

**Влияние дискретного  
управления фазами на  
характеристики цифровой  
антенной решетки.**

Антенная система – новый класс интегрированных антенно-приемных комплексов, отличительной особенностью которых является использование цифровых (нелинейных) элементов в тракте обработки сигнала. Антенные системы строятся на основе антенных решеток различной конфигурации.

Наибольшее распространение получили:

- линейные антенные решетки (ЛАР);
- плоские антенные решетки (ПЛАР, гексагональные ПЛАР);
- круговые антенные решетки (КАР).

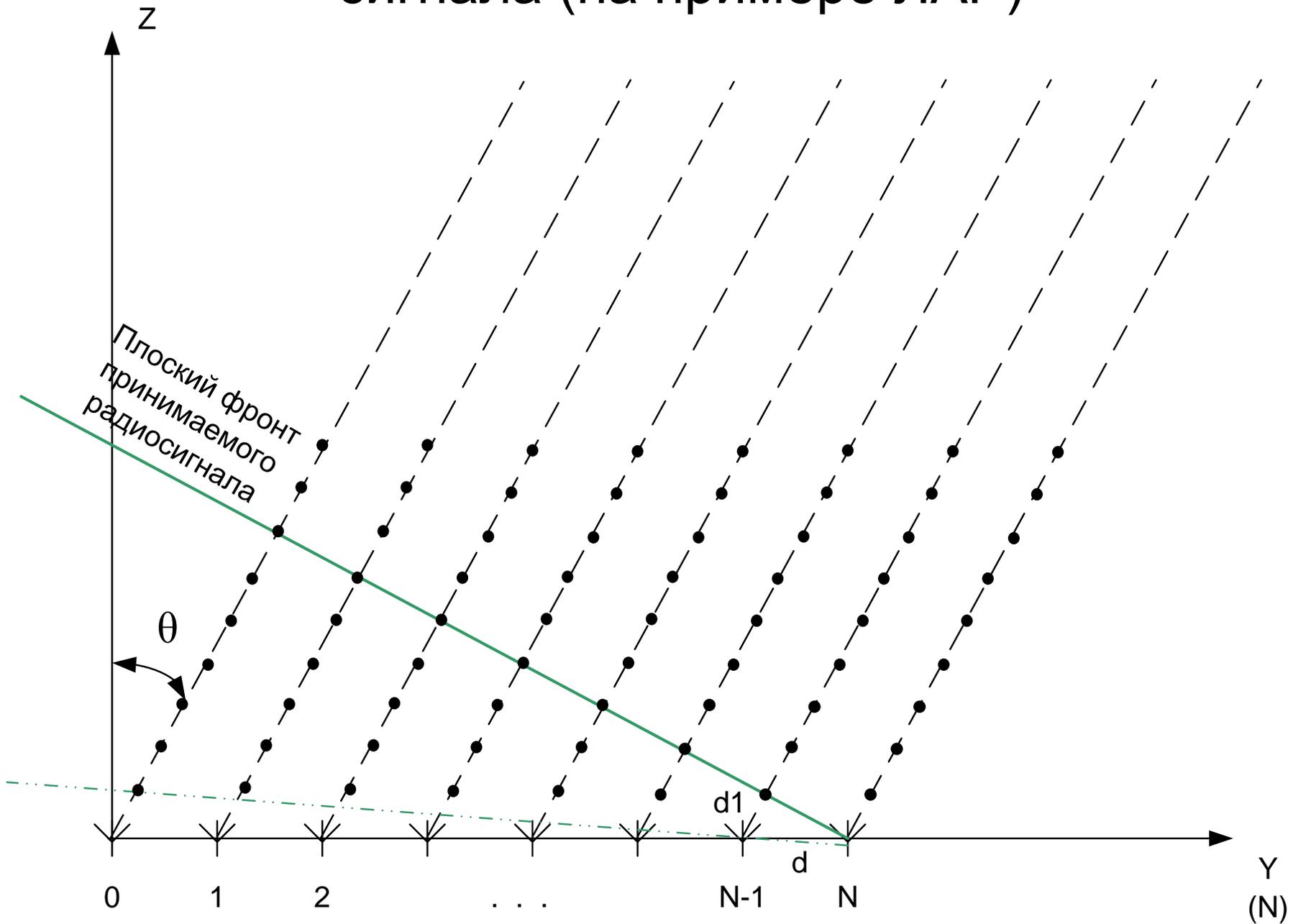
Реализация плоского фронта радиосигнала, обеспечивающего формирование ДН из числовой последовательности возможно принципиально провести тремя способами:

- прямое сложение значений сигналов, принятых излучателями решетки и откантованных в различные моменты времени;

- сложение вычисленных значений сигналов в моменты времени, обеспечивающие квазинепрерывное перемещение ДН в пространстве;

- введение в числовые значения излучателей фазовых сдвигов с последующим сложением получаемых значений.

# Пространственно-временная дискретизация сигнала (на примере ЛАР)



- Дискрет фазы, с которым будет происходить регулирование составит:

$$\Delta = k \cdot \frac{c}{f_d} = 2\pi \frac{f_c}{f_d}$$

где  $k = 2 \cdot \pi / \lambda$  - волновое число;  $c$  – скорость света;  $f_d$  – частота дискретизации

Для отклонения луча решетки в угловое положение  $\theta_0$  на ее элементах необходимо создать линейное фазовое распределение:

$$\Phi_v = 2\pi u_0 v$$

где  $u_0 = \frac{d}{\lambda} \sin \theta_0$ ,  $\theta_0$  – полярное расстояние, отсчитывается от нормали к решетке

$v$  – номер излучателя

Наилучшим дискретным приближением к идеальному фазовому распределению с фазовой ошибкой не превышающей  $\Delta/2$ , является ступенчатое распределение, выставленное по линейному алгоритму:

$$\Phi_v = \Delta E \left( \frac{2\pi u_0 v}{\Delta} + 0.5 \right) = 2\pi u_0 v + \Psi_v$$

где  $E(x)$  – целая часть от  $x$ ,

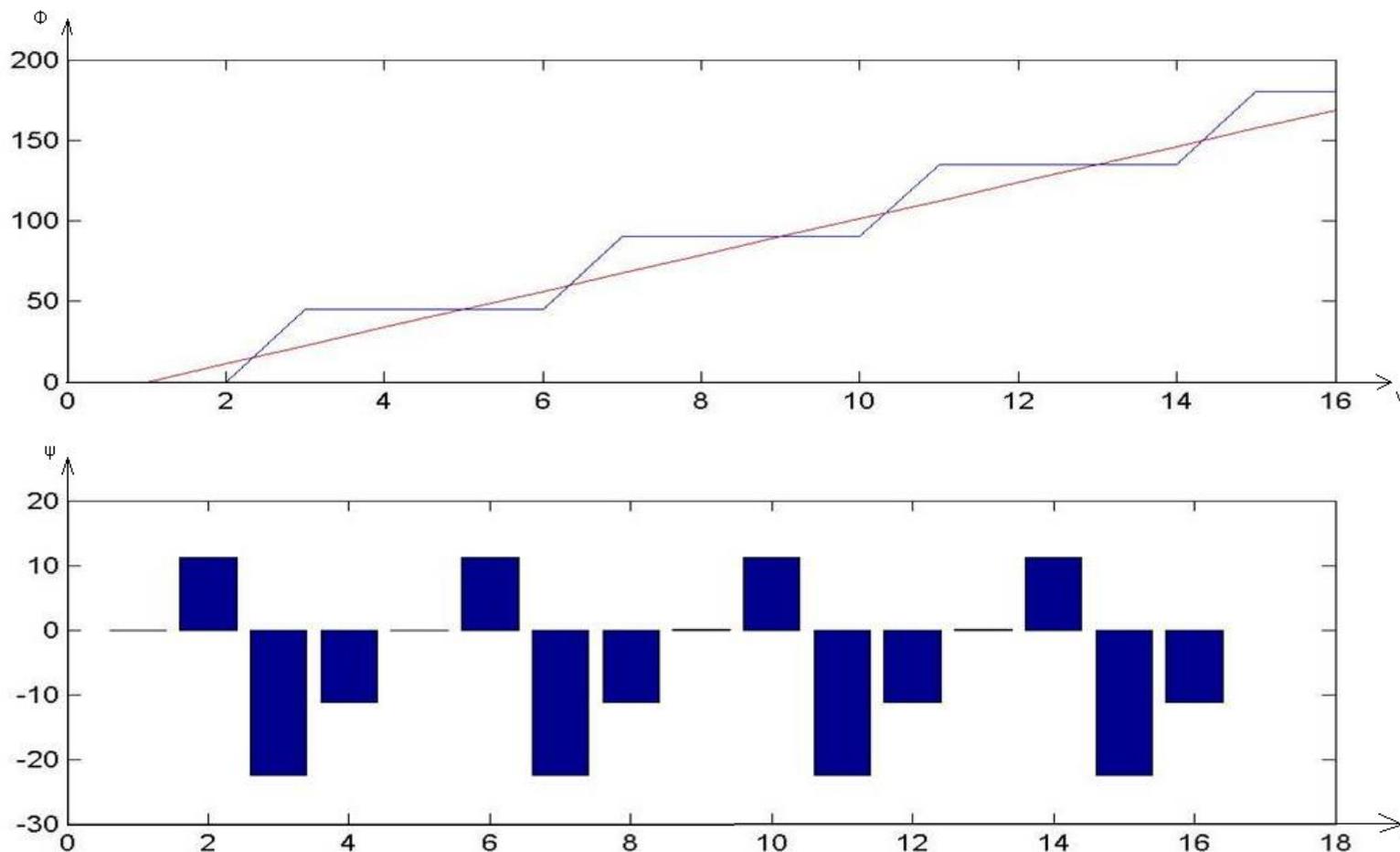
$$\Psi_v = \Delta D \left( \frac{2\pi u_0 v}{\Delta} + 0.5 \right) - \frac{\Delta}{2}$$

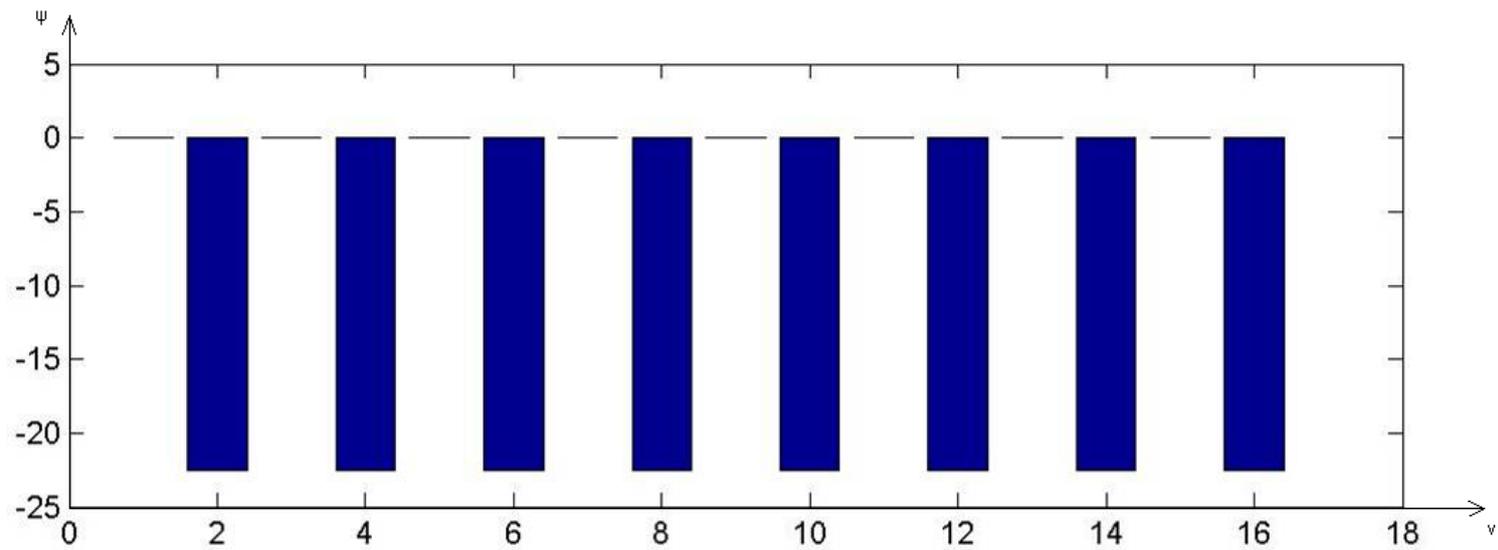
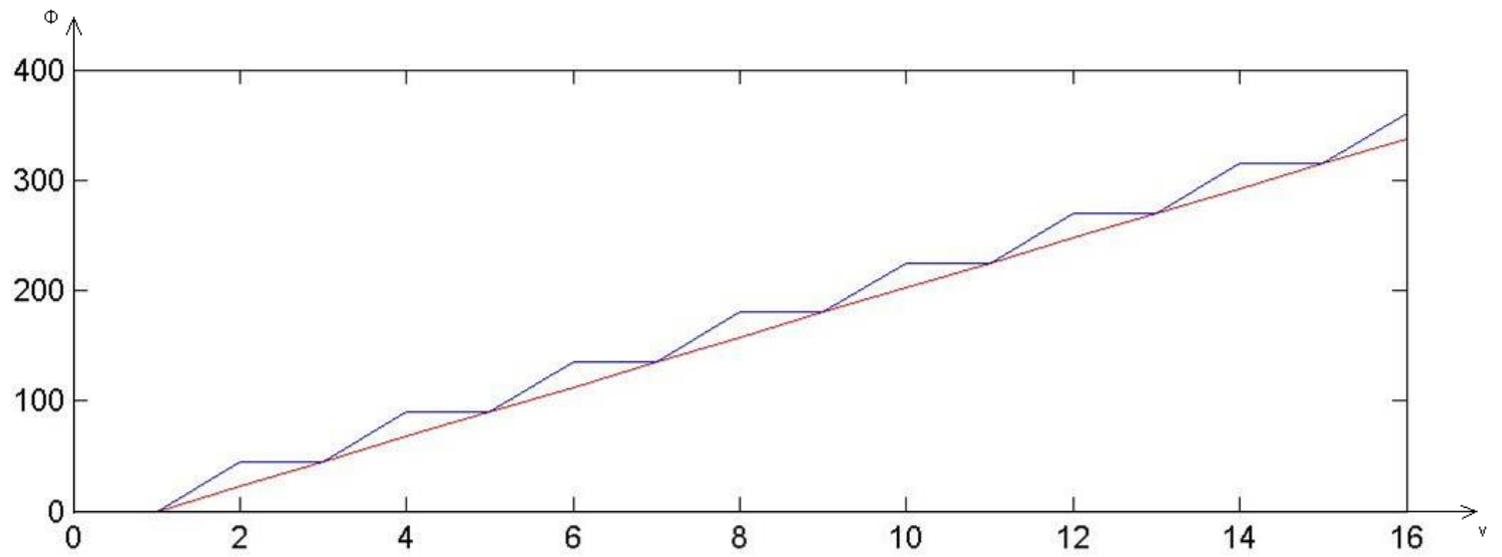
$D(x)$  – дробная часть от  $x$

- При фазировании по линейному алгоритму может быть реализован дискретный набор возможных угловых отклонений луча, причем любое из этих отклонений может быть задано в виде:

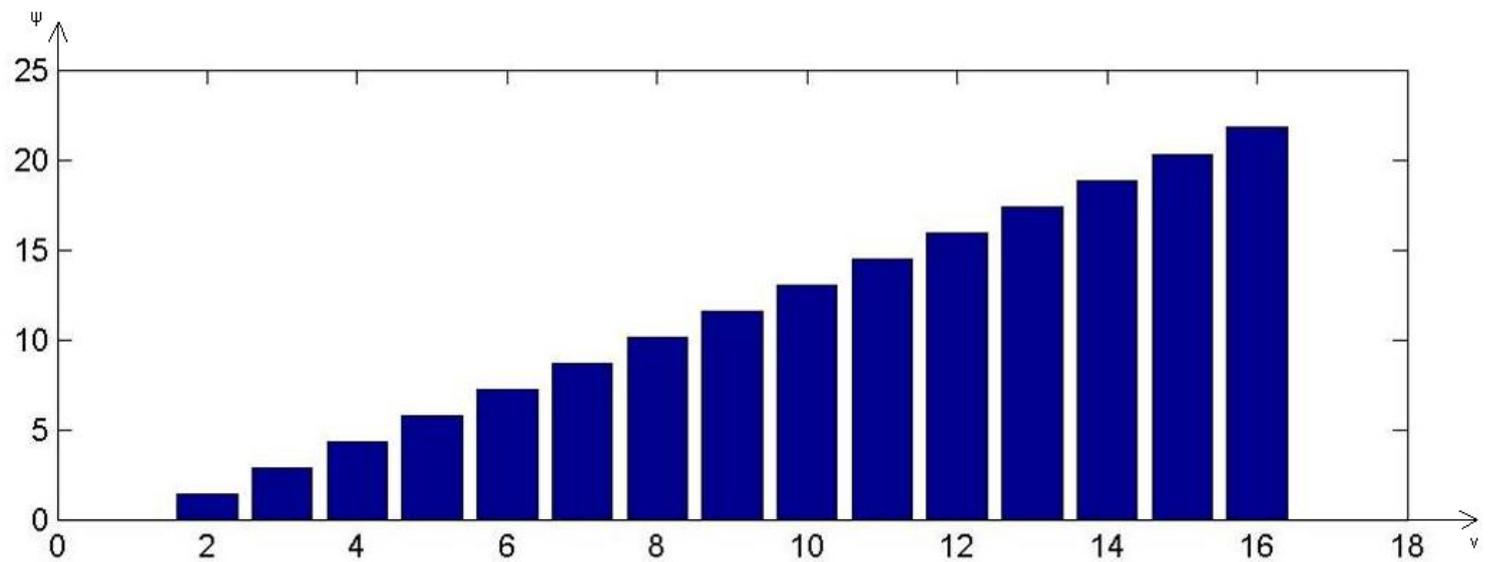
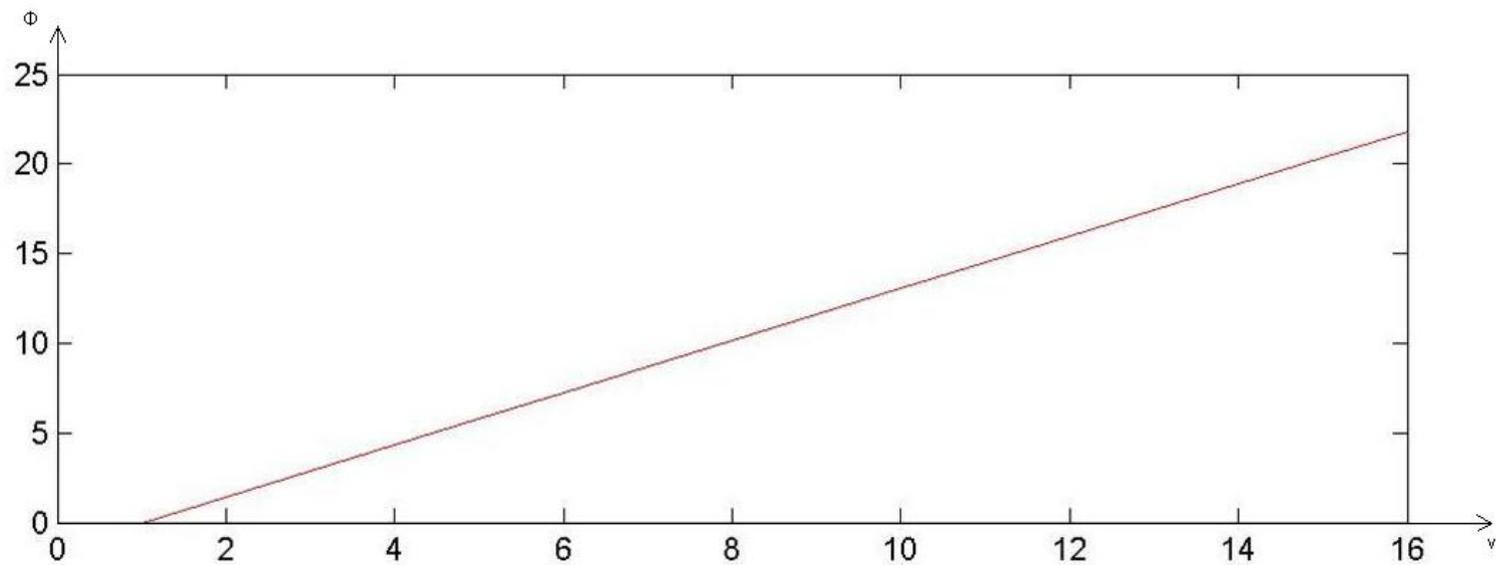
$$u_0 = \frac{l}{m} \frac{\Delta}{2\pi} \quad , \quad (1)$$

где  $l$  и  $m$  – целые взаимно простые числа несократимой дроби  $\frac{l}{m}$





Фазовые ошибки при  $l/m = 1/2$  на антенных элементах  $AЭ_1 \dots AЭ_N$



Фазовые ошибки при  $l/m = 1/32$

# Относительное смещение луча за счет фазовых ошибок

- Относительное смещение луча за счет фазовых ошибок определяется выражением:

$$\frac{\delta\theta}{\Delta\theta} = \frac{2n+1}{2\pi} \frac{\sum_{i=-n}^{\pi} I_i \Delta_i}{\sum_{i=-n}^n I_i i^2}, \quad (2)$$

где  $I_i$  – амплитуда тока в  $i$ -том элементе.

Очевидно, что сумма фазовых ошибок будет наибольшей при  $m = 2$  и  $m = 32$

В обоих случаях сумма фазовых ошибок равна:

$$\sum \Delta_i = \frac{\Delta N}{4}, \quad (3)$$

Подставляя выражение (3) в (2), получим:

$$\frac{\delta\theta}{\Delta\theta} = \frac{1}{8\pi} \frac{\Delta N^2}{\sum_{i=-n}^n i^2} = \frac{3}{2\pi} \frac{\Delta}{N+3+2/N} \approx \frac{3}{2\pi} \frac{\Delta}{N+3}, \quad (4)$$

# Влияние на КНД и уровень бокового излучения

- Уменьшение КНД оценивается выражением:

$$\frac{D}{D_0} = g = \frac{1}{1 + \beta_{cp}^2}, \quad (5)$$

где  $D_0$  – КНД системы при идеальном амплитудно-фазовом распределении,  $D$  – реальное КНД.

В теории антенных решеток уровень бокового излучения оценивается отношением дополнительного излучения, приобретаемого за счет не идеальности амплитудно-фазового распределения к излучению при идеальном распределении и называется уклонением истинной диаграммы направленности от оптимальной.

Уклонение истинной диаграммы от оптимальной при неоптимальном фазовом распределении находится в пределах:

$$\frac{\beta_{cp}}{\sqrt{N}} \leq \xi_D \leq \frac{\beta_{cp}}{\sqrt{2}}, \quad (6)$$

$\beta_{cp}$  - среднеквадратичное уклонение реального амплитудно-фазового распределения от идеального, определяется выражением:

$$\beta_{cp} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N |\Delta_i|^2}{\sum_{i=1}^N |A_{i0}|^2} \right\}^{1/2}, \quad (7)$$

- При условии, что  $Ai0 \equiv 1$ , то выражение (7) для определения среднеквадратического уклонения можно упростить:

$$\beta_{cp} = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N |\Delta_i|^2}{N} \right\}^{1/2}, \quad (8)$$

Для случая  $m = 2$  среднеквадратичное уклонение будет максимальным.

Тогда,

$$\beta_{cp} = \frac{\Delta}{2\sqrt{2}}, \quad (9)$$

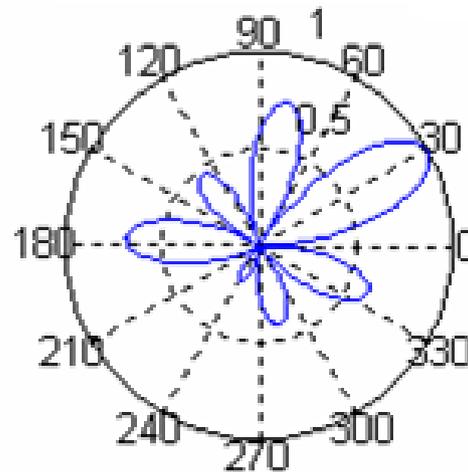
Оценка среднего среднеквадратичного уклонения для распределения фазовых ошибок при  $m = 2N$  определяется выражением:

$$\beta_{cp} = \left\{ \frac{\Delta^2 \left(1 - \frac{3}{N} + \frac{1}{N^2}\right)}{12} \right\}^{1/2} \approx \frac{\Delta}{2\sqrt{3}}, \quad (10)$$

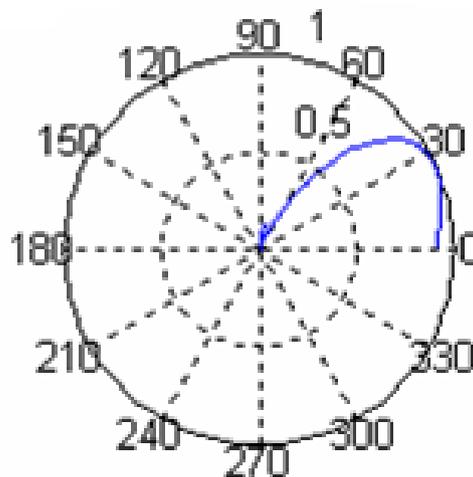
# Результаты численного моделирования

# Кольцевая решетка, $f_d=25\text{МГц}$ , КНД = 5.9.

Азимутальная ДН

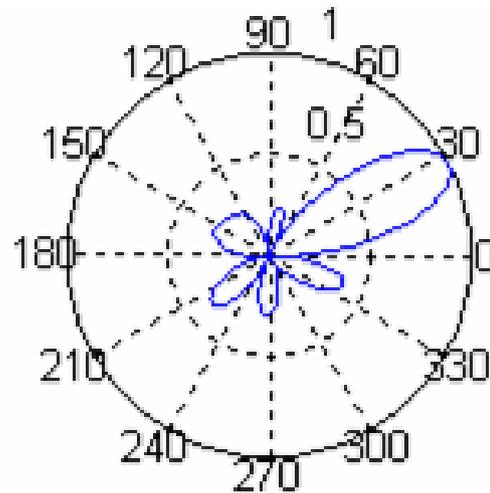


Угломестная ДН

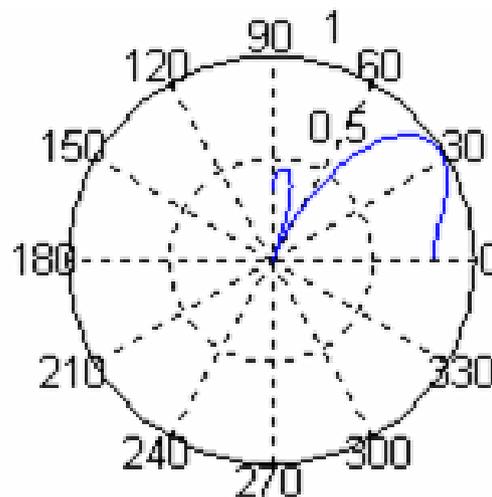


# Кольцевая решетка, $f_d=30\text{МГц}$ , КНД = 8.9.

Азимутальная ДН

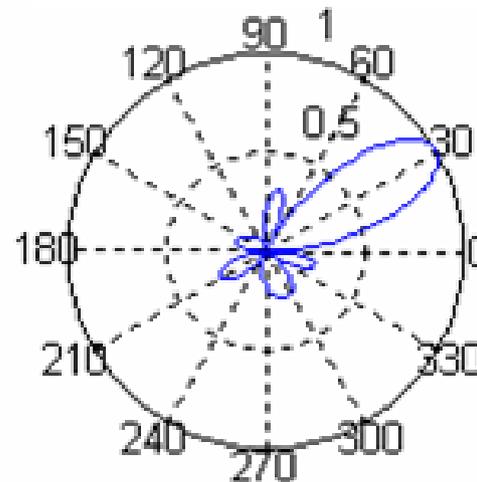


Угловая ДН

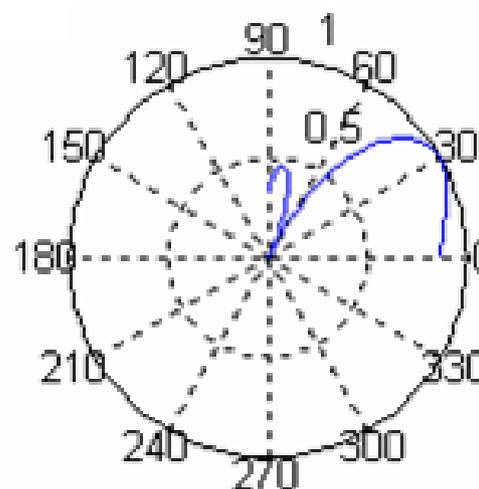


# Кольцевая решетка, $f_d=60\text{МГц}$ , КНД = 10.3.

Азимутальная ДН

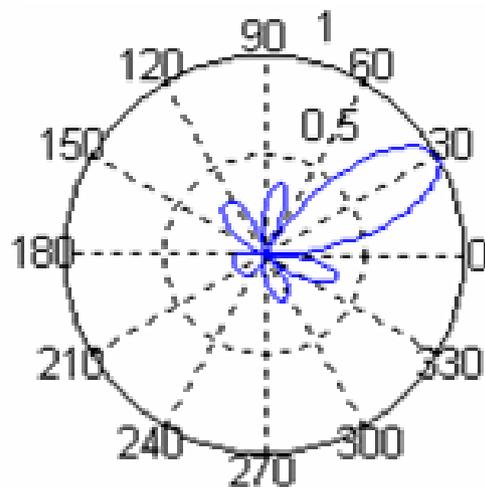


Угломестная ДН

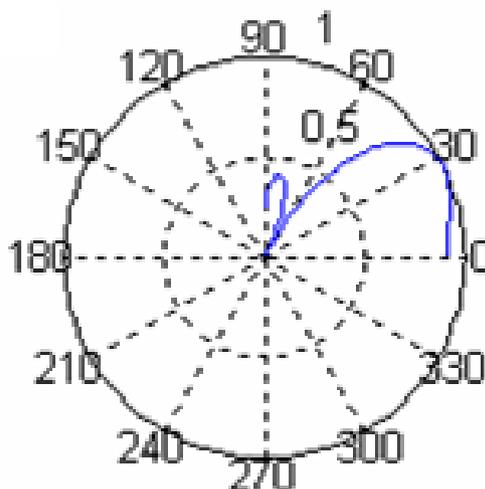


# Кольцевая решетка, $f_d=150\text{МГц}$ , КНД = 10.3.

Азимутальная ДН



Угломестная ДН



Спасибо за внимание