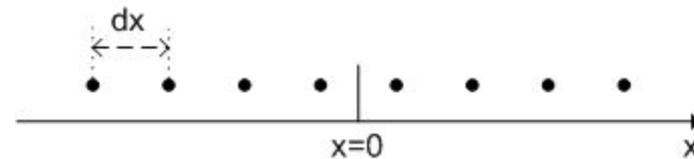


$$x_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) d_x (n = -N/2 \dots N/2 - 1)$$

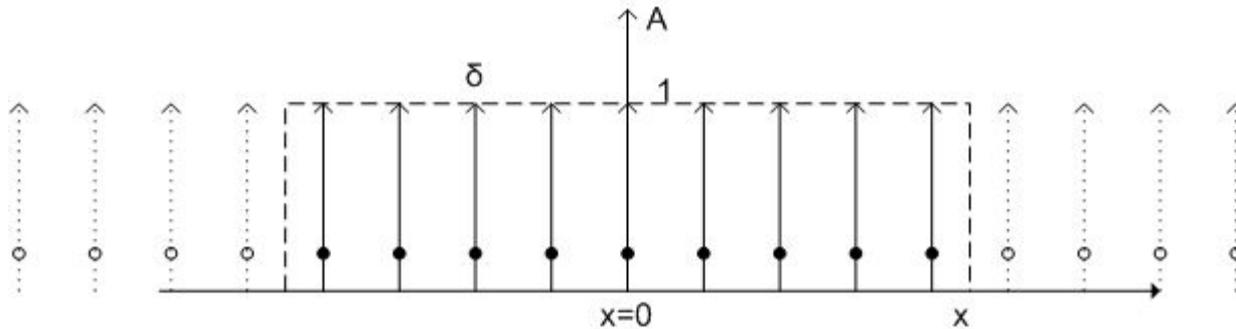
$$y_n = 0$$

$$z_n = 0$$

Четное число элементов, числом N



Равномерное амплитудное распределение в линейной решетке конечных размеров



Амплитудное распределение **A** представляет собой произведение

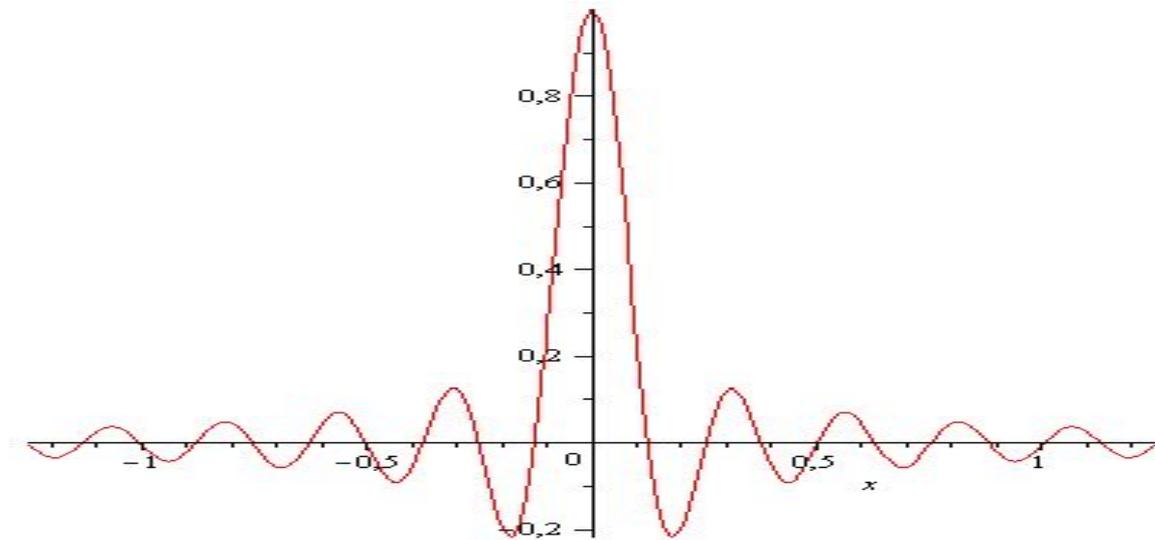
гребенки Дирака (она бесконечна)

на высекающую функцию (она столообразная)

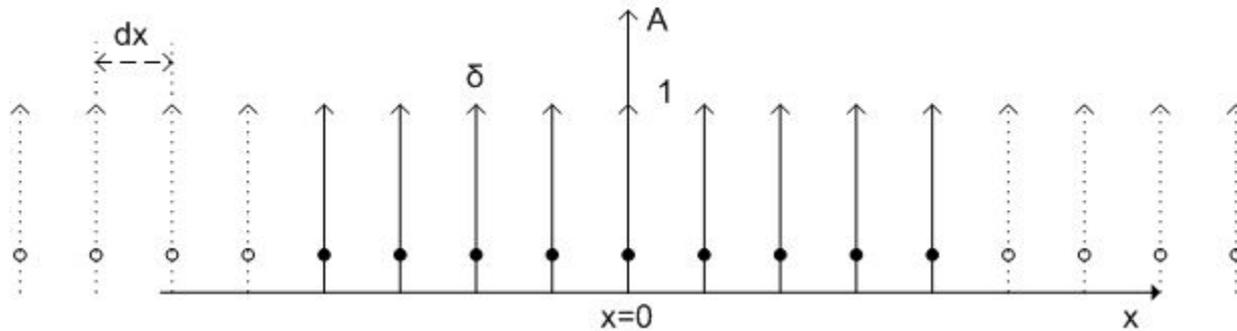
Соответственно, фурье-образ произведения – это свертка образов

Основной лепесток ДН

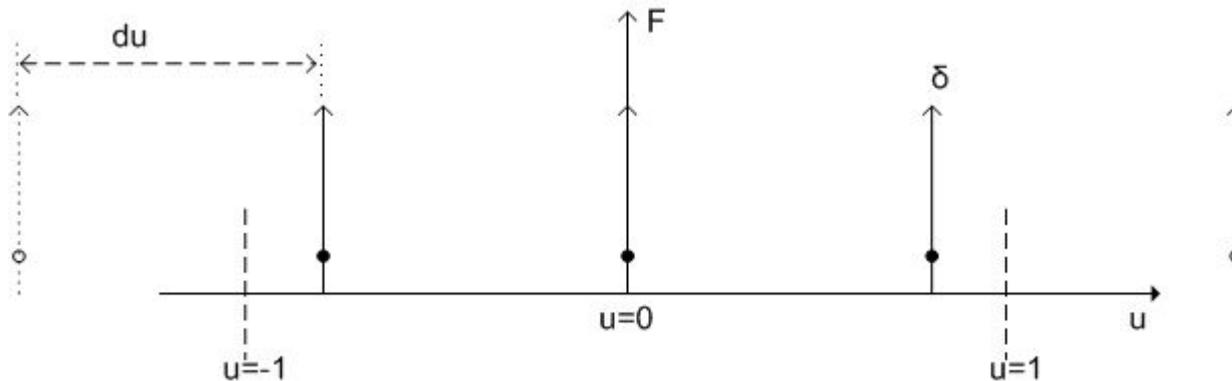
Столбобразная высекающая функция отображается в $\frac{\sin(u)}{u}$



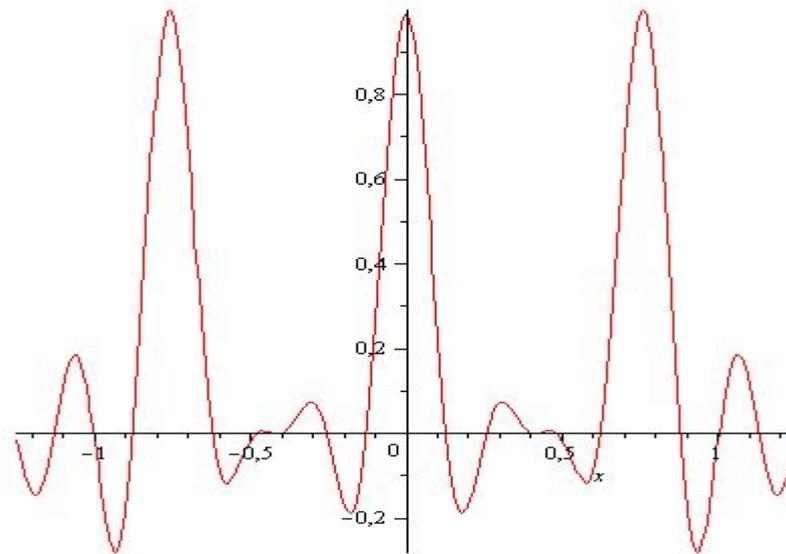
Интерференционные лепестки



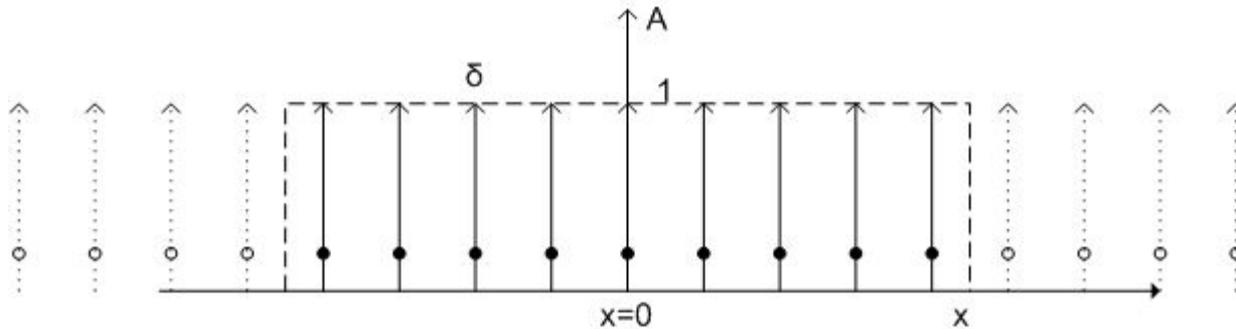
Гребенка Дирака отображается в гребенку Дирака



Соответственно, свертка



Равномерное амплитудное распределение в линейной решетке конечных размеров



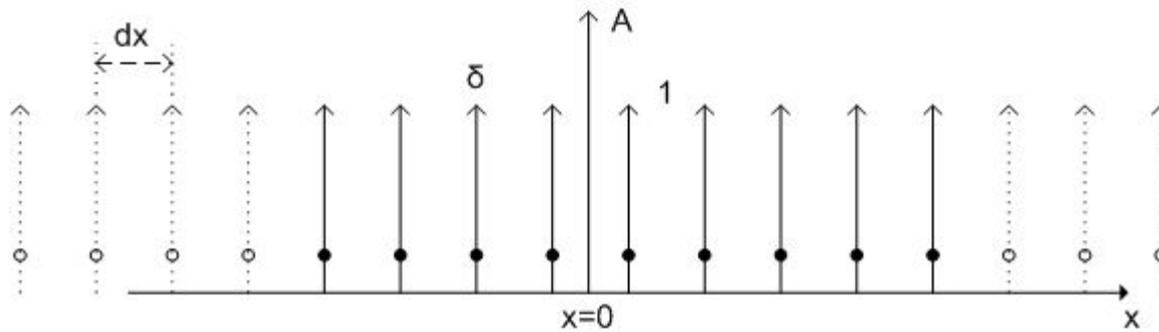
Амплитудное распределение **A** представляет собой произведение

гребенки Дирака (она бесконечна)

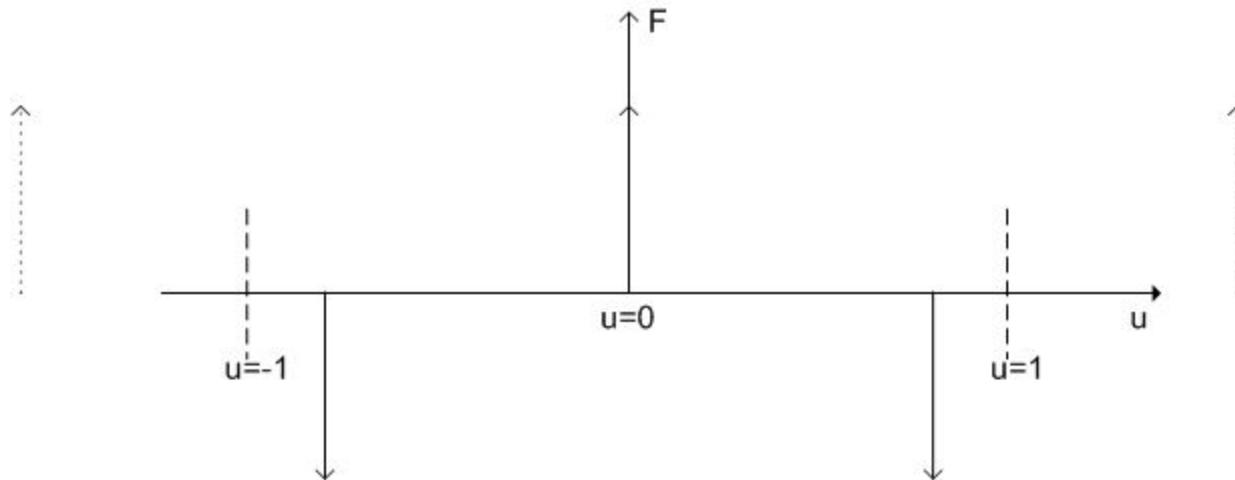
на высекающую функцию (она столообразная)

Соответственно, фурье-образ произведения – это свертка образов

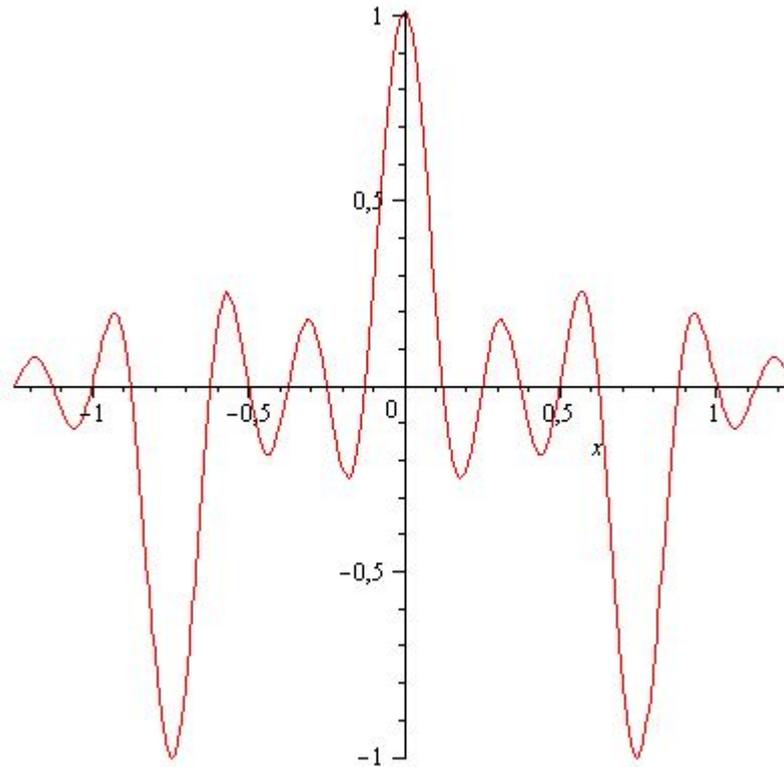
Для антенн с четным числом элементов



Сдвиг по координате эквивалентен сдвигу (инверсии) фазы



Соответственно, свертка

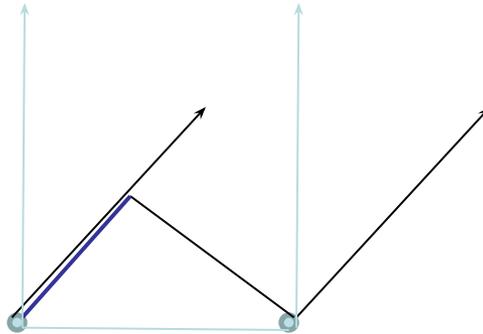


Количественные соотношения

Ширина основного луча - $0.88 \frac{\lambda}{D}$ (линейная решетка или прямоугольная)

Вообще форма луча определяется апертурой и распределением в ней

Расстояние между интерференционными максимумами: см фазу $-i \frac{2\pi}{\lambda} (ux_n + vy_n)$



Количественные соотношения

Расстояние между интерференционными линиями: см фазу $-i \frac{2\pi}{\lambda} (ux_n + vy_n)$

Условие возникновения:

$$\frac{2\pi}{\lambda} (u_1 d_x) = \frac{2\pi}{\lambda} (u_2 d_x) - 2\pi \quad - \text{ фазовый набег на один шаг решетки}$$

одинаков (с точностью до 360°) для соседних направлений

$$\frac{d_x}{\lambda} (u_2 - u_1) = 1$$

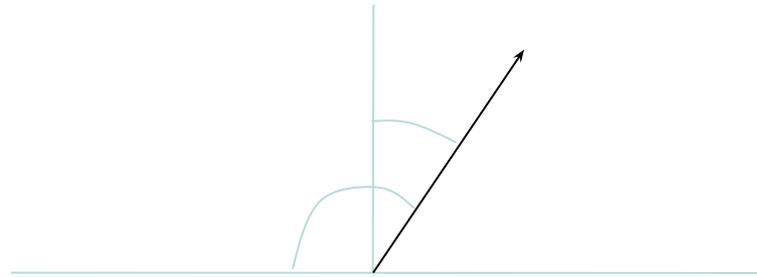
или

$$\frac{d_x}{\lambda} \Delta u = 1$$

УСЛОВИЯ ОТСУТСТВИЯ

При сканировании в области

$$\frac{d_x}{\lambda} \leq \frac{1}{1 + \sin(\theta_{\max})}$$



или
$$\frac{d_x}{\lambda} \leq \frac{1}{2 \sin(\theta_{\max})}$$

При сканировании везде:

$$\frac{d_x}{\lambda} \leq \frac{1}{2}$$

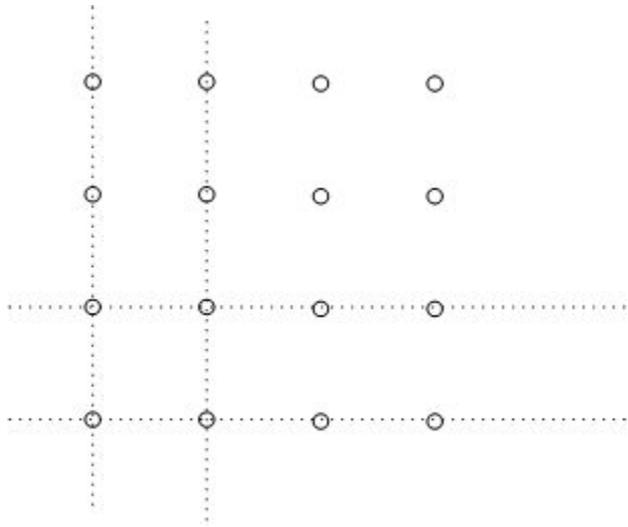
Интерференционные лепестки оказывают существенное влияние на характеристики антенны

(в большинстве случаев отрицательное)

- Помехоустойчивость (ЭМС)
- Коэффициент усиления (КНД)
- Область сканирования

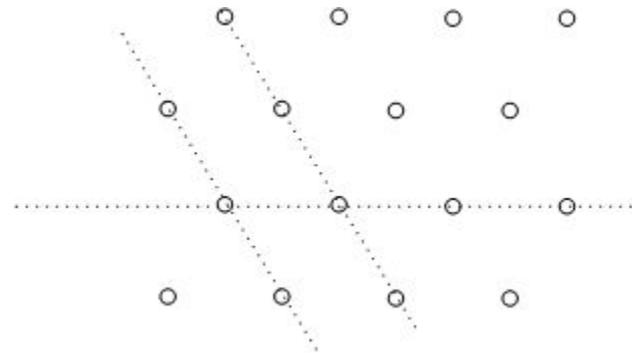
Двумерные решетки

прямоугольная

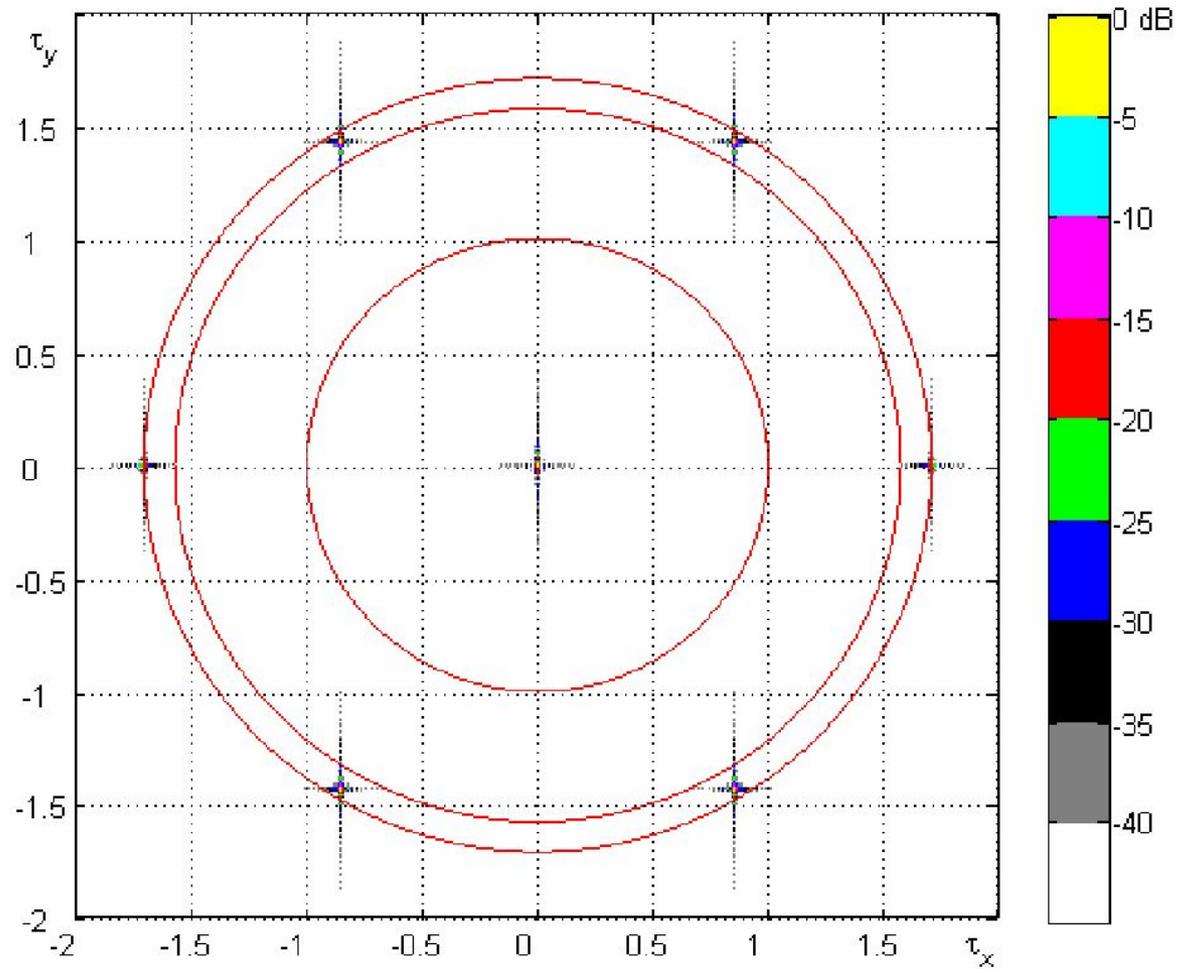


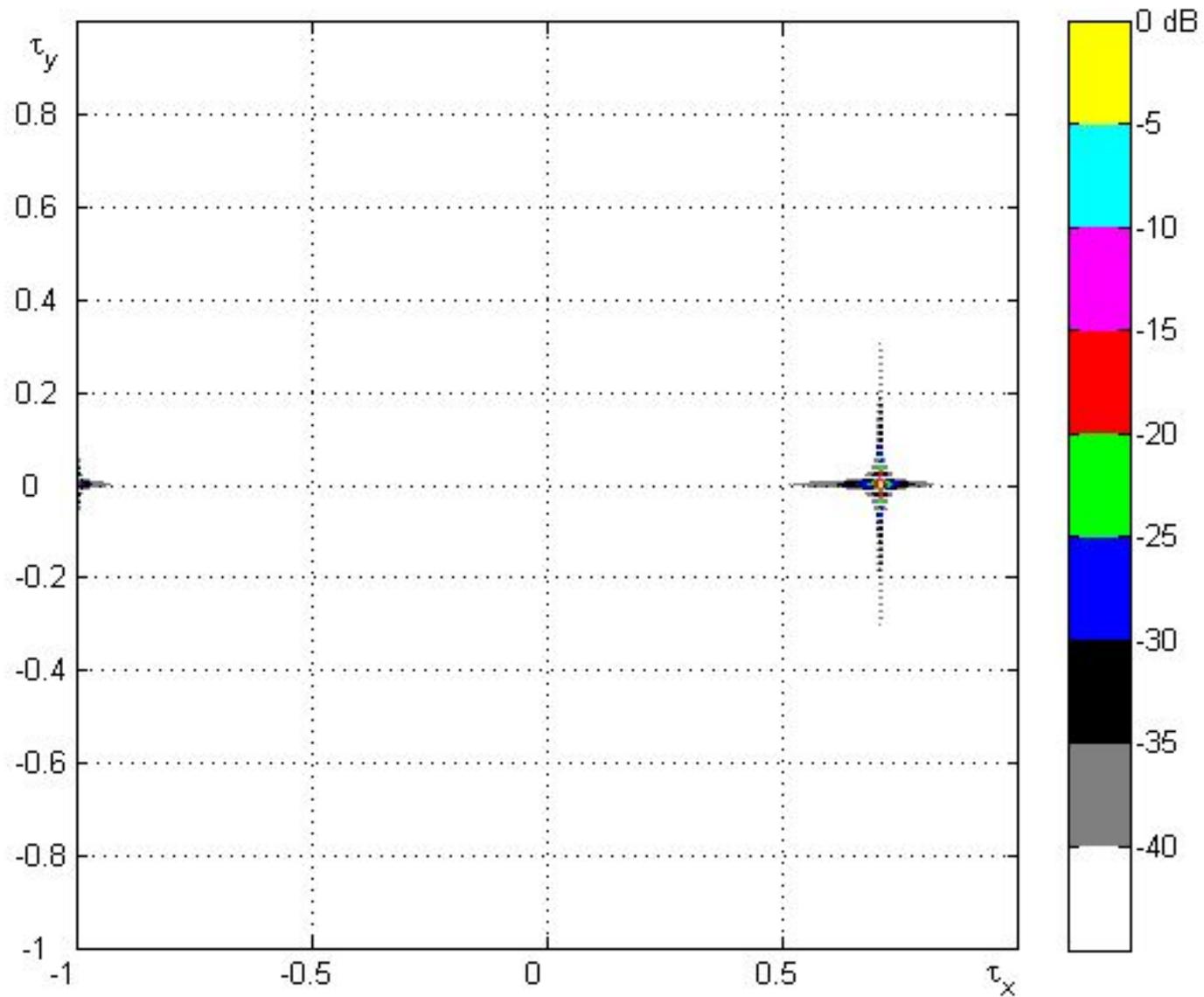
(квадратная)

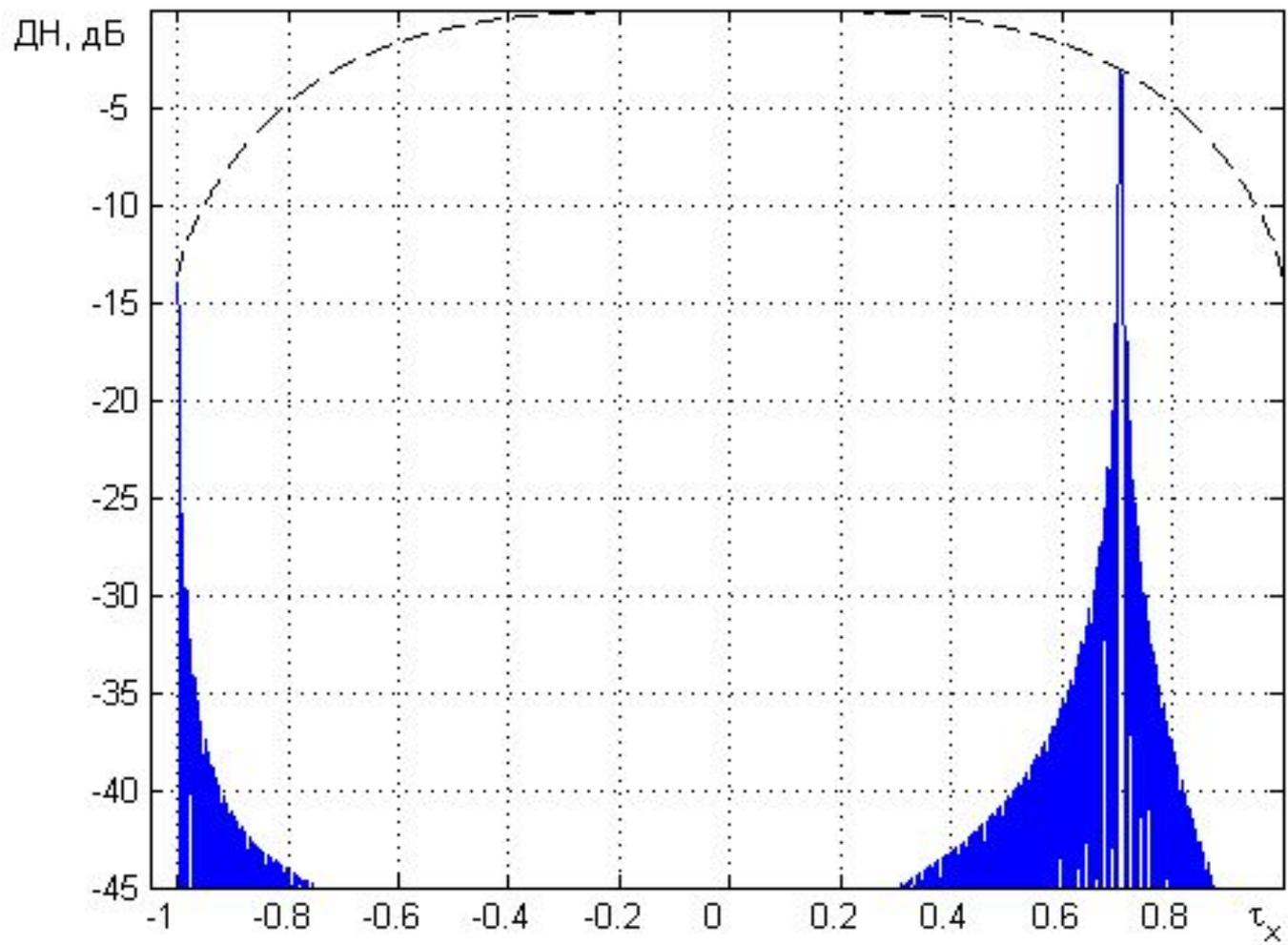
треугольная

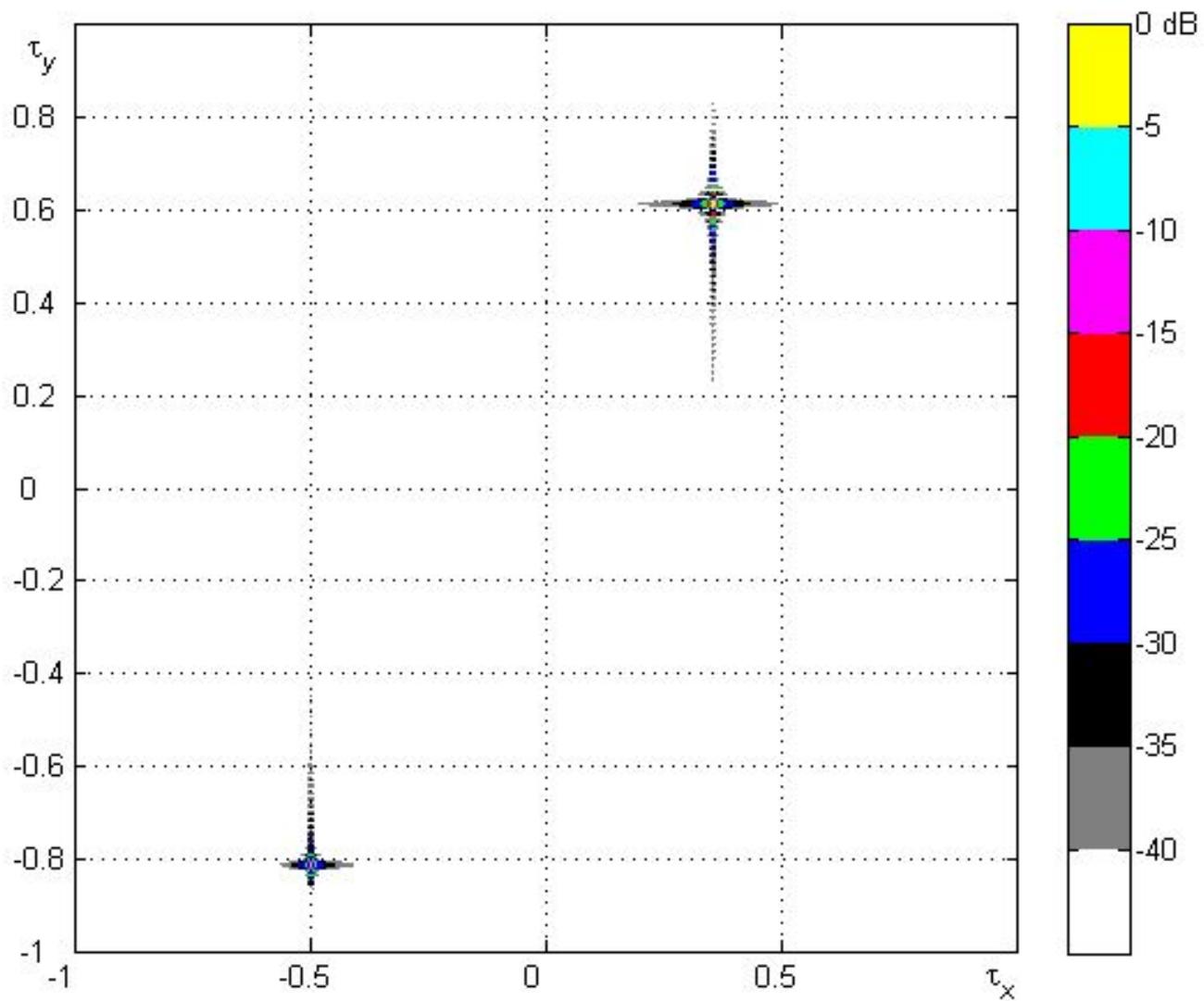


(гексагональная)

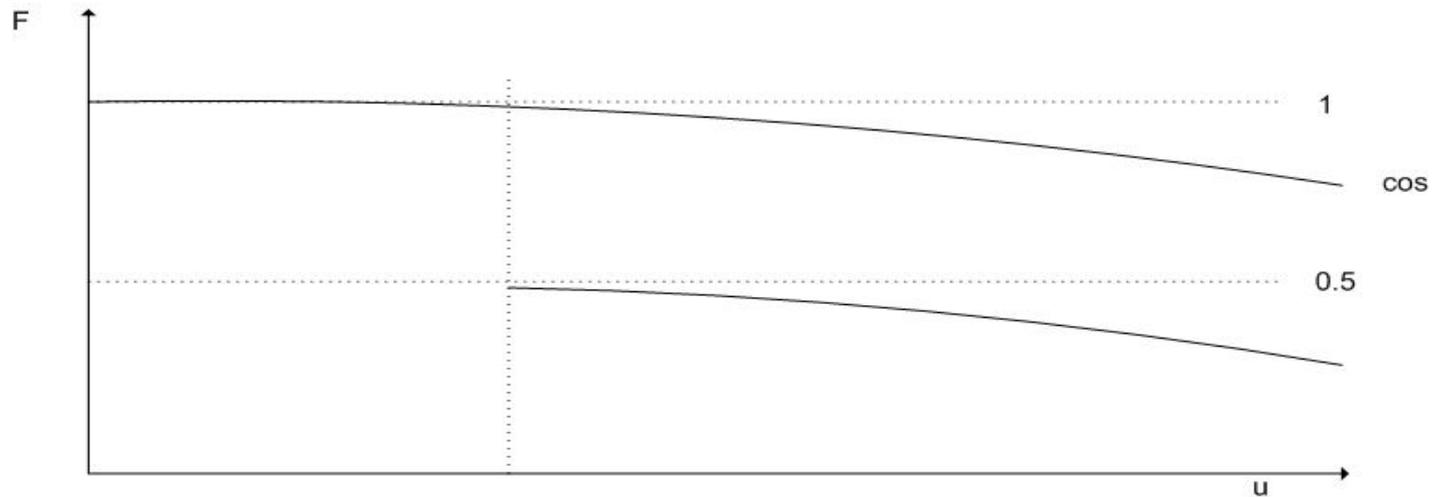
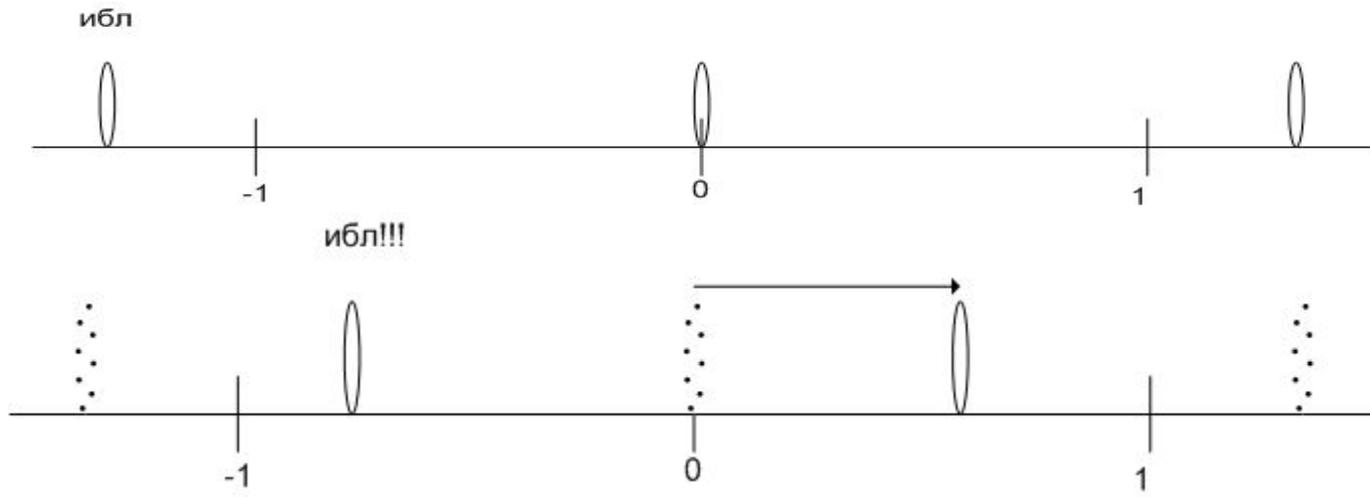


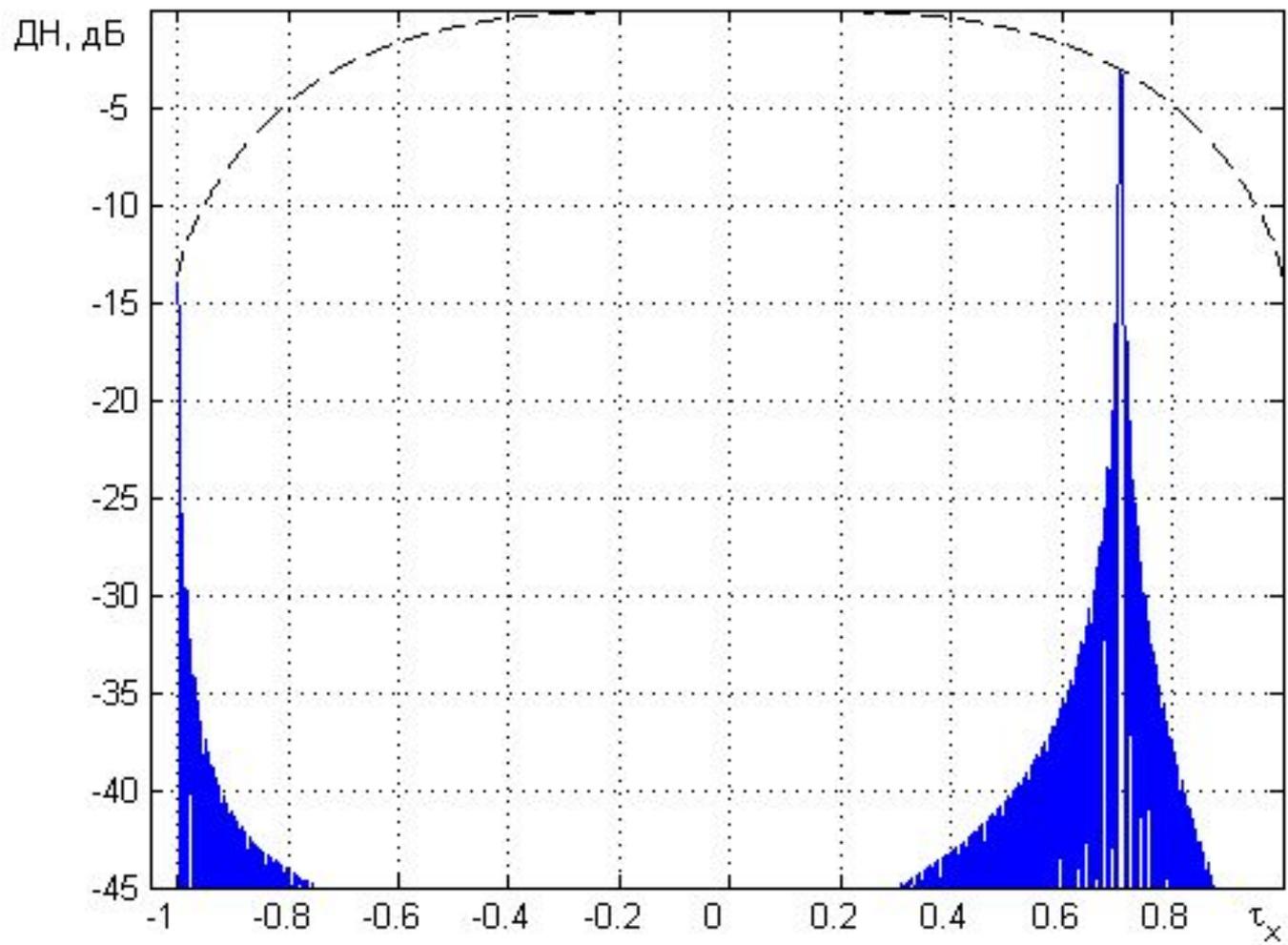






Изменение КУ ФАР при сканировании





Методы подавления ИБЛ

- За счет уменьшения шага решетки
- За счет подбора ДН излучателя
- За счет неэквидистантной расстановки
- За счет разделения на подрешетки

Подавление ИБЛ

- За счет уменьшения шага решетки

Расстановка излучателей с шагом, ненамного превышающим половину длины волны (или меньше)

Недостаток - при шаге элементов меньше половины длины волны, решетка может «запираться»

**Существенный недостаток –
избыточность количества элементов**

Оптимальное количество элементов

$$N_{\min} = \frac{S_{\Omega}}{4\pi} G_0$$

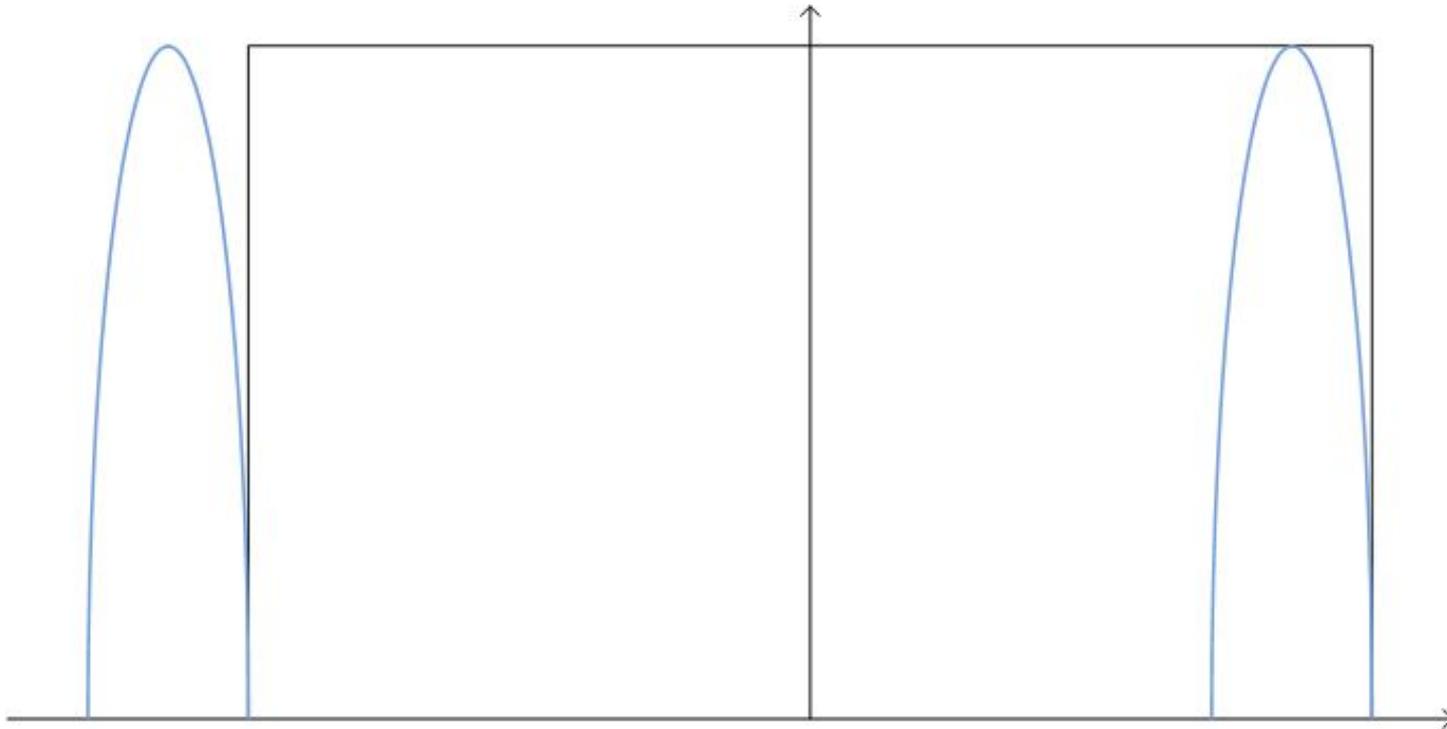
грубо говоря, сколько поместится ортогональных лучей ФАР в заданной области сканирования

Альтернатива - сколько поместится элементов в области при данном шаге

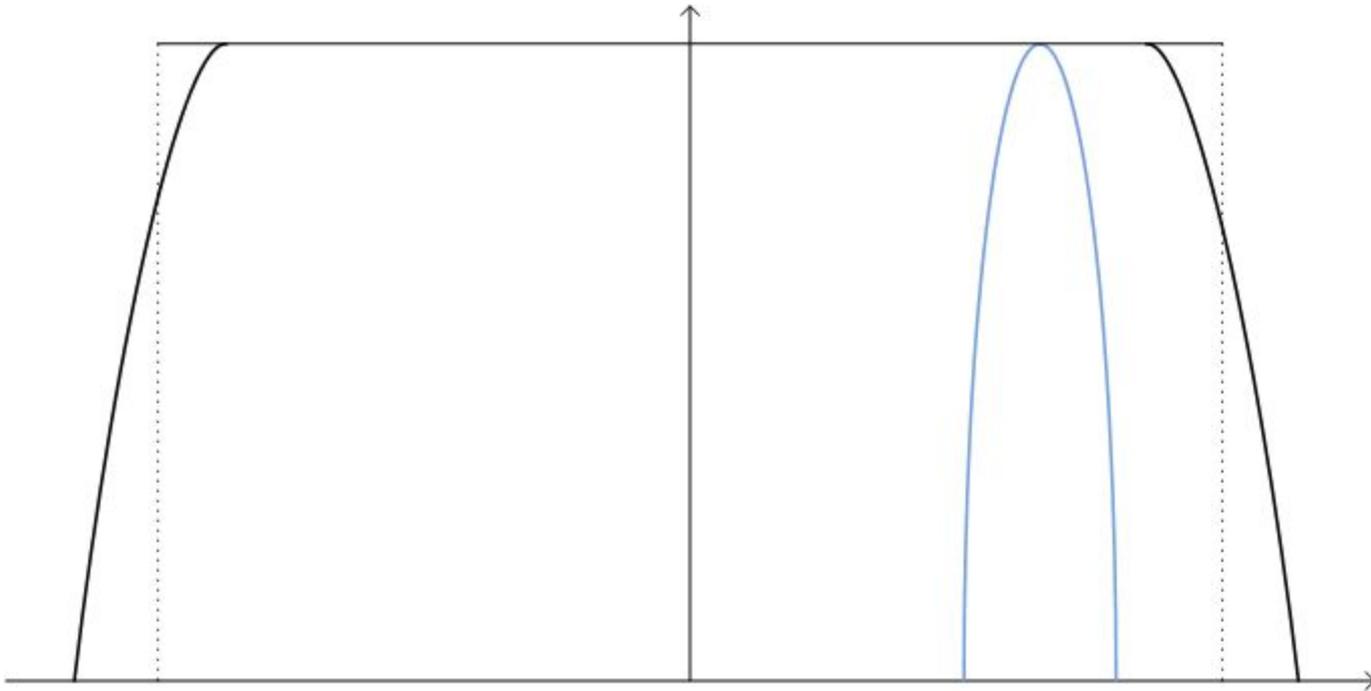
- КУ задает размер антенны (ШДН)
- Область задает шаг между элементами

Подавление ИБЛ

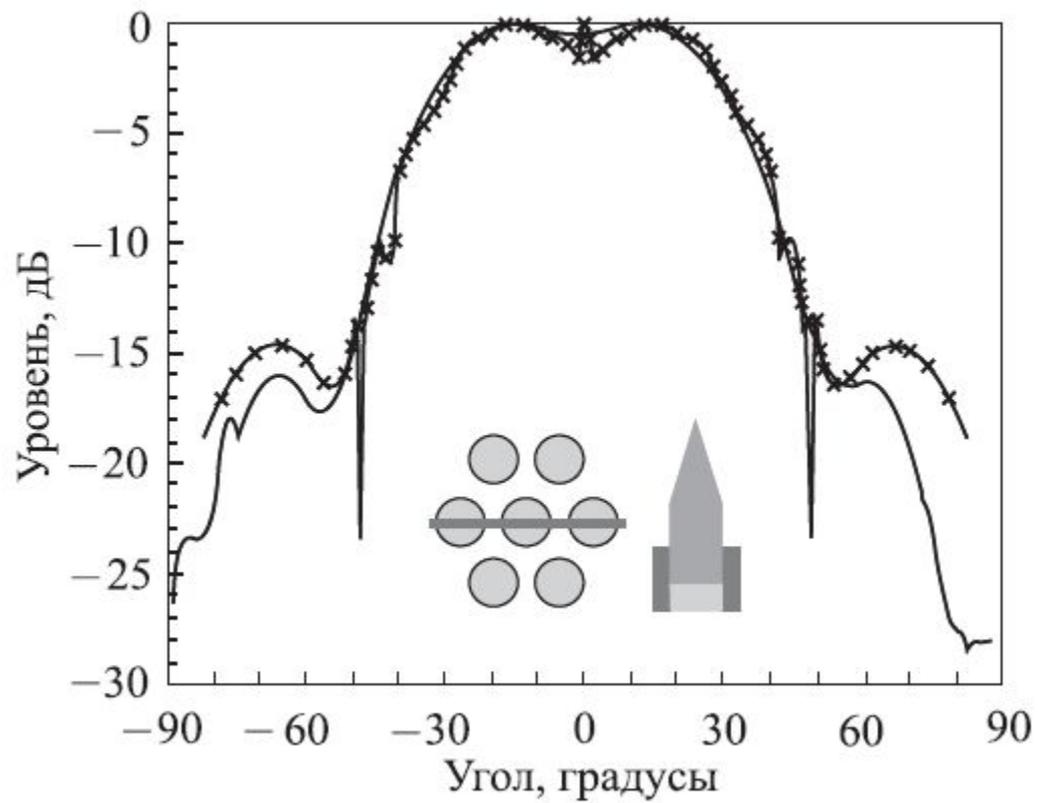
- За счет подбора ДН излучателя



Так не бывает!



Для формирования столообразной ДН нужна бесконечная апертура.
Для формирования вот такой - как минимум вся поверхность апертуры



Перекрывающиеся апертуры

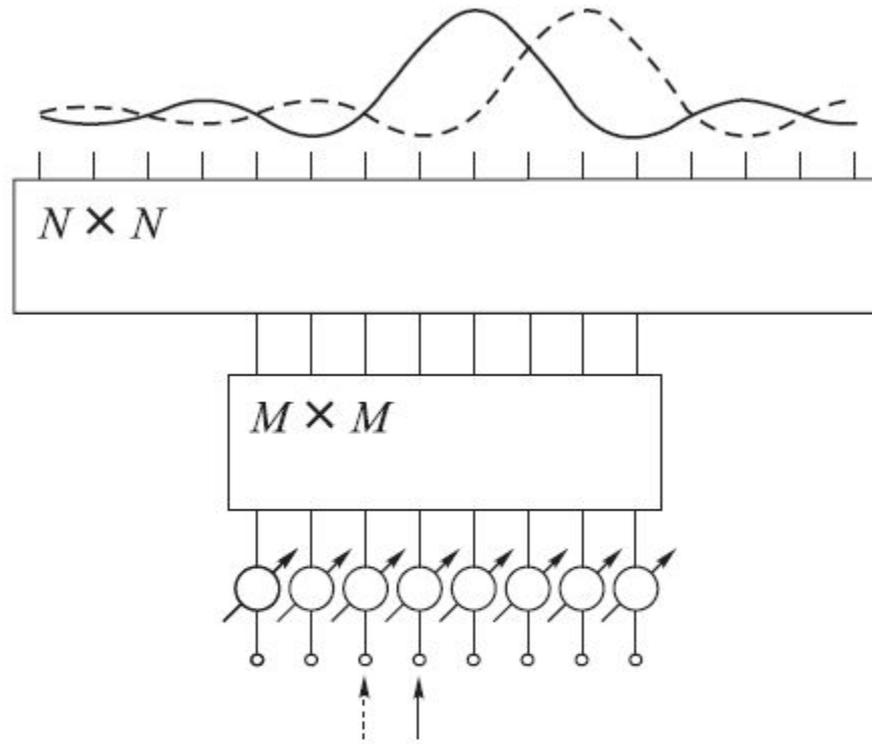


Рис. 2.2. Схема формирования полностью перекрывающихся подрешеток на основе двух матриц Батлера

Перекрывающиеся апертуры

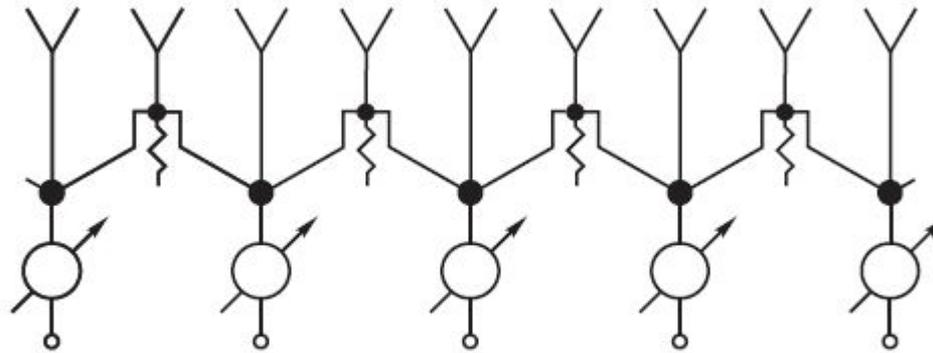
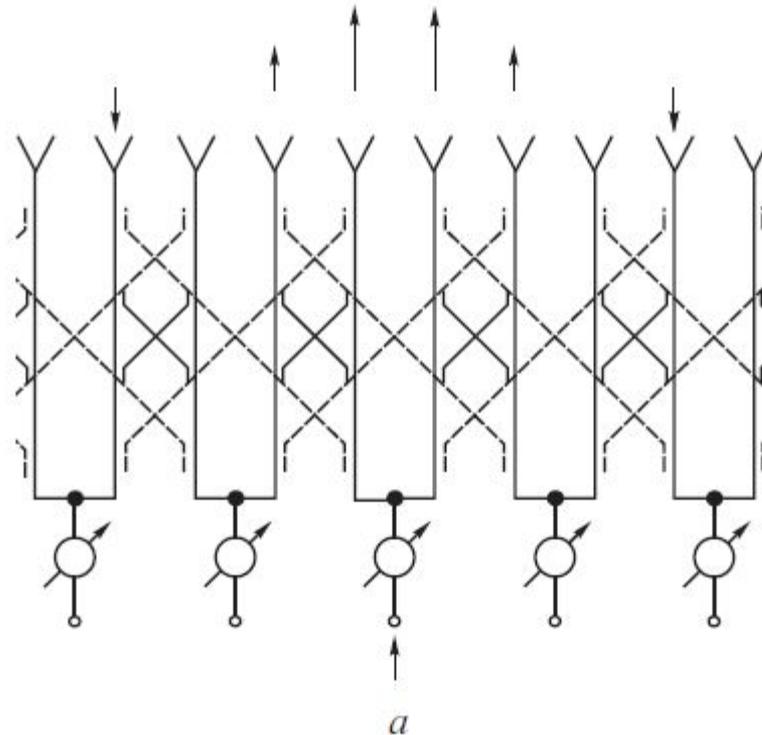


Рис. 2.3. Схема Немита

Перекрывающиеся апертуры



Перекрывающиеся апертуры

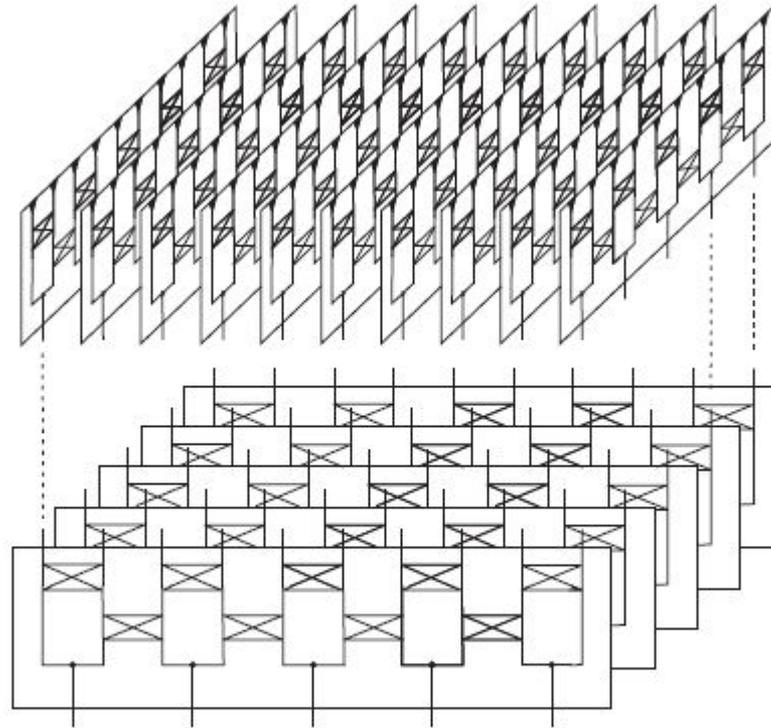


Рис. 2.11. Пример архитектуры решетки с однокаскадной шахматной схемой для сканирования в ограниченном секторе в обеих главных плоскостях

Перекрывающиеся апертуры

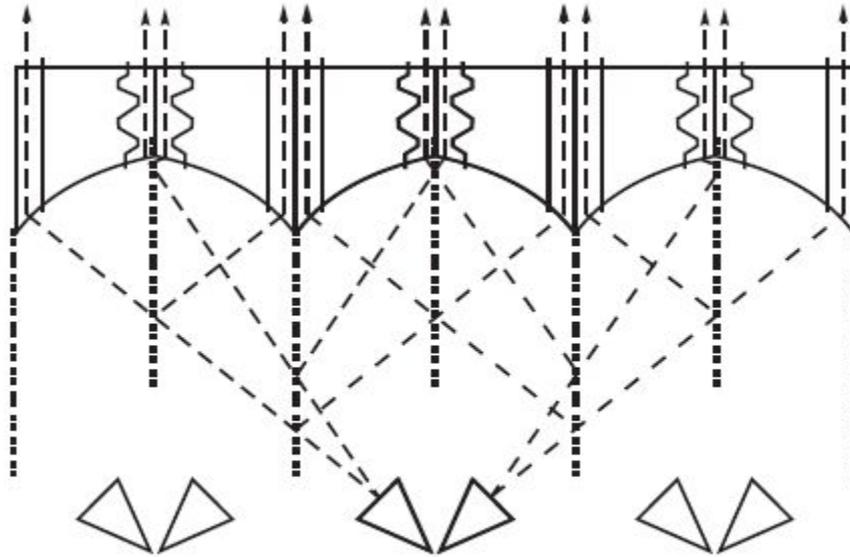


Рис. 2.23. Квазиоптическая схема подрешетки с «шнурковыми» линзами в качестве элементов

Перекрывающиеся апертуры

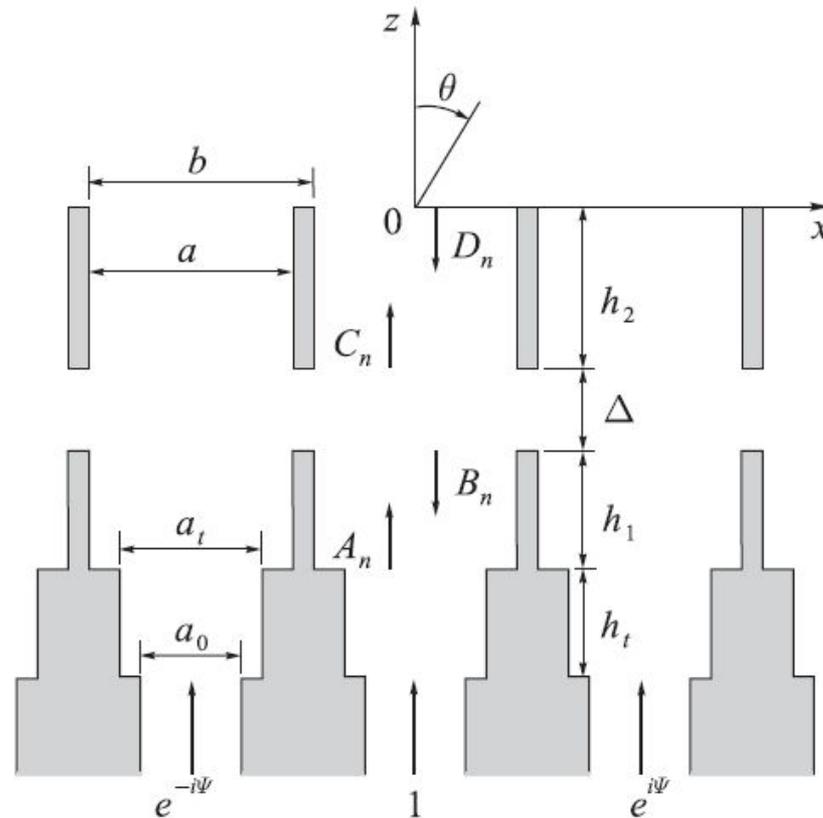
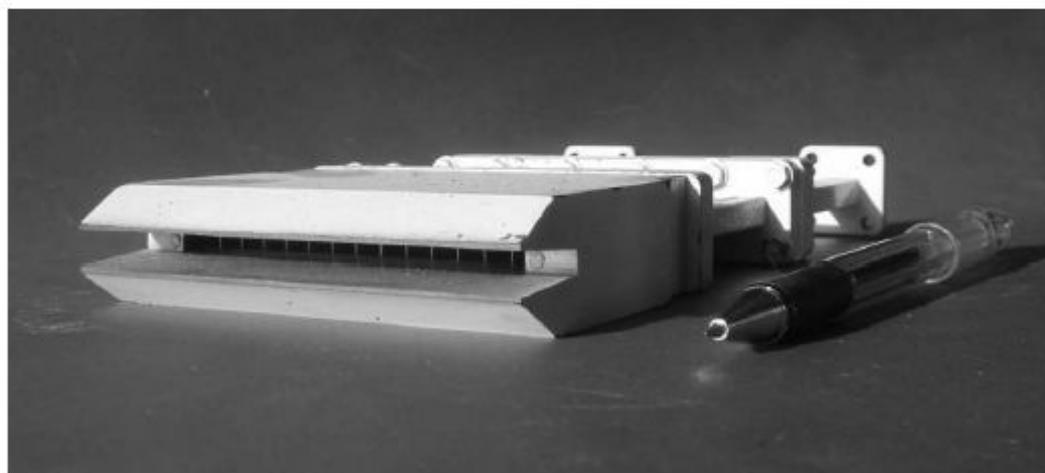
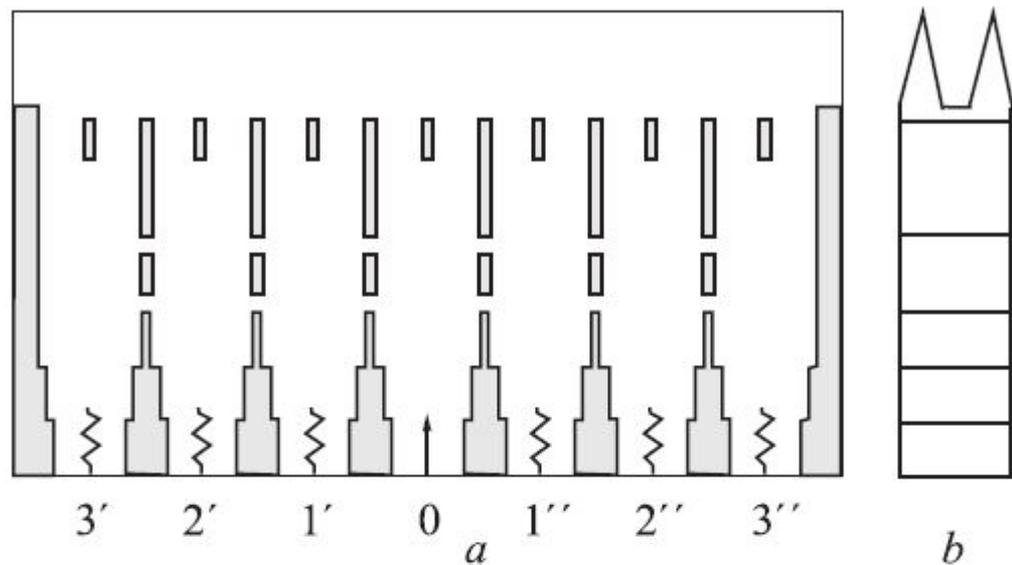


Рис. 3.4. Геометрия решетки связанных ступенчатых плоскопараллельных волноводов для сканирования в E -плоскости



c

Рис. 3.14. Экспериментальная решетка связанных двухмодовых волноводов:
 (a) — разрез в H -плоскости, (b) — вид сбоку, (c) — общий вид

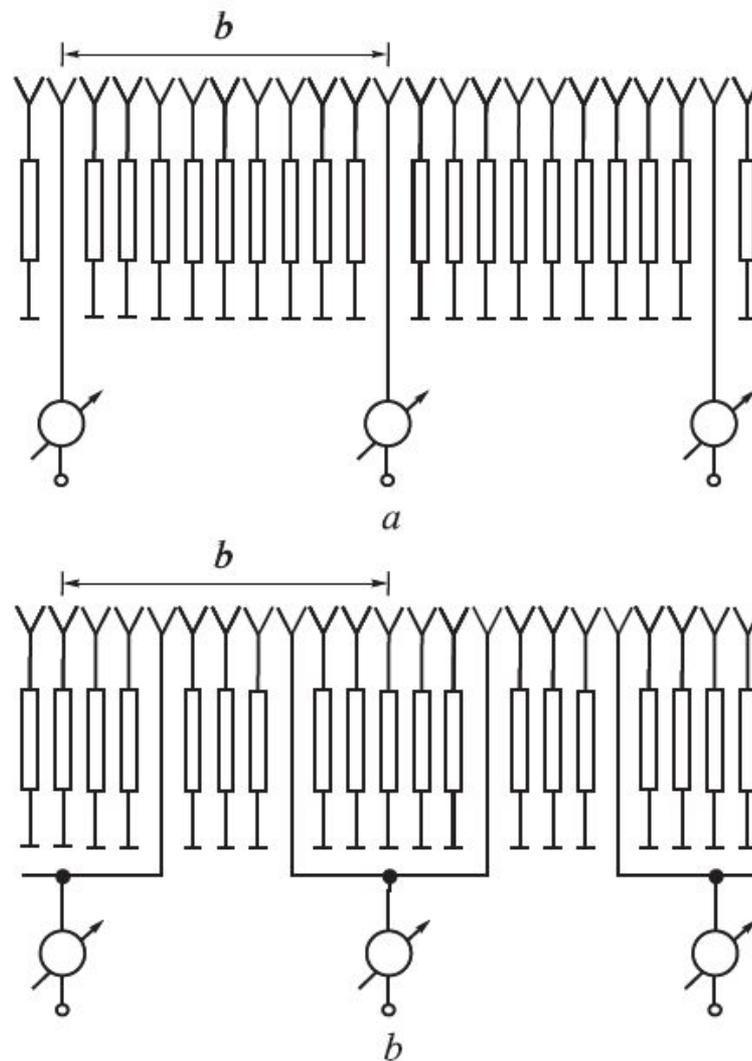
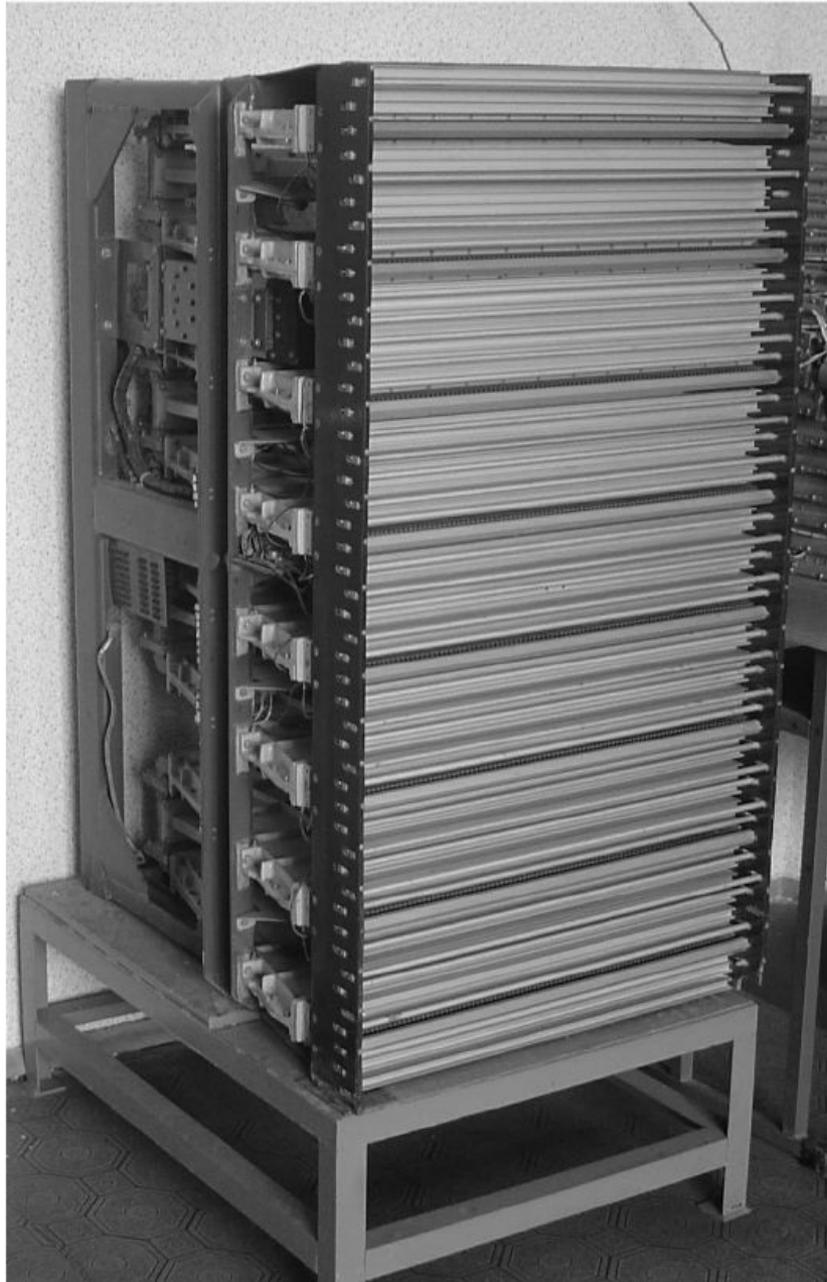


Рис. 4.1. Схемы фазированных антенных решеток с реактивно нагруженными излучателями, возбуждаемыми по свободному пространству от одного (а) и двух (б) управляемых излучателей в ячейке



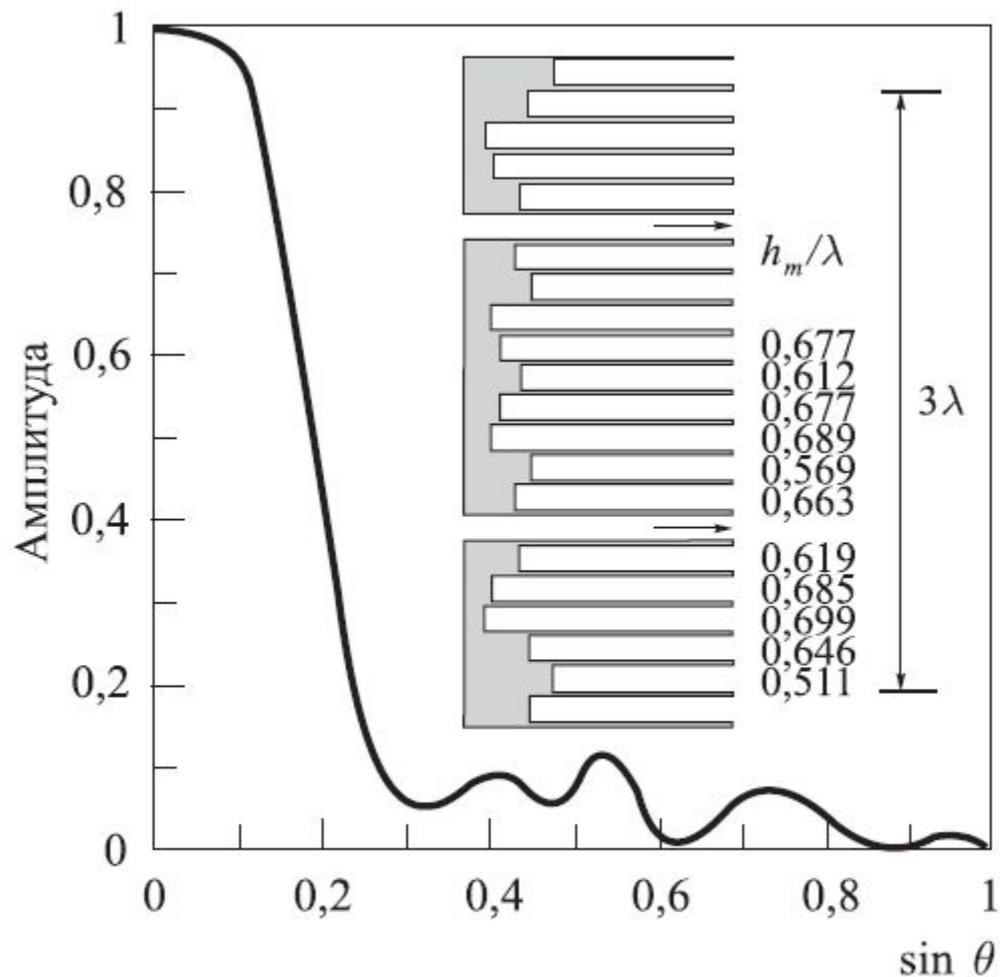
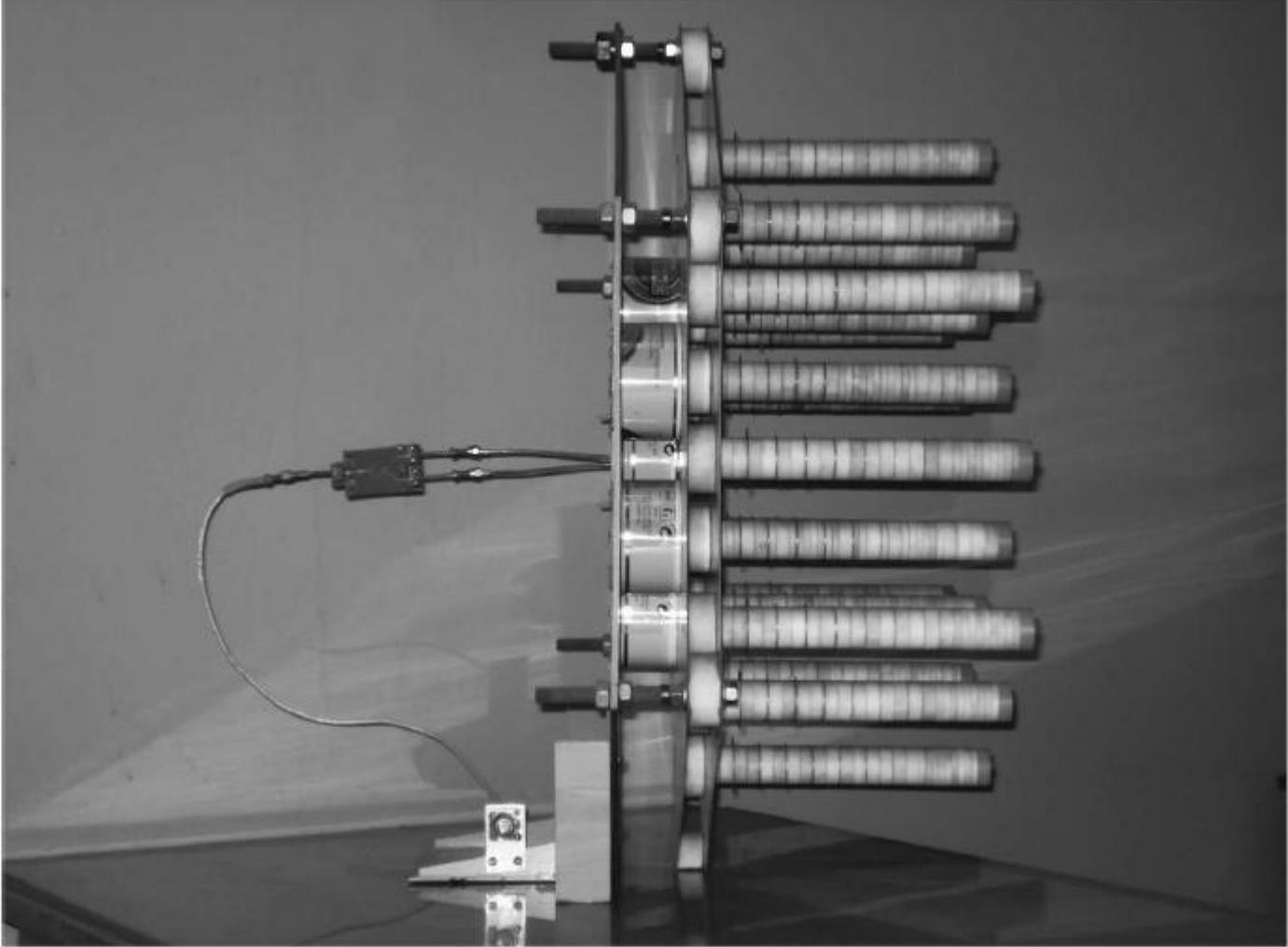


Рис. 4.8. Геометрия и ДН элемента решетки с $b = 3\lambda$, $M = 20$, $M' = 2$ и $t = 0$



b

Подавление ИБЛ

- За счет подбора ДН излучателя



Для формирования ДН используется вся поверхность апертуры элемента
При формировании столбобразной ДН элемента, апертура элемента недоиспользуется

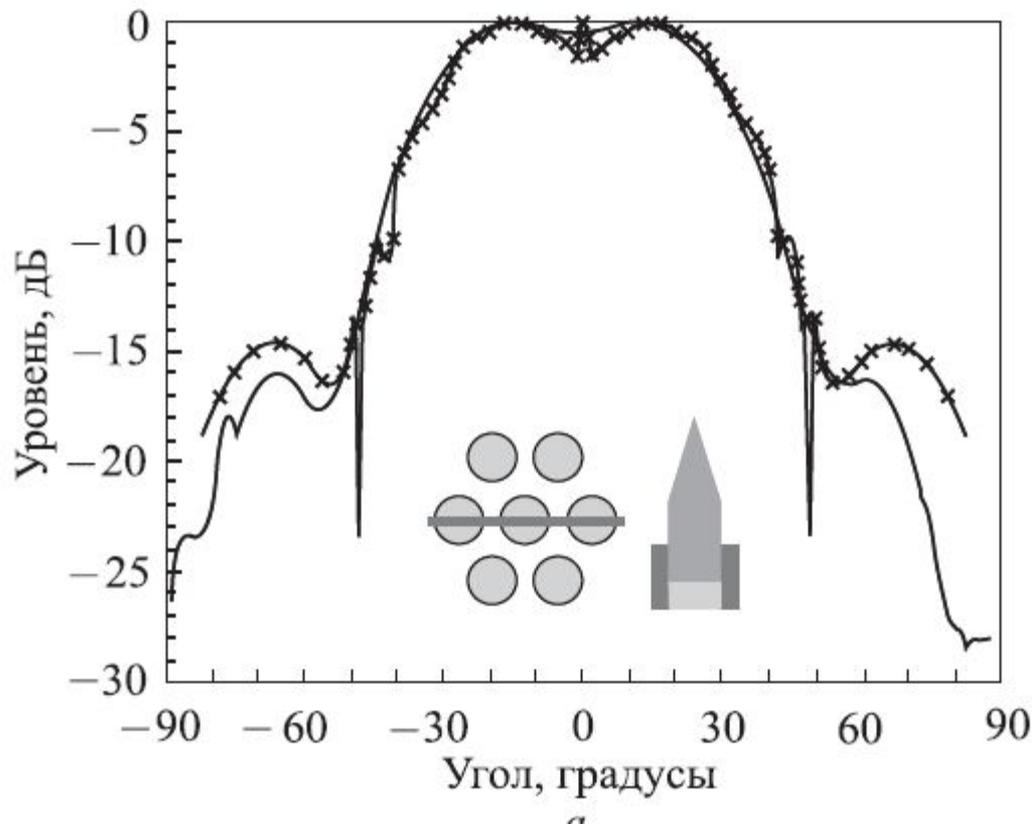
Выводы

- Наиболее эффективная форма ДН близка к столообразной
- Для эффективной формы ДН нужно организовать связь между каналами
- Чем больше связь – тем сложнее схема
- Компромисс – связь излучателей по эфиру (получилось то, что получилось)

Заметки

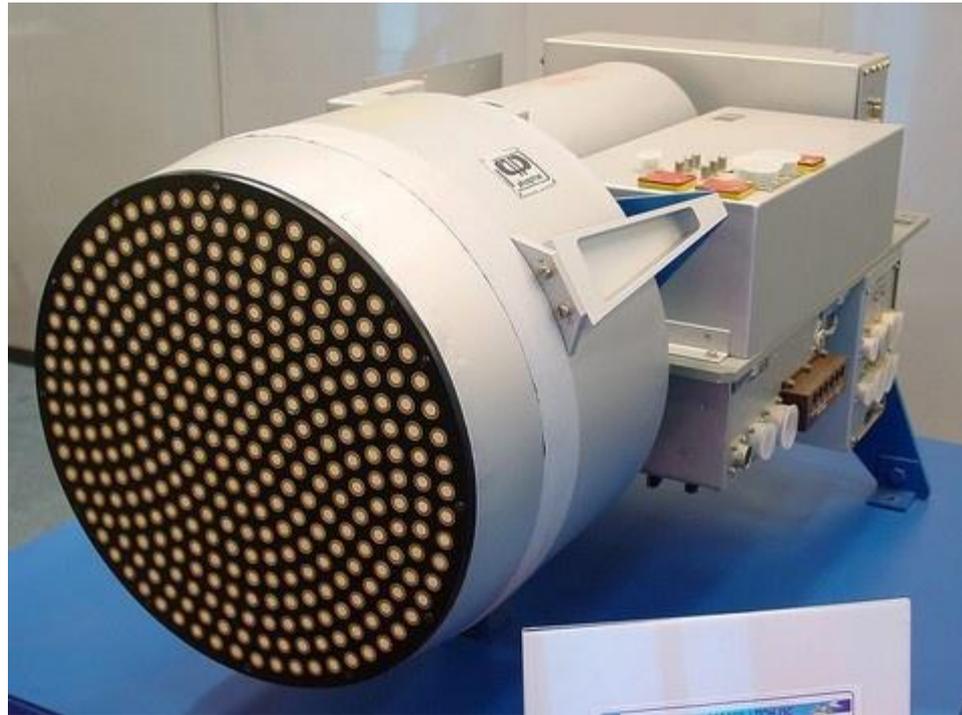
- Крайние элементы имеют другую ДН
- (иногда даже используют ряд или два пассивного окружения)
- КУ антенны вовсе не «скачет» при появлении видимого ИБЛ
- Нули парциальной ДН – место, где ФАР может «запереться»

ДН излучателя – огибающая для КУ ФАР

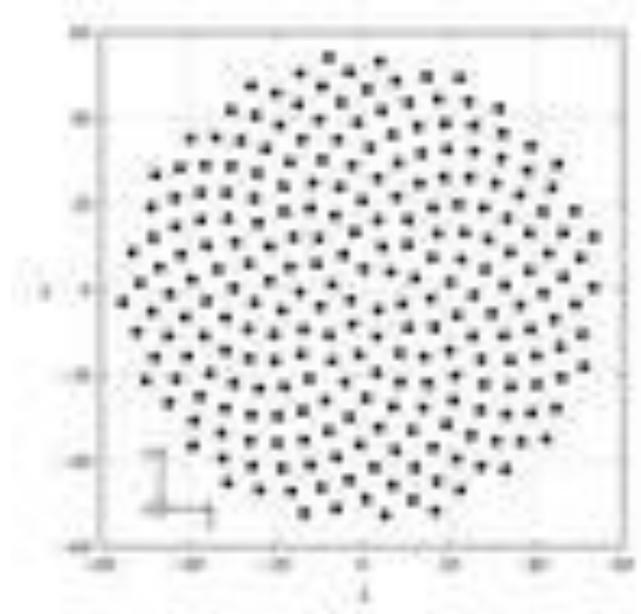
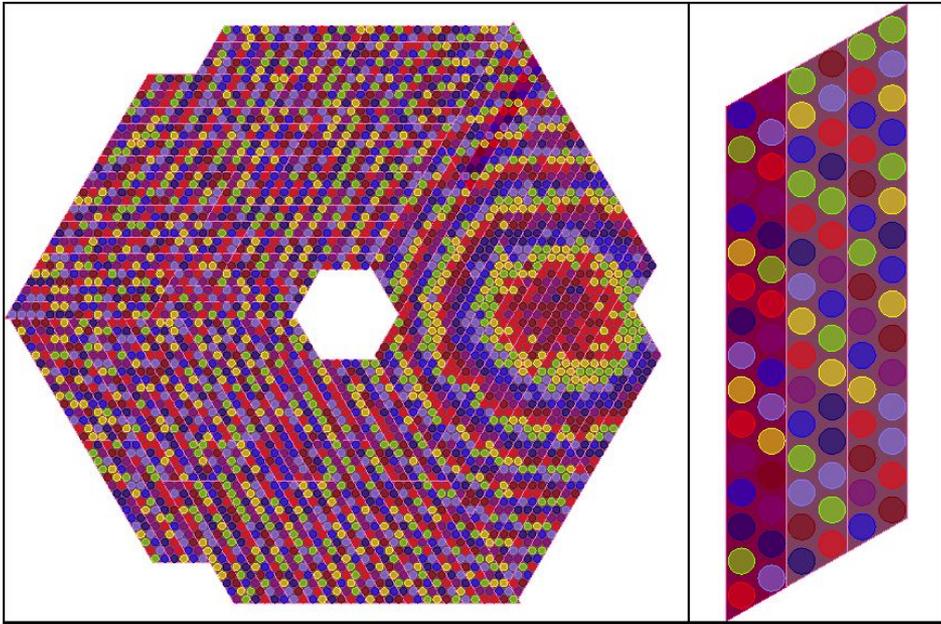


Подавление ИБЛ

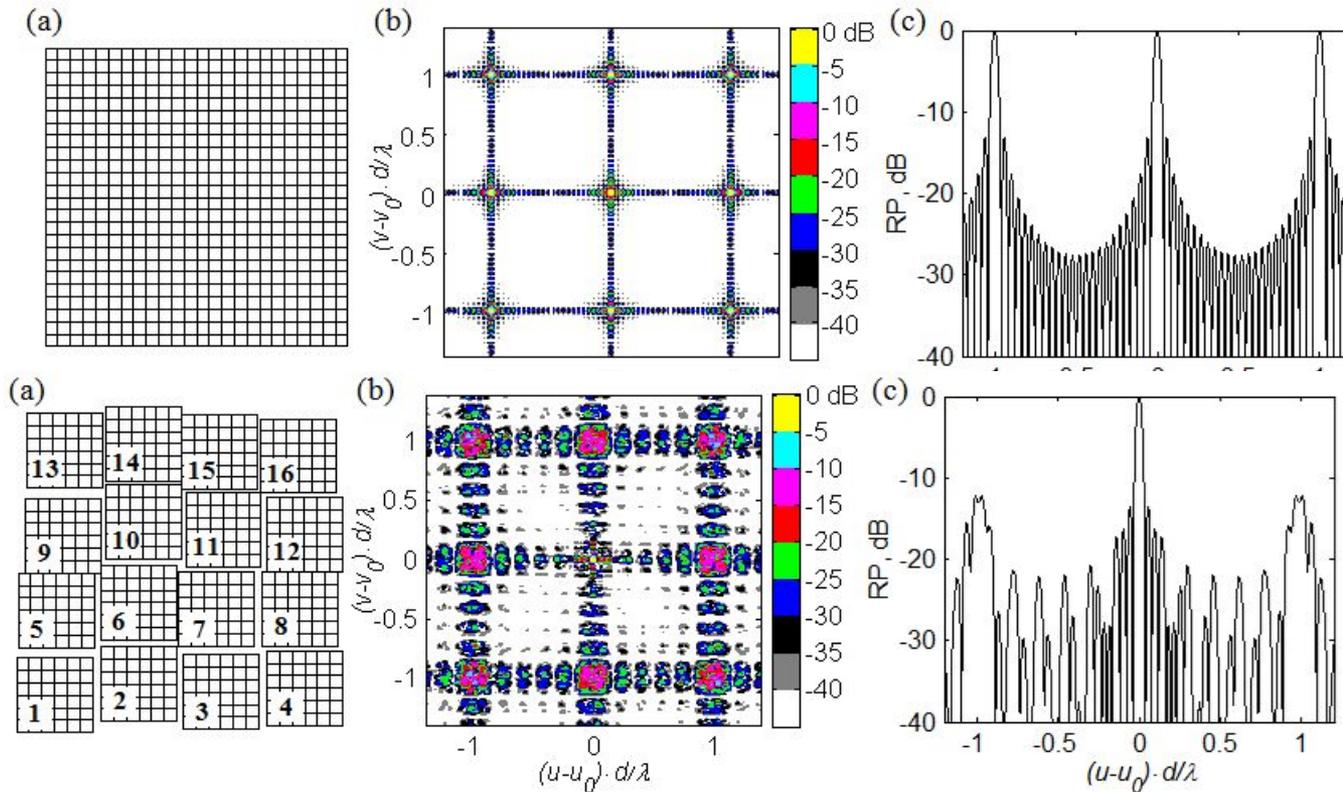
- Неэквидистантная расстановка элементов



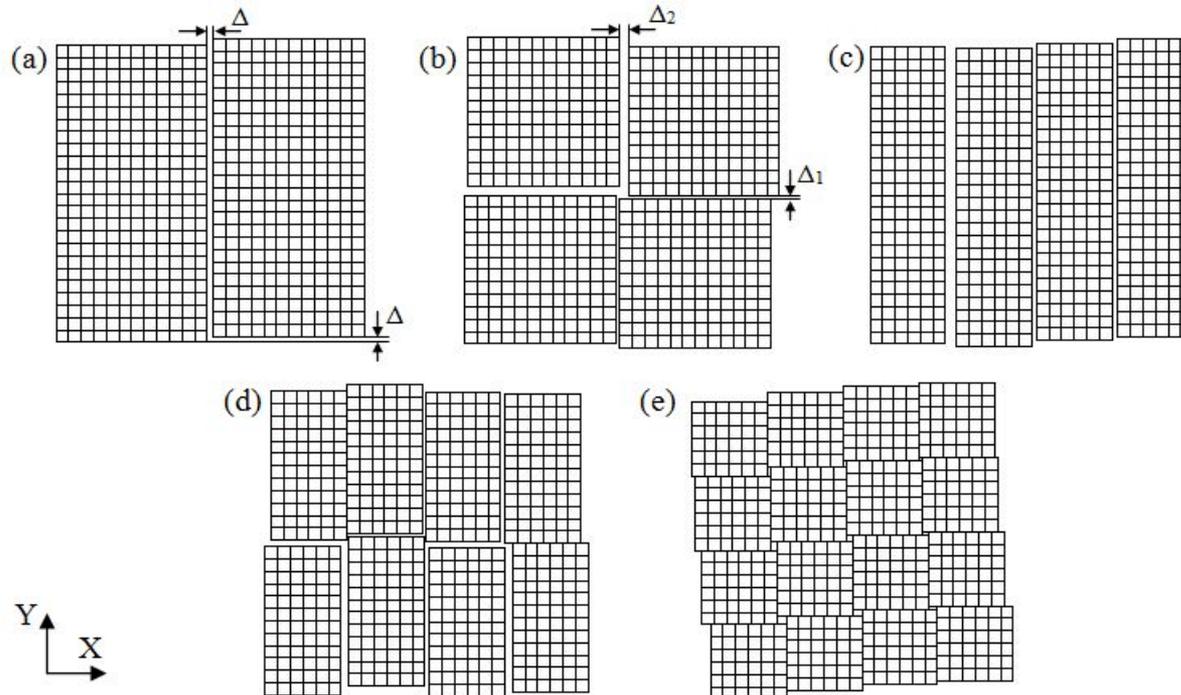
Периодичность vs аperiodичность



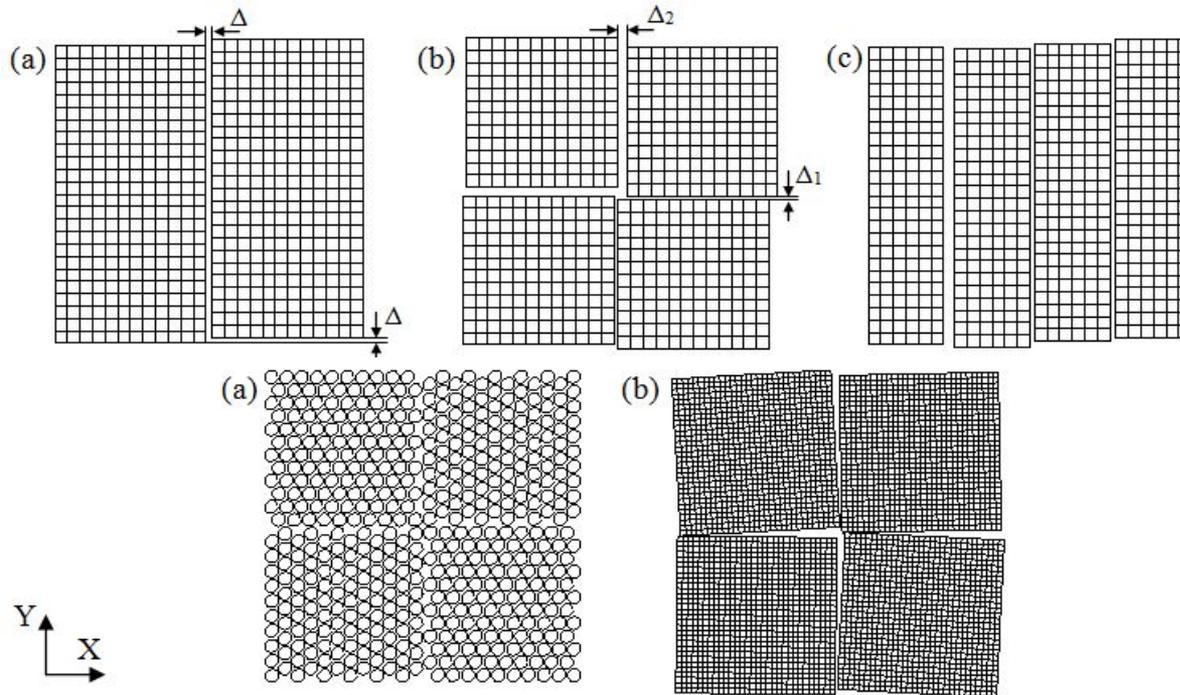
За счет разделения на подрешетки



За счет разделения на подрешетки



За счет разделения на подрешетки



За счет разделения на подрешетки

