

# Структура курса

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

# Калибровка и контроль ФАР

- Калибровка есть процесс определения характеристик каналов ФАР, участвующих в алгоритмах диаграммоформирования
- Диагностика есть процесс определения неисправностей составных частей ФАР

# Основное соотношение управления ФАР (фаза)

$$\Delta\varphi_i = \frac{2\pi}{\lambda}(ux_i + vy_i) + \varphi_i^0$$

$\lambda$  - длина волны

$x, y$  - координаты элемента

$u, v$  - направляющие косинусы

$\varphi_i^0$  - начальная фаза канала

# Основное соотношение управления ФАР (амплитуда)

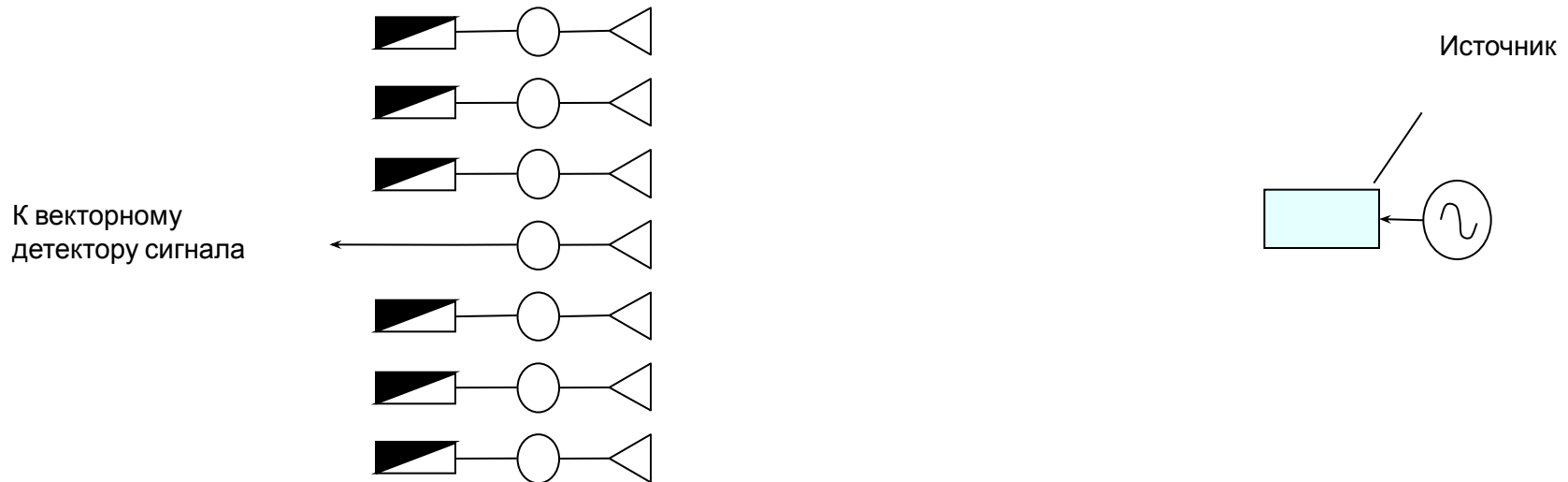
$$A_i^0 + \Delta A_i = A(x_i, y_i)(dB) + const$$

$A_i^0$  - начальная амплитуда коэффициента передачи канала (дБ)

$\Delta A_i$  - управляемая амплитуда коэффициента передачи канала (дБ)

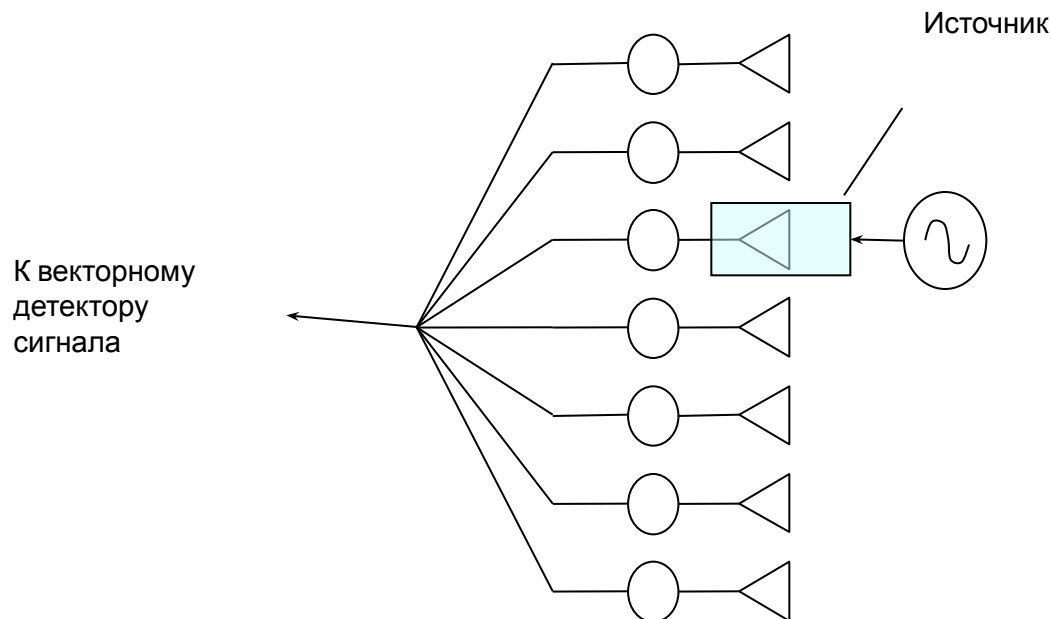
$A(x_i, y_i)(dB)$  - требуемое амплитудное распределение (дБ)

# Калибровка с последовательным отключением каналов



Развинтить антенну непросто, но в активных антеннах каналы можно отключать  
Необходима когерентность измерений, но ее трудно обеспечить  
Метод идеален для приемных цифровых антенн

# Калибровка с помощью зонда

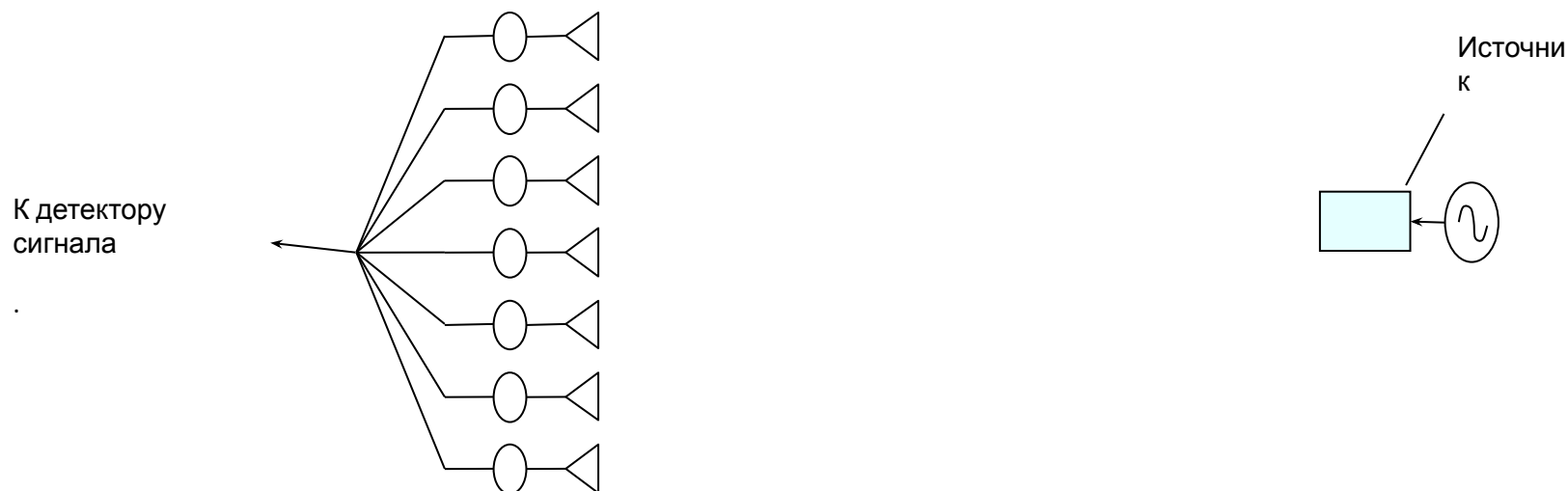


Зонд надвигается на каждый элемент непосредственно  
Если зонд недостаточно близко – мешают сигналы соседних каналов.

# Ручные измерения – зло

- Ручная перестыковка – источник ошибок
- Ручное позиционирование – источник ошибок
- Человеческая усталость – источник ошибок

# Калибровка методом переключений



Зонд неподвижен относительно антенны, при необходимости учитывается набег по эфиру  
Выделение сигнала канала производится манипуляцией фазовращателя канала(лов).  
Могут быть альтернативные методы впрыска контрольного сигнала в апертуру

# Что нужно выбрать при разработке метода калибровки:

- Как часто будет проводиться калибровка
- Как доставить контрольный сигнал
- Как измерять суммарный сигнал
- (амплитуда или еще и фаза)
- Как управлять фазовращателями каналов
- Как обрабатывать данные
- Дополнительные особенности - для многоканальных антенн

# Как часто производить калибровку

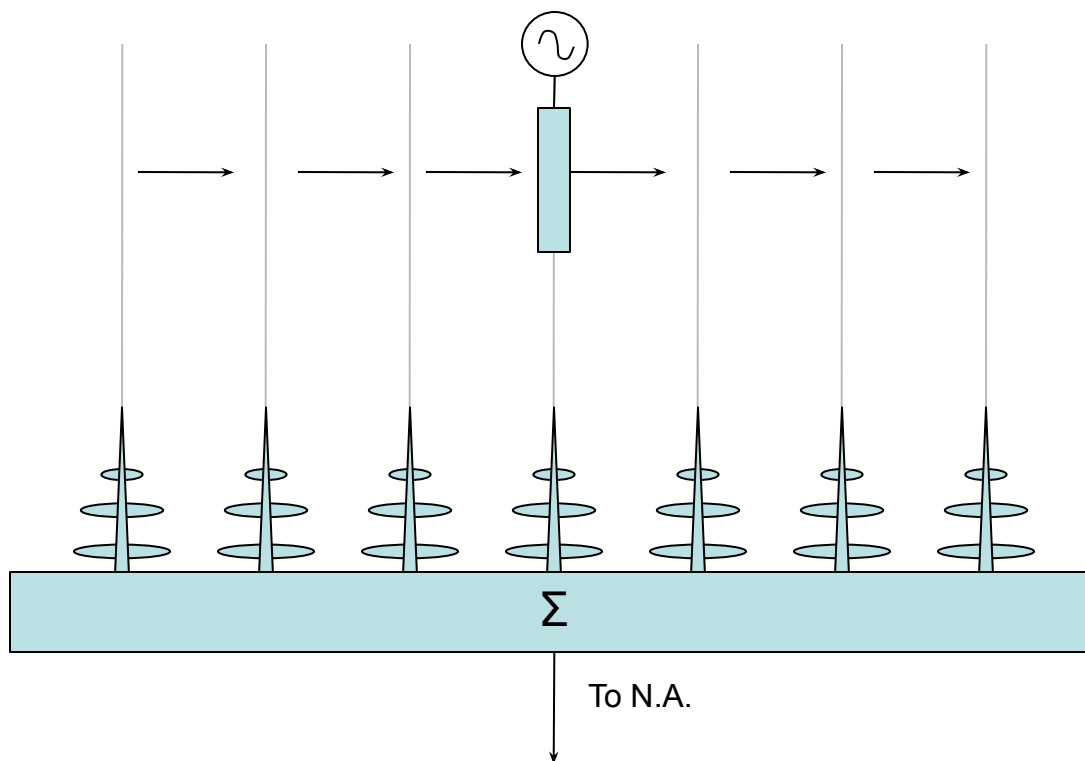
- Один раз за жизненный цикл (гарантийный срок)
  - После ремонта и замены модуля
  - Перед каждым сеансом
  - Регулярно через определенное время
  - Несколько раз на протяжении сеанса.
- 
- Главный вопрос – нужна ли встроенная система калибровки

Как доставить контрольный сигнал?

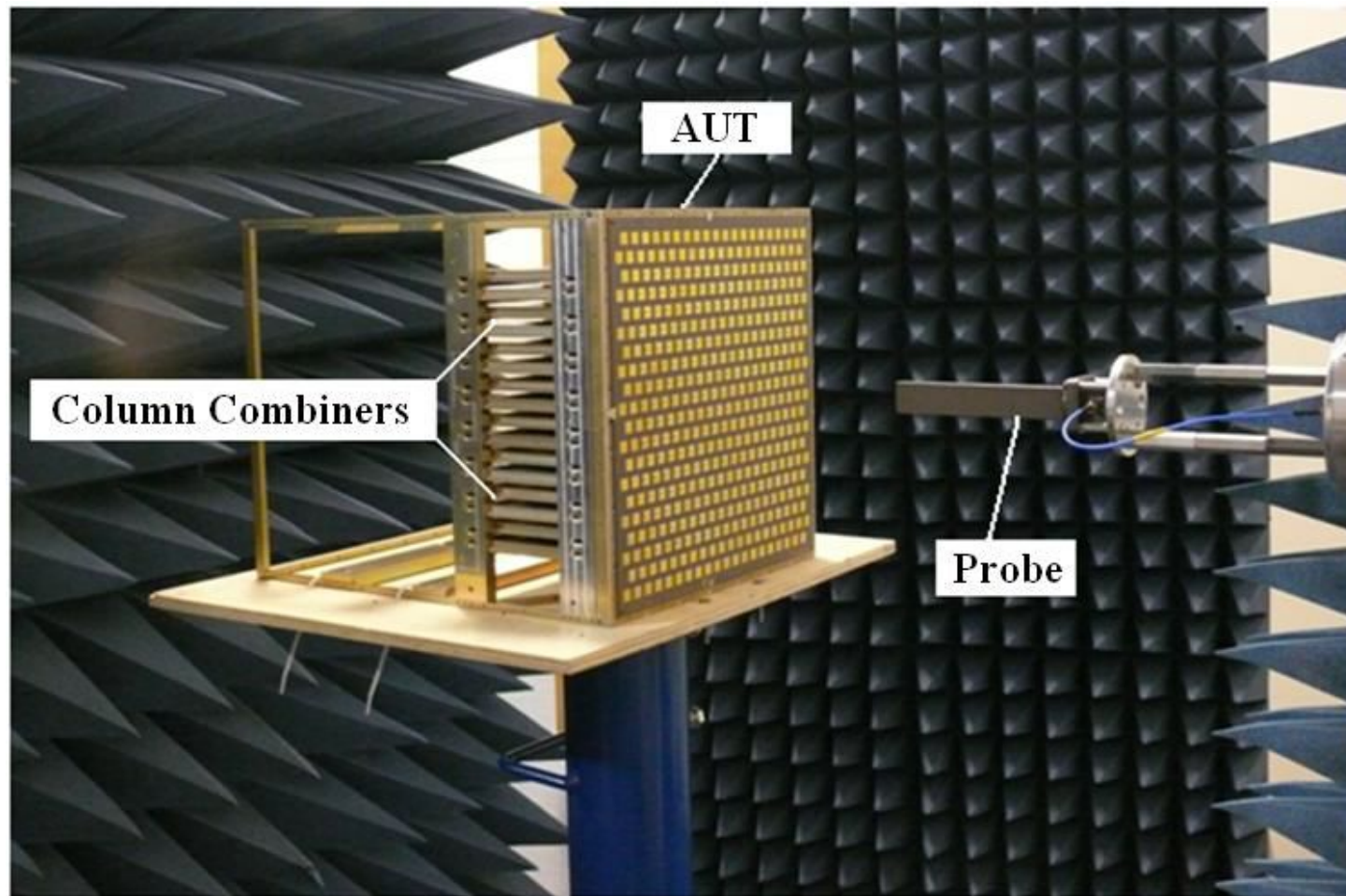
# Вышка с источником сигнала



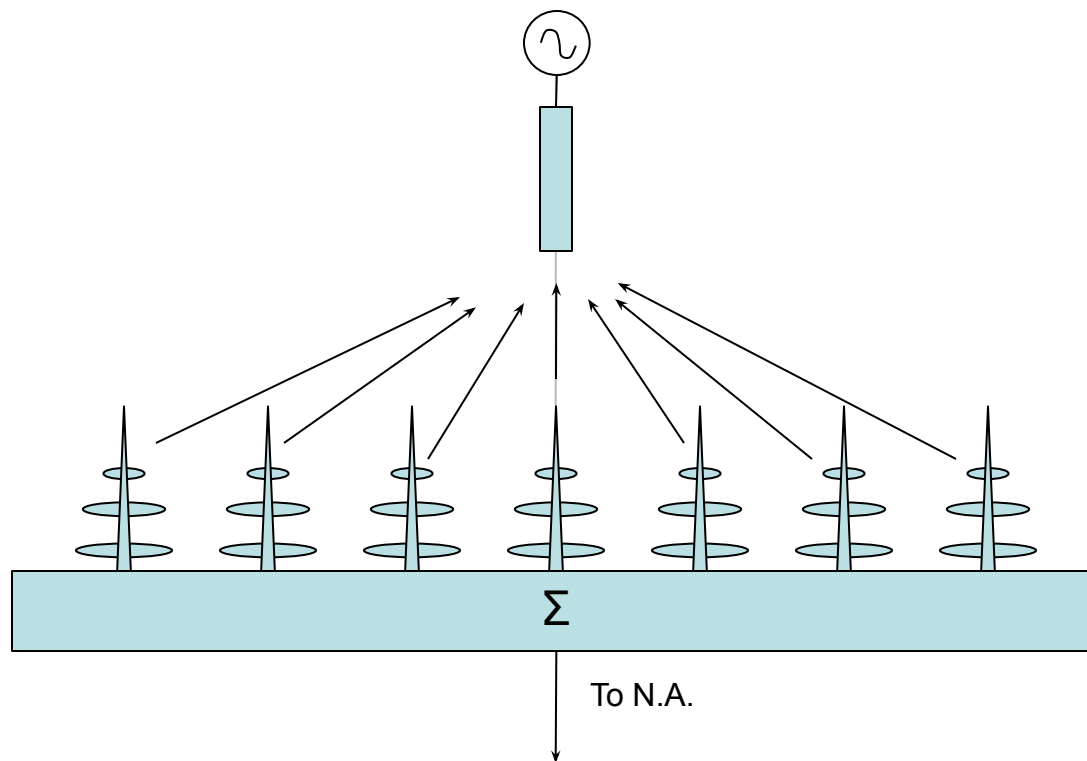
# Зонд в ближнем поле - схема



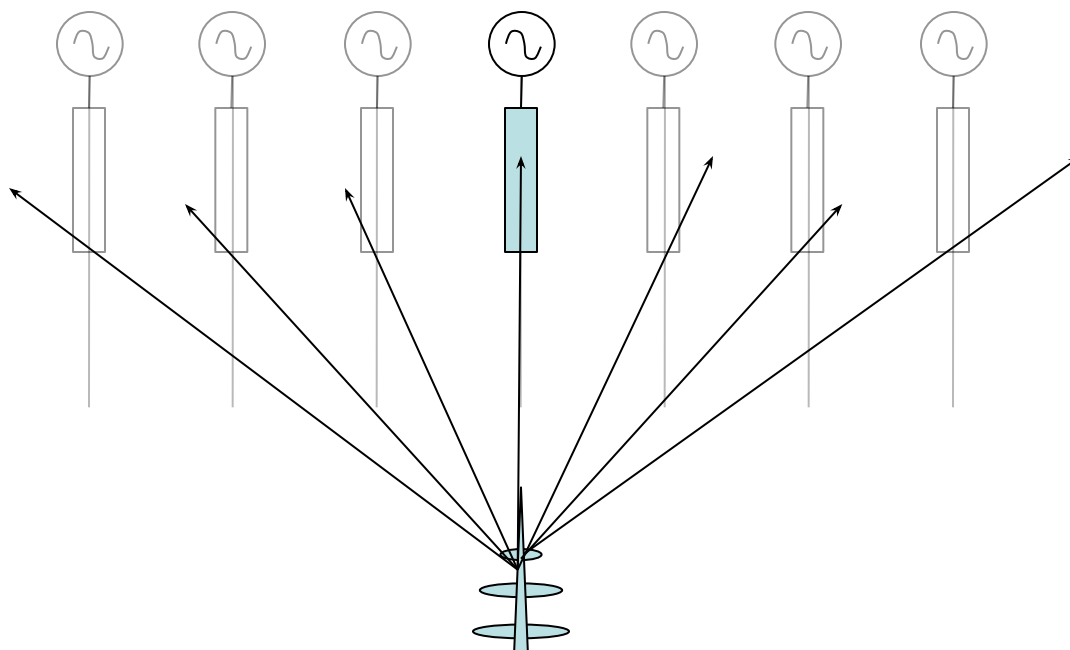
# Зонд в ближней зоне



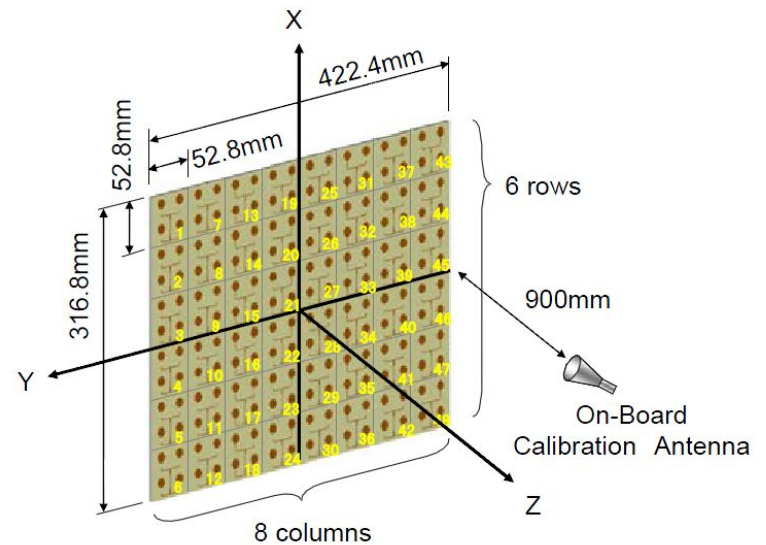
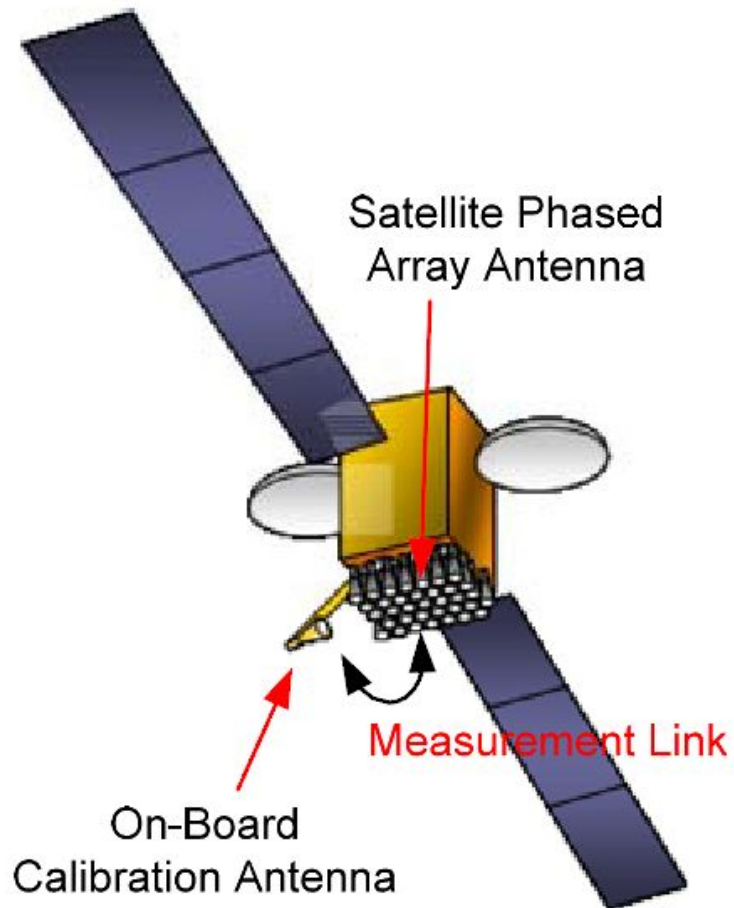
# Вид с зонда



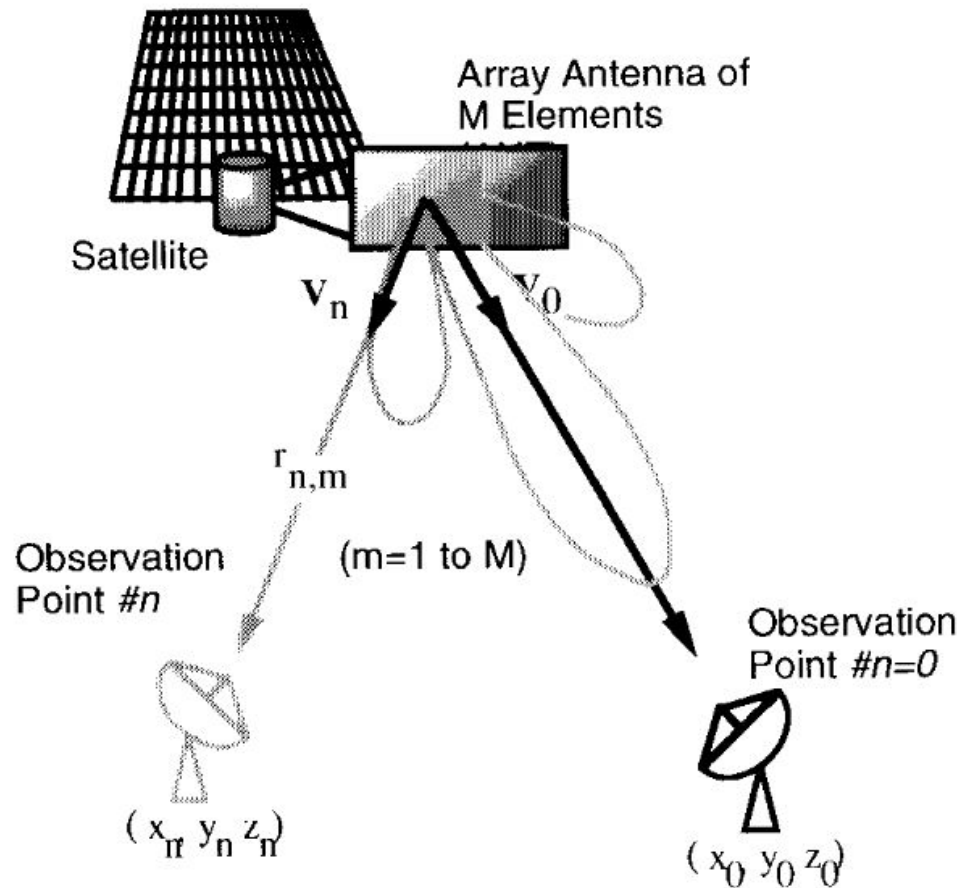
# Вид с элемента



# На выносной штанге



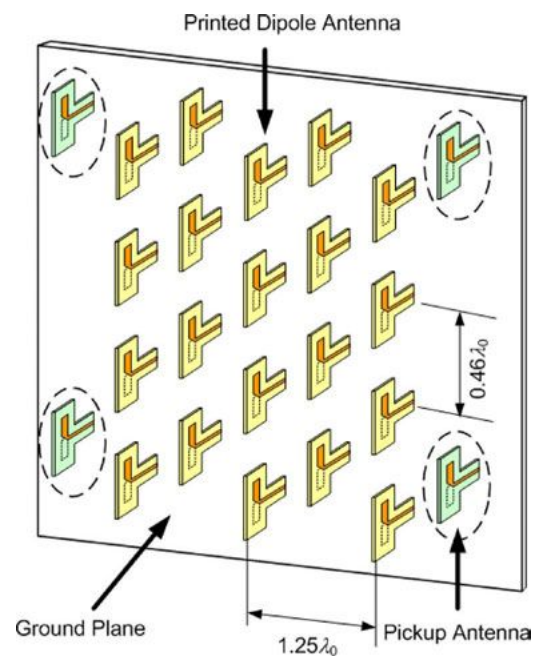
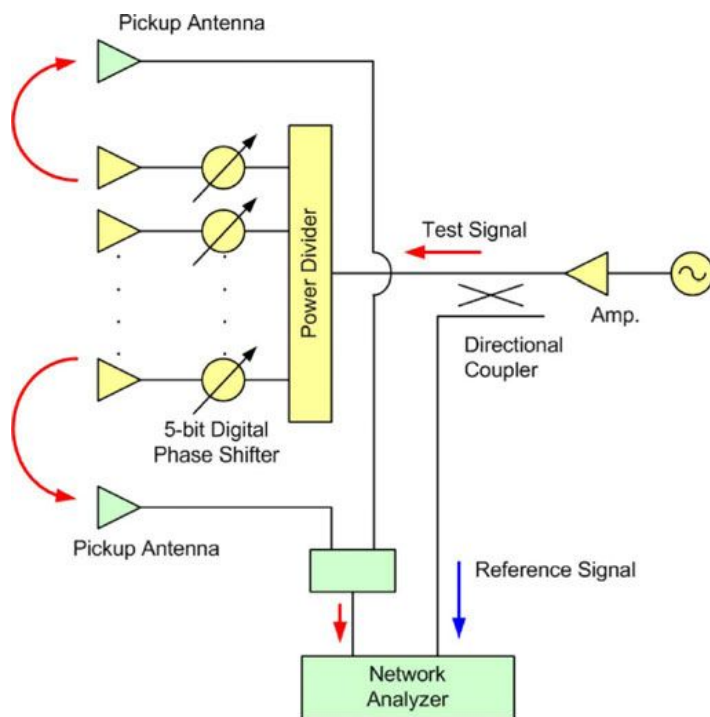
# На поверхности Земли (спутник)



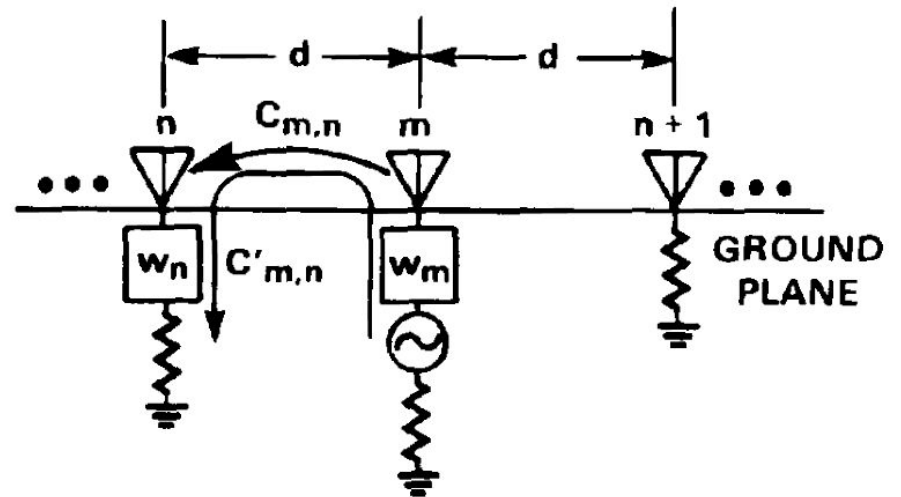
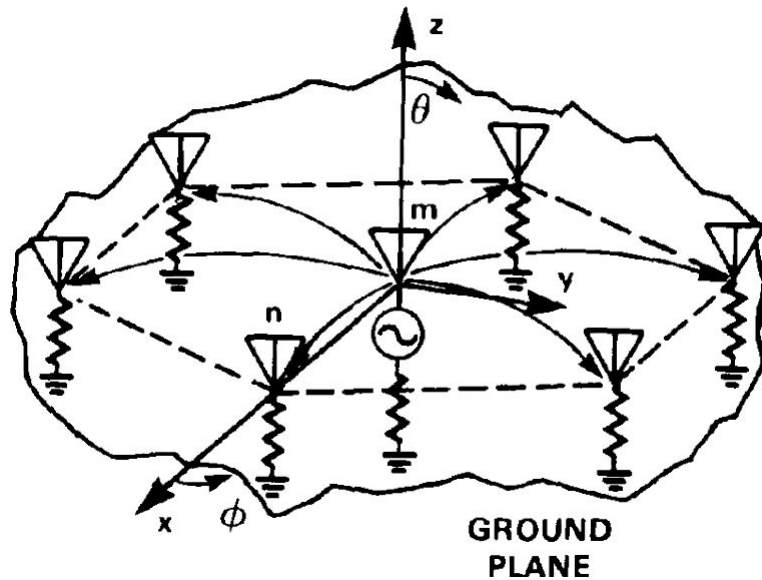
# Калибровка по небесным источникам

- Звезды
- Солнце
- Спутники

# Дополнительные элементы - зонды



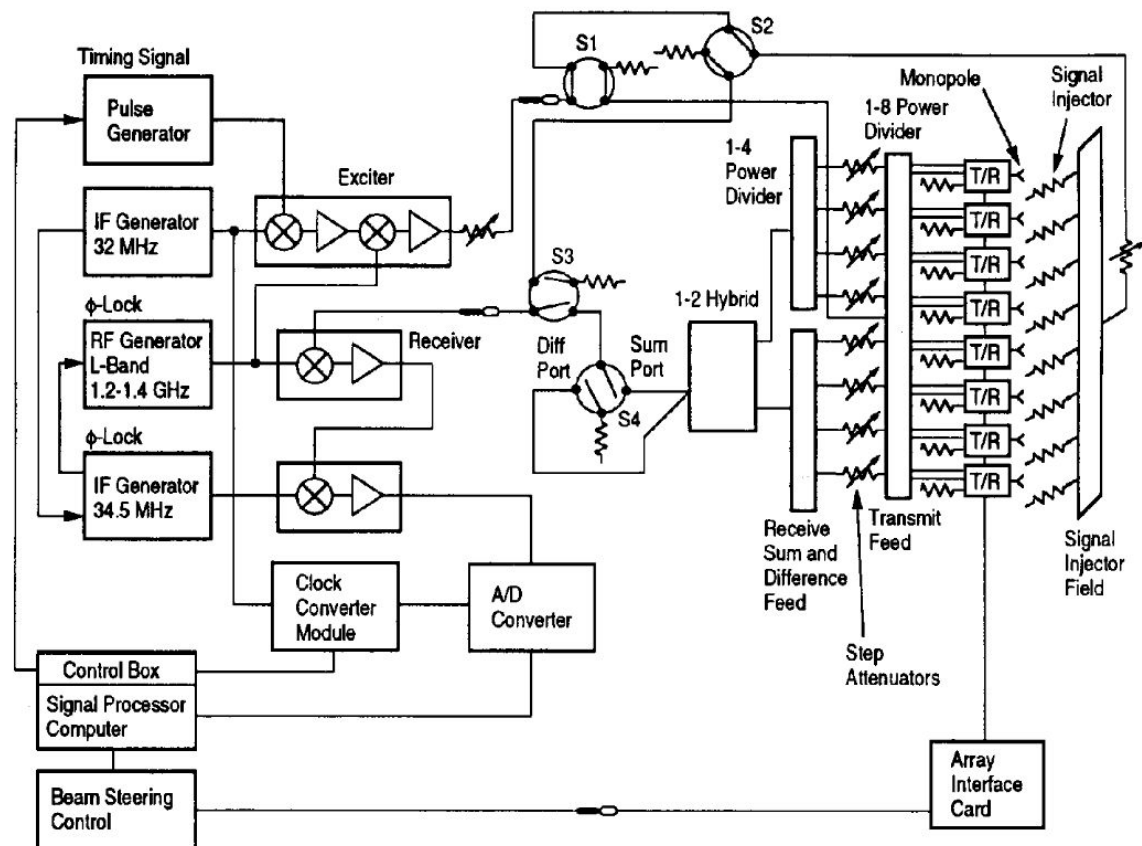
# Взаимная связь между элементами



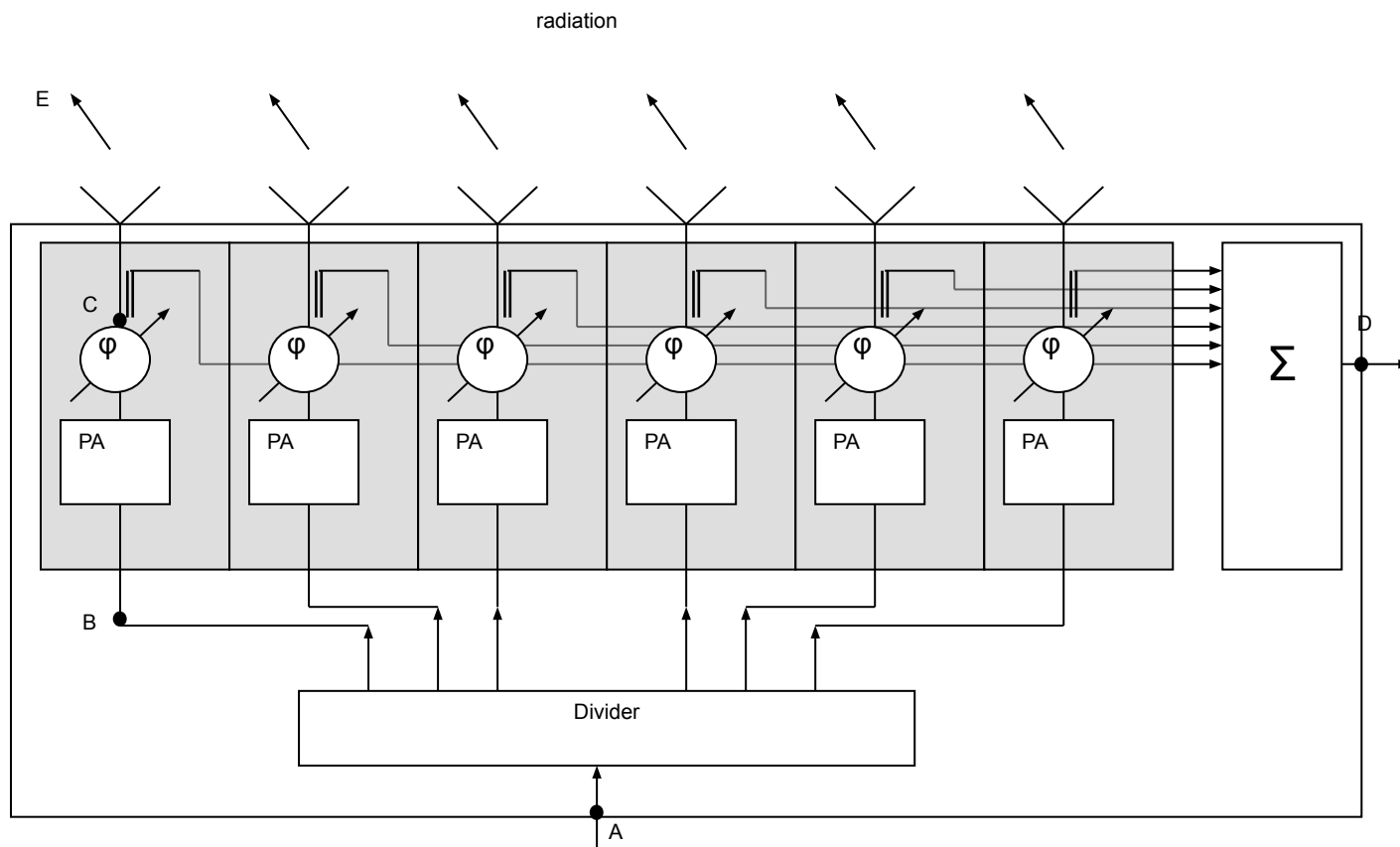
# Внутреннее отражение от излучателей

Нет картинки

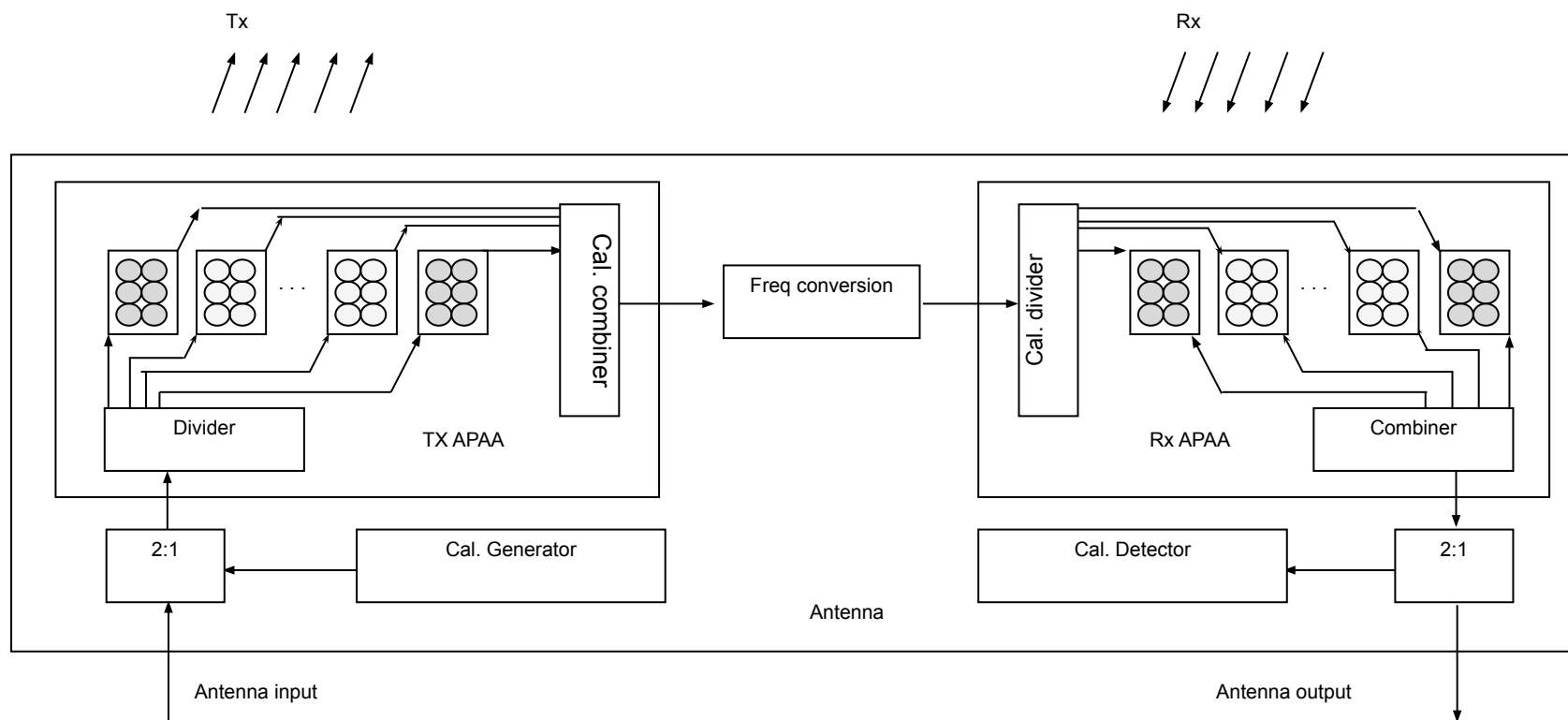
# Линии доставки сигнала в апертуру (проволока)



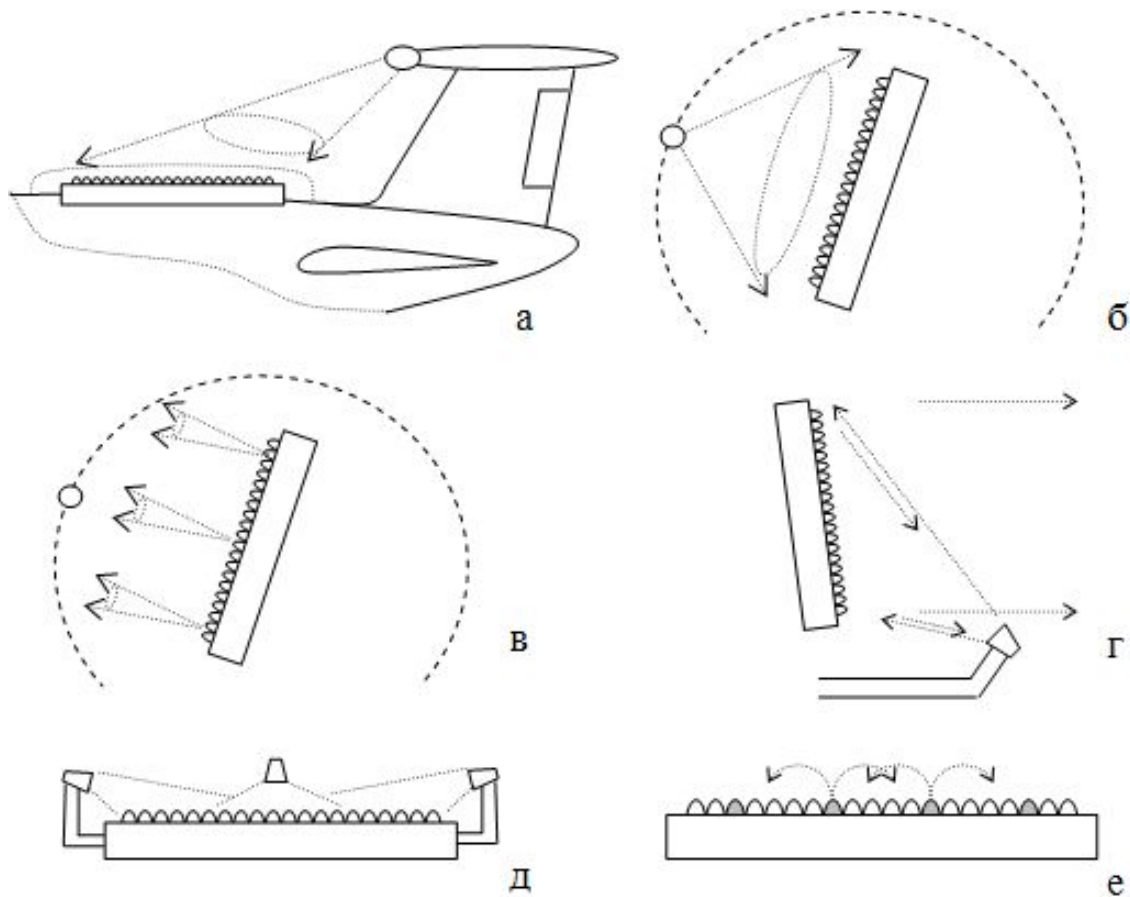
# Специальная система доставки сигнала



# Специальная система доставки сигнала



# Еще варианты



# Основной принцип калибровки по контрольным цепям

**Перед первым использованием:**

Определить начальные длины по эфиру  $\varphi_i^{far}$

Определить начальные длины по контрольным цепям  $\varphi_i^{cntr}$

Вычислить разность  $\Delta_i = \varphi_i^{far} - \varphi_i^{cntr}$

Запомнить указанные величины

$$\left( \varphi_i^{cntr} + \Delta_i = \varphi_i^{far} \right)$$

# Основной принцип калибровки по контрольным цепям

**После ремонта:**

Начальные длины по эфиру определить нельзя

Определить начальные длины по контрольным цепям  $\tilde{\varphi}_i^{cntr}$

Вычислить начальные длины по эфиру  $\tilde{\varphi}_i^{far} = \tilde{\varphi}_i^{cntr} + \Delta_i$

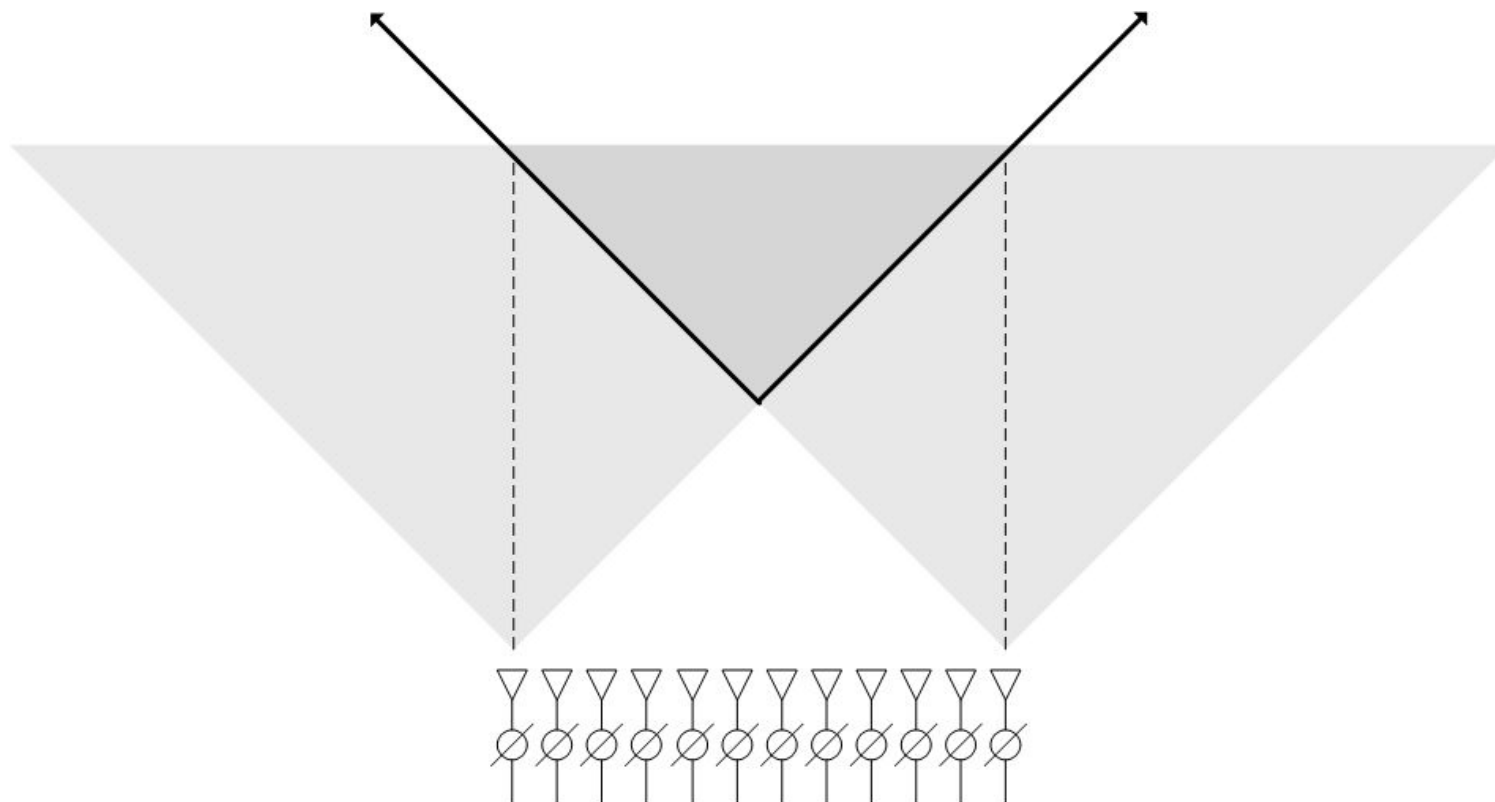
Предполагается, что начальные длины по эфиру и по контрольным цепям меняются синхронно:

$$\Delta_i = \varphi_i^{far} - \varphi_i^{cntr} = \tilde{\varphi}_i^{far} - \tilde{\varphi}_i^{cntr}$$

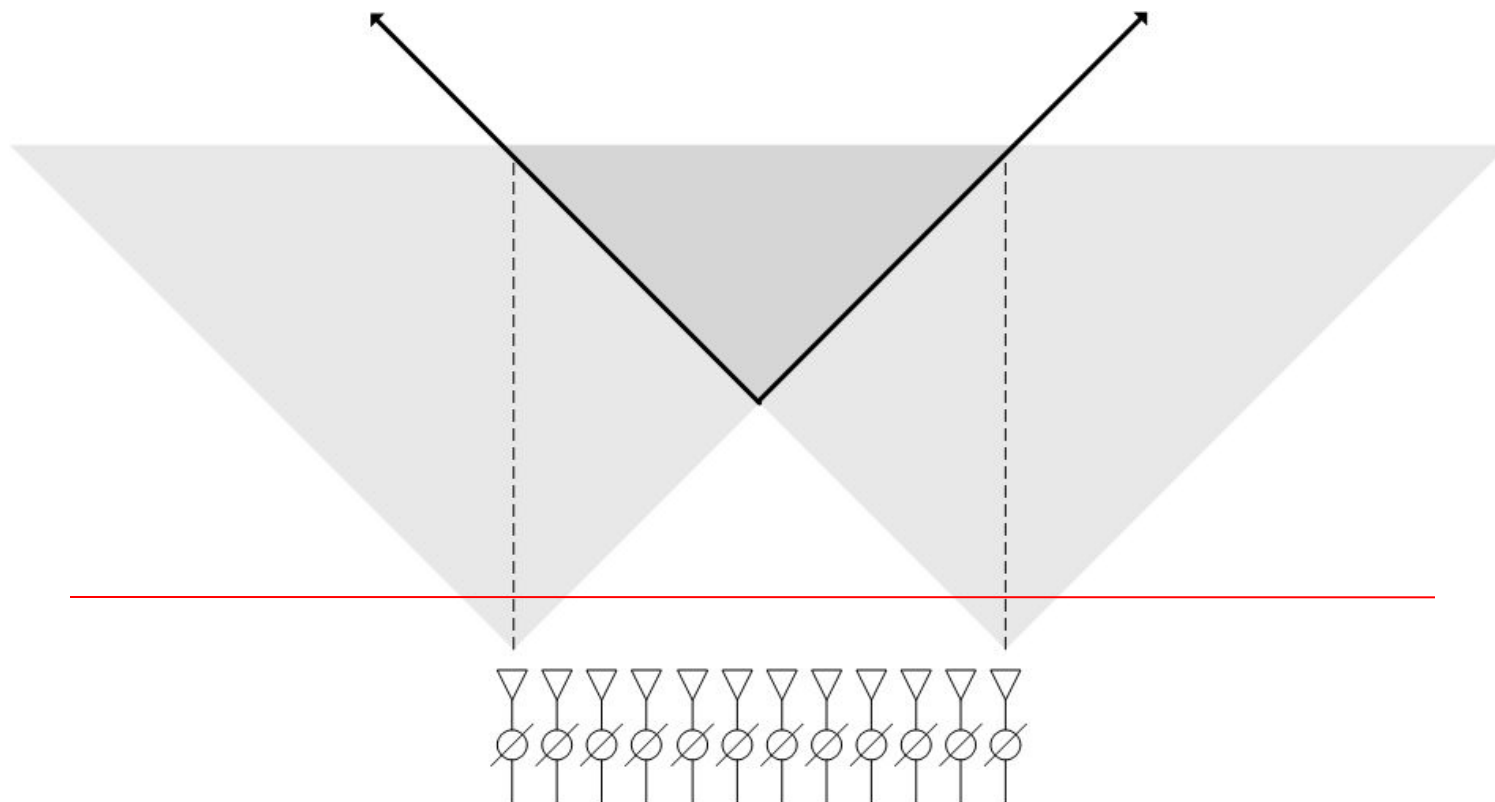
# К вопросу выбора взаимного положения ФАР и зонда

- Определение зоны допустимого положения зонда
- Определение требуемой точности задания положения
- Учет влияния переотражений

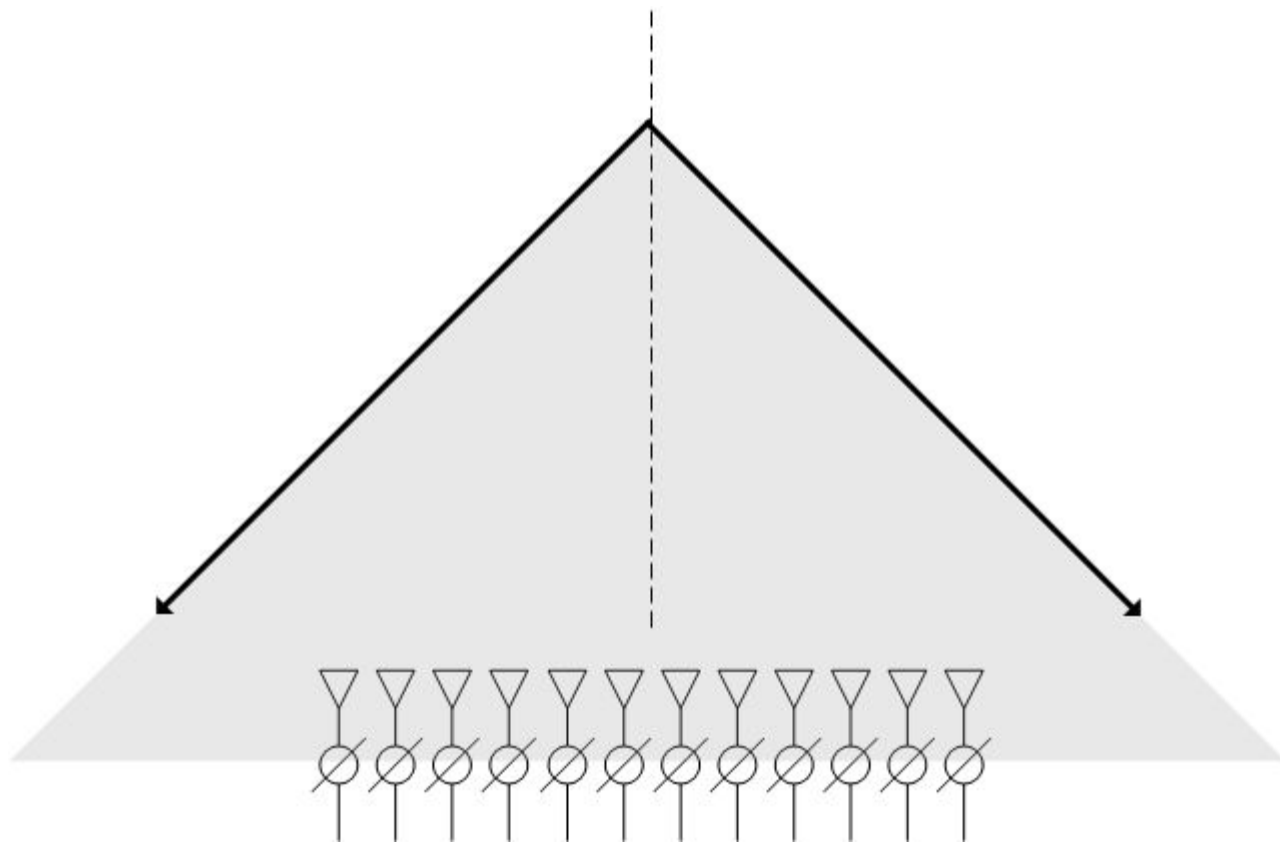
# Положение зонда через ДН элемента



# Положение зонда через ДН элемента



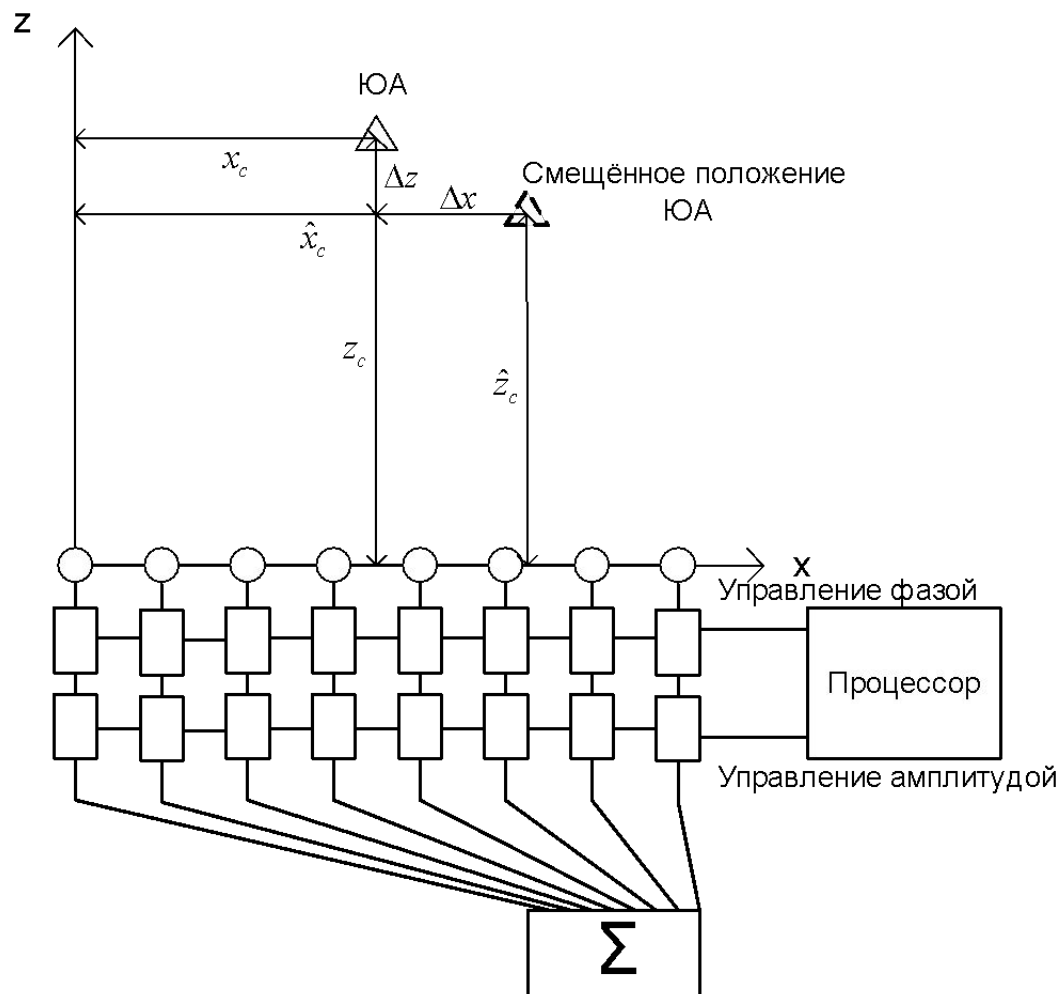
# Положение зонда через ДН зонда



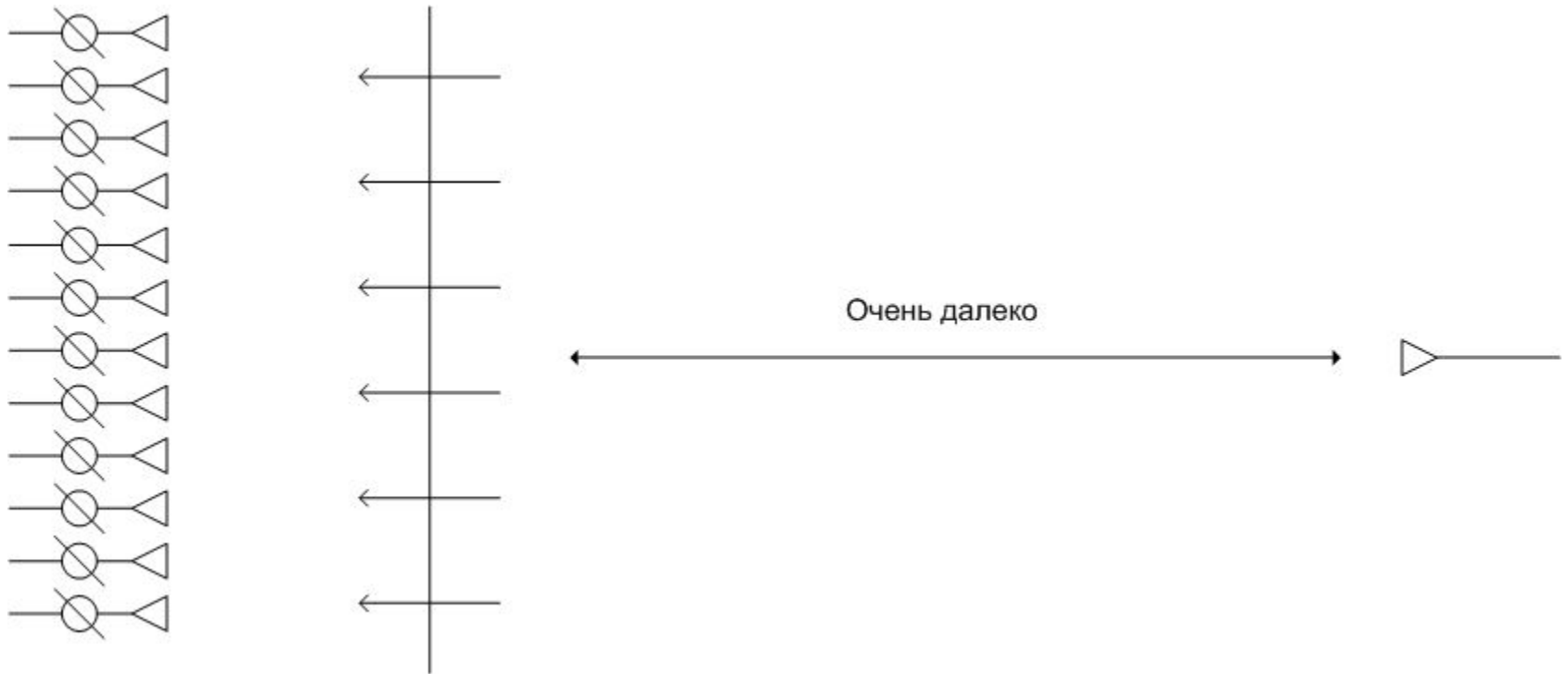
# К вопросу выбора взаимного положения ФАР и зонда

- Определение зоны допустимого положения зонда
- **Определение требуемой точности задания положения**
- Учет влияния переотражений

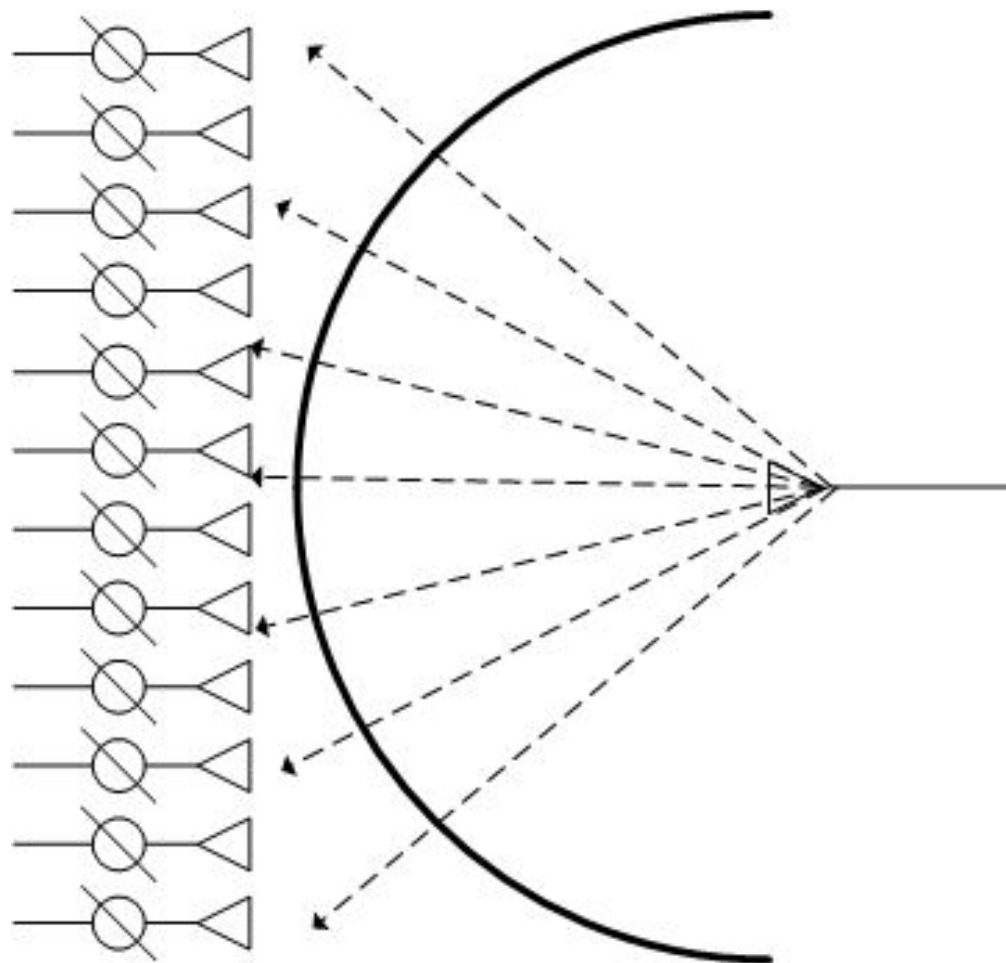
# Ошибка в определении положения зонда



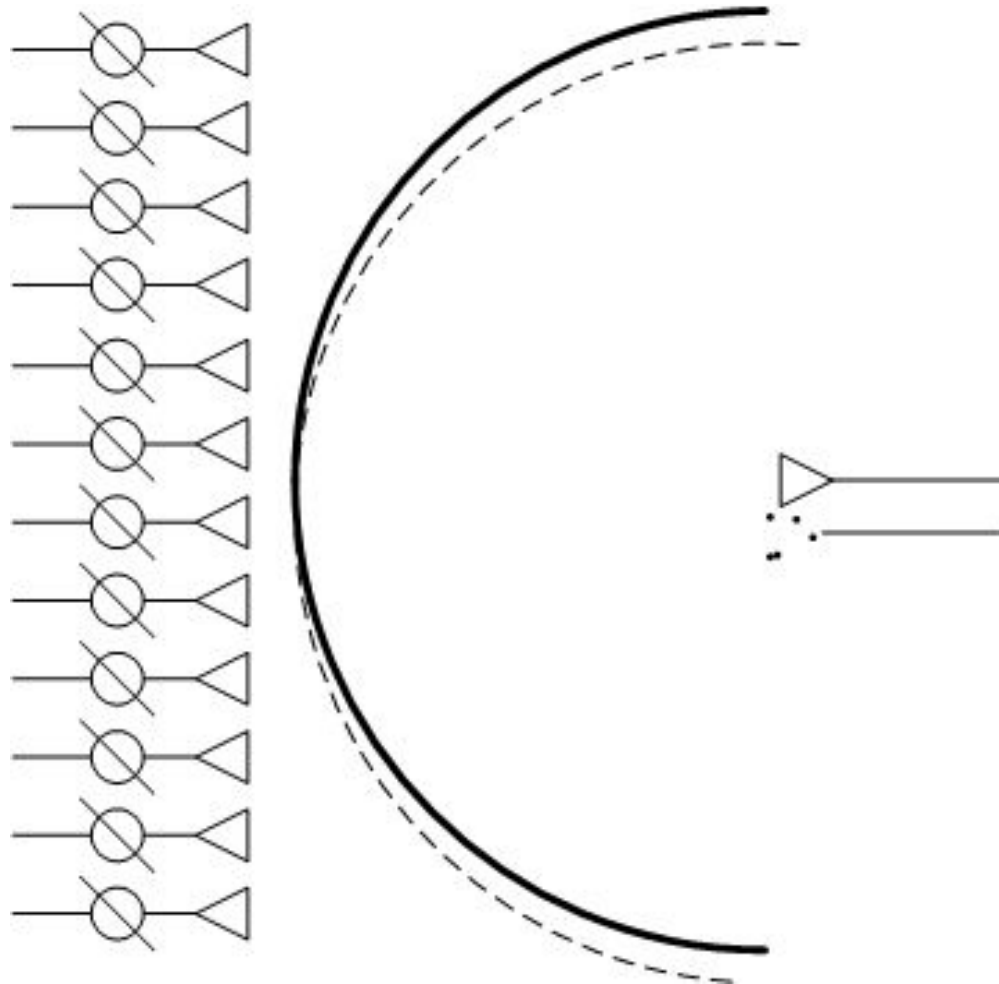
# Дальнее расположение зонда



# Ближнее расположение зонда



# Ближнее расположение зонда



# Искажение фазового распределения

1) Линейный член (поперек оси антенны) :

: отклонение  $\arcsin\left(\frac{\Delta x}{z_c}\right)$

2) Квадратичный член (вдоль оси антенны) :

: искажение  $\Delta\varphi(x_i) = \pi \frac{\Delta z}{\lambda} \frac{x_i^2}{z_c^2}$

3) Кубический член (поперек оси антенны) :

искажение  $\Delta\varphi(x_i) = \pi \frac{\Delta x}{\lambda} \frac{x_i^3}{z_c^3}$

# Смещение зонда вбок:

- Возникает линейная фазовая ошибка
- Это приводит к уходу положения луча
- Незначительная максимальная ошибка связана со значительным уходом луча
- Уход луча можно определить по тангенсу отношения
- Уход не зависит от длины волны!!!

# Искажение фазового распределения

1) Линейный член (поперек оси антенны) :

: отклонение  $\arcsin\left(\frac{\Delta x}{z_c}\right)$

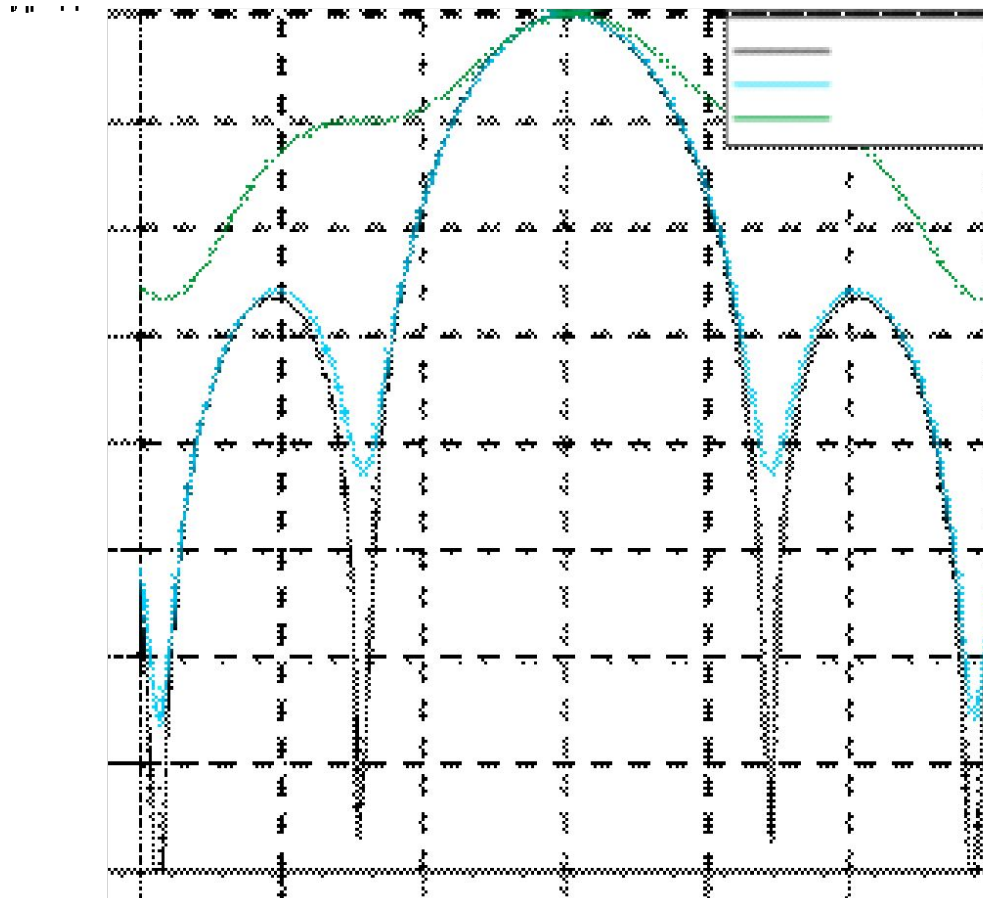
2) Квадратичный член (вдоль оси антенны) :

: искажение  $\Delta\varphi(x_i) = \pi \frac{\Delta z}{\lambda} \frac{x_i^2}{z_c^2}$

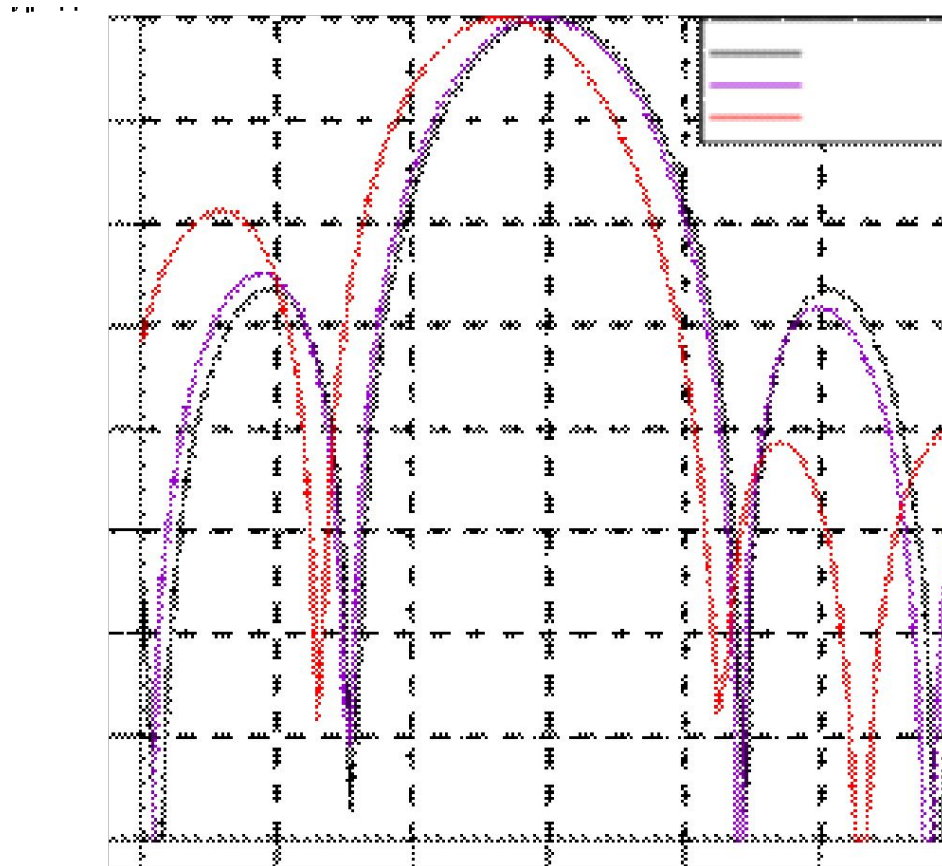
3) Кубический член (поперек оси антенны) :

искажение  $\Delta\varphi(x_i) = \pi \frac{\Delta x}{\lambda} \frac{x_i^3}{z_c^3}$

# Искажение формы луча – уход вдоль



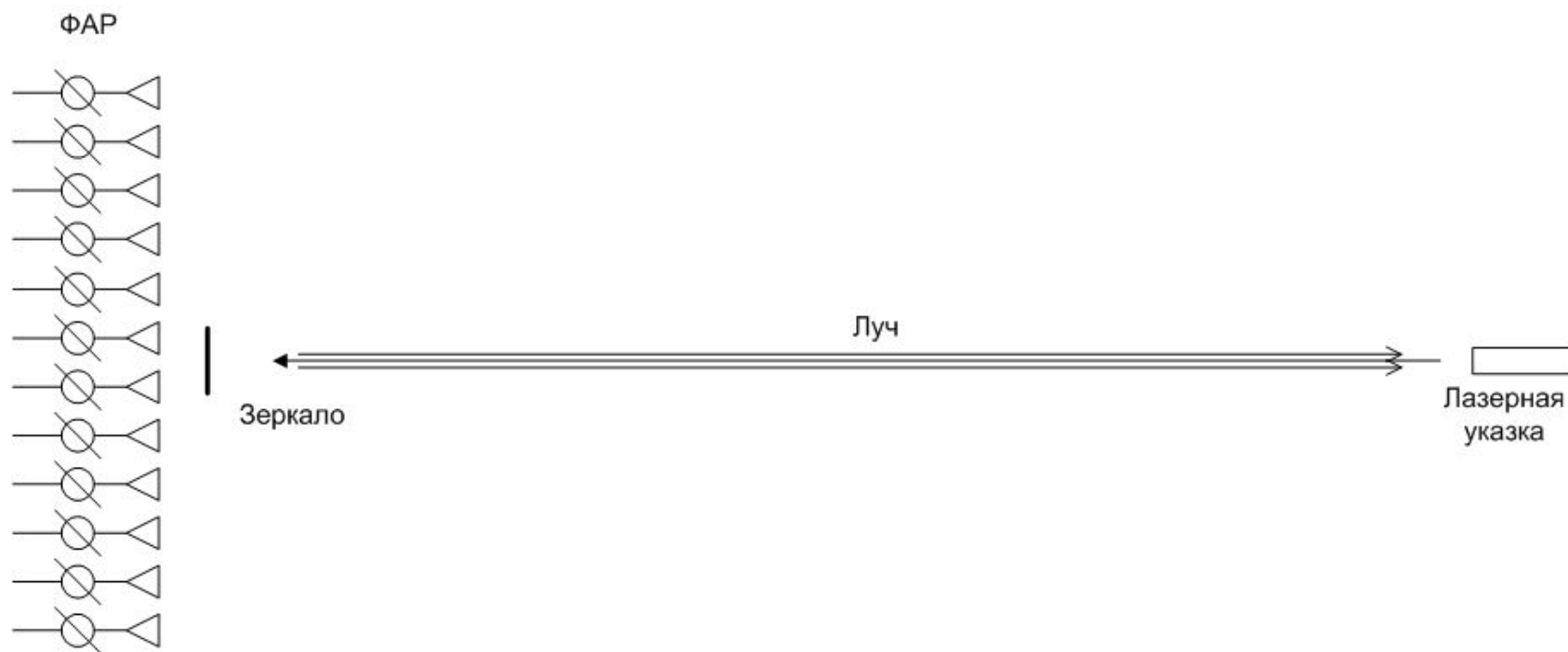
# Искажение формы луча – уход поперек



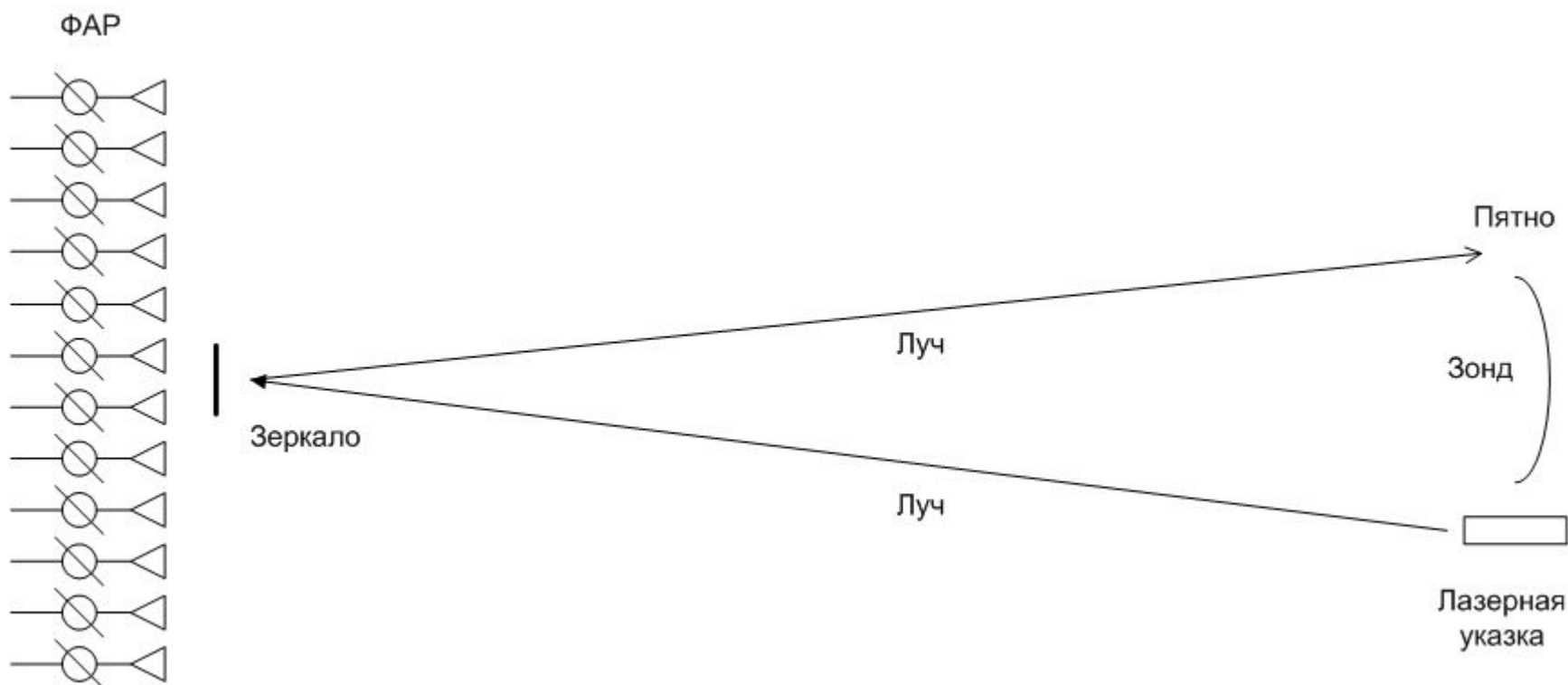
# Выводы

- Зонд желательно располагать над центром апертуры (напротив центра)
- Зонд желательно располагать как можно дальше
- Первое, что нужно принимать во внимание – ошибку установки луча
- Если ошибка установки луча не важна – требования к точности могут быть существенно ослаблены

# Привязка направления лазерной указкой



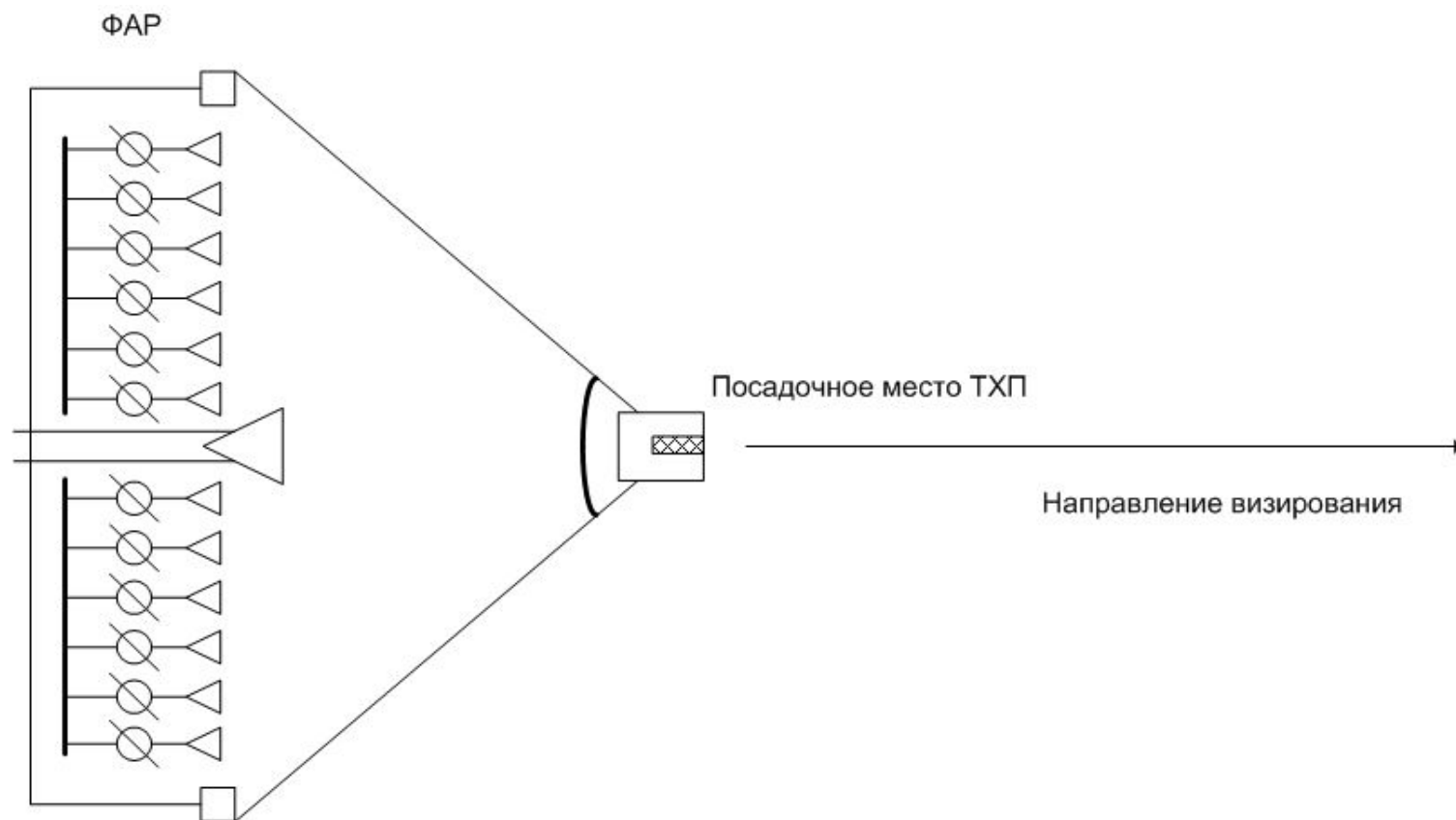
# Привязка направления лазерной указкой



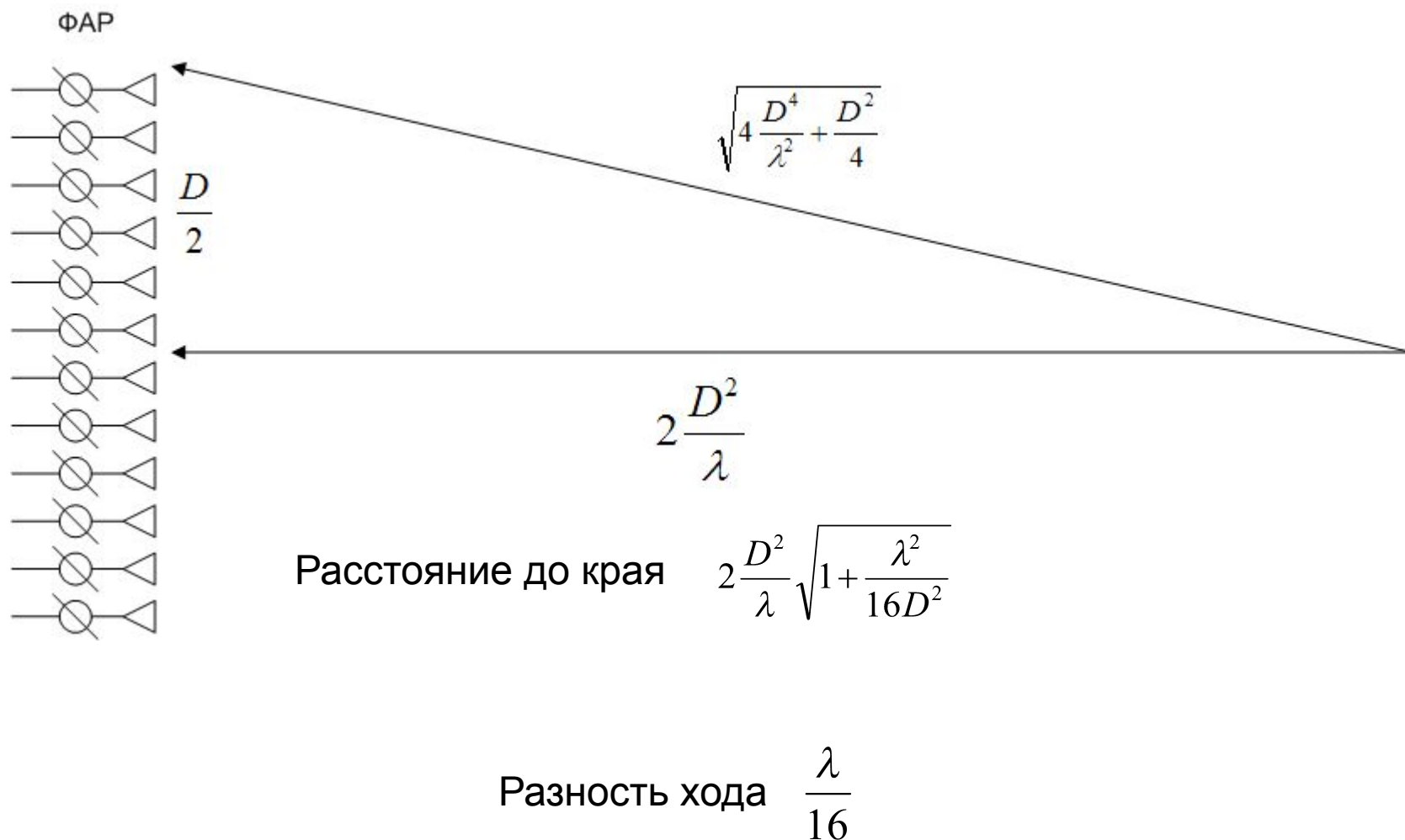
# Трубка холодной пристрелки



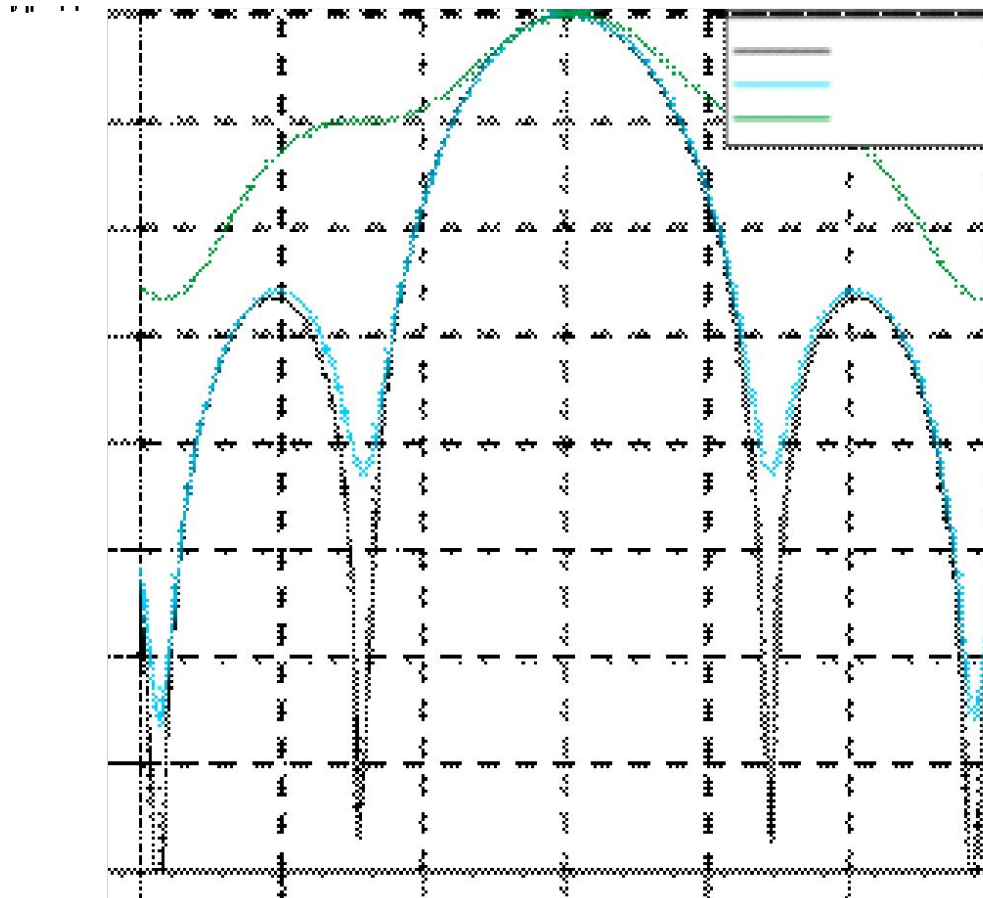
# Привязка направления трубкой холодной пристрелки



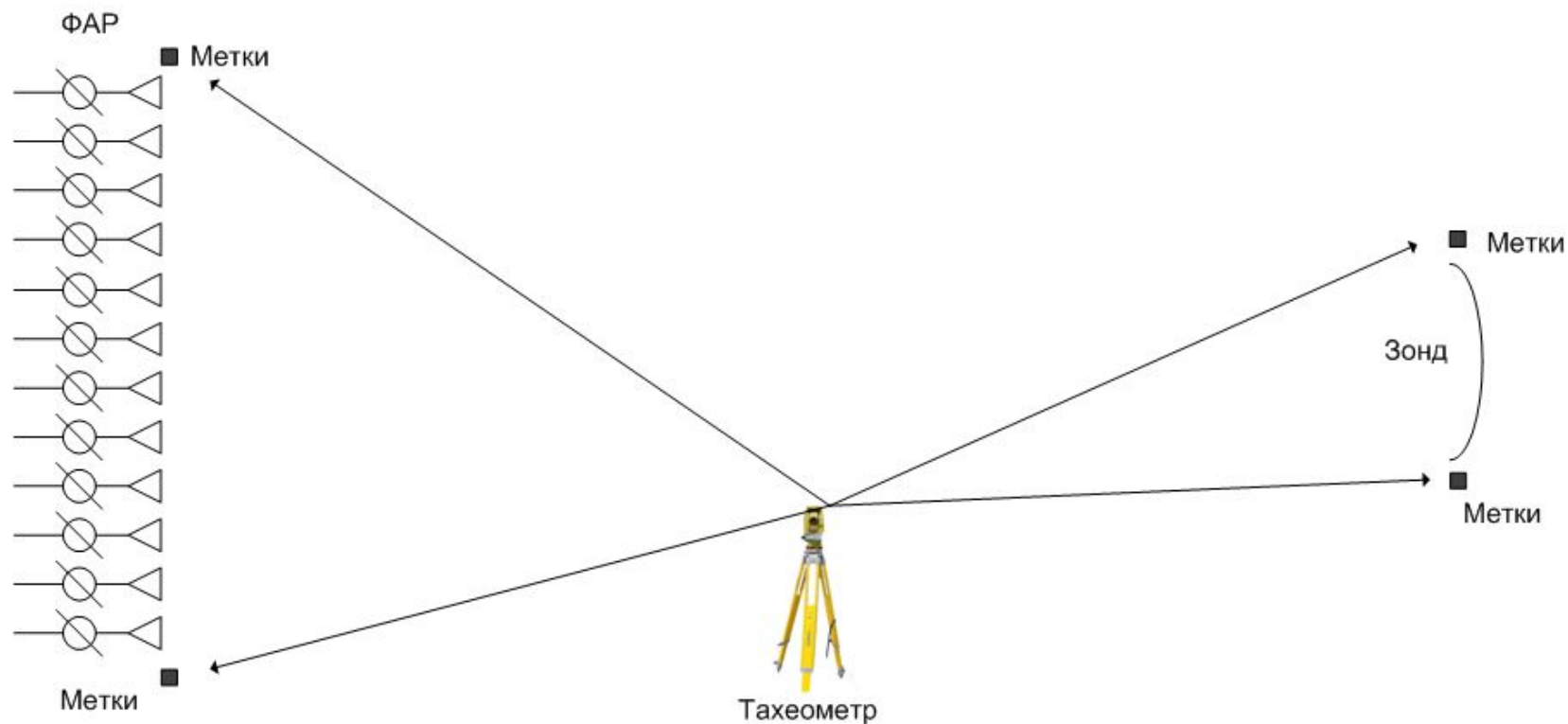
# К вопросу об условии дальней зоны



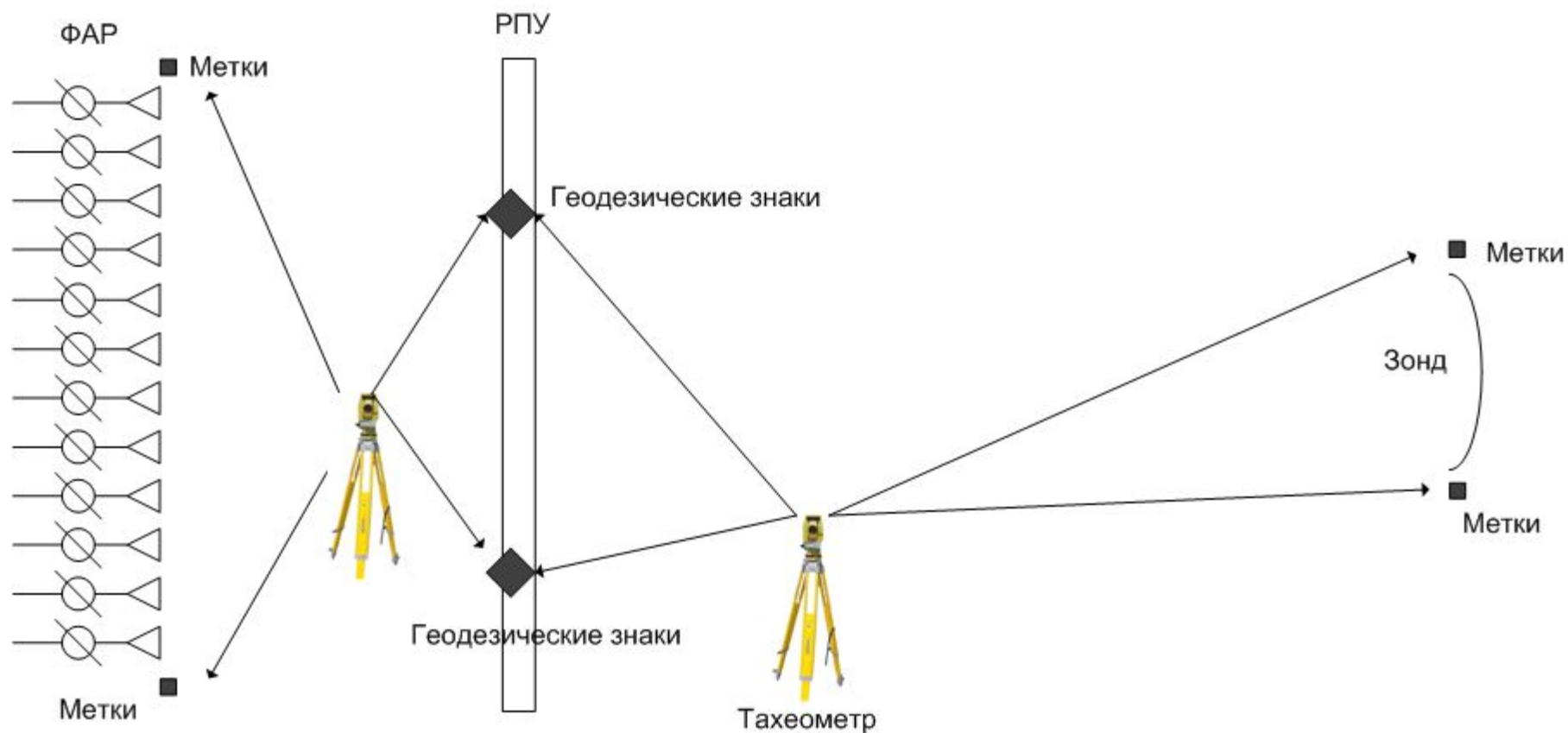
# Искажение формы луча



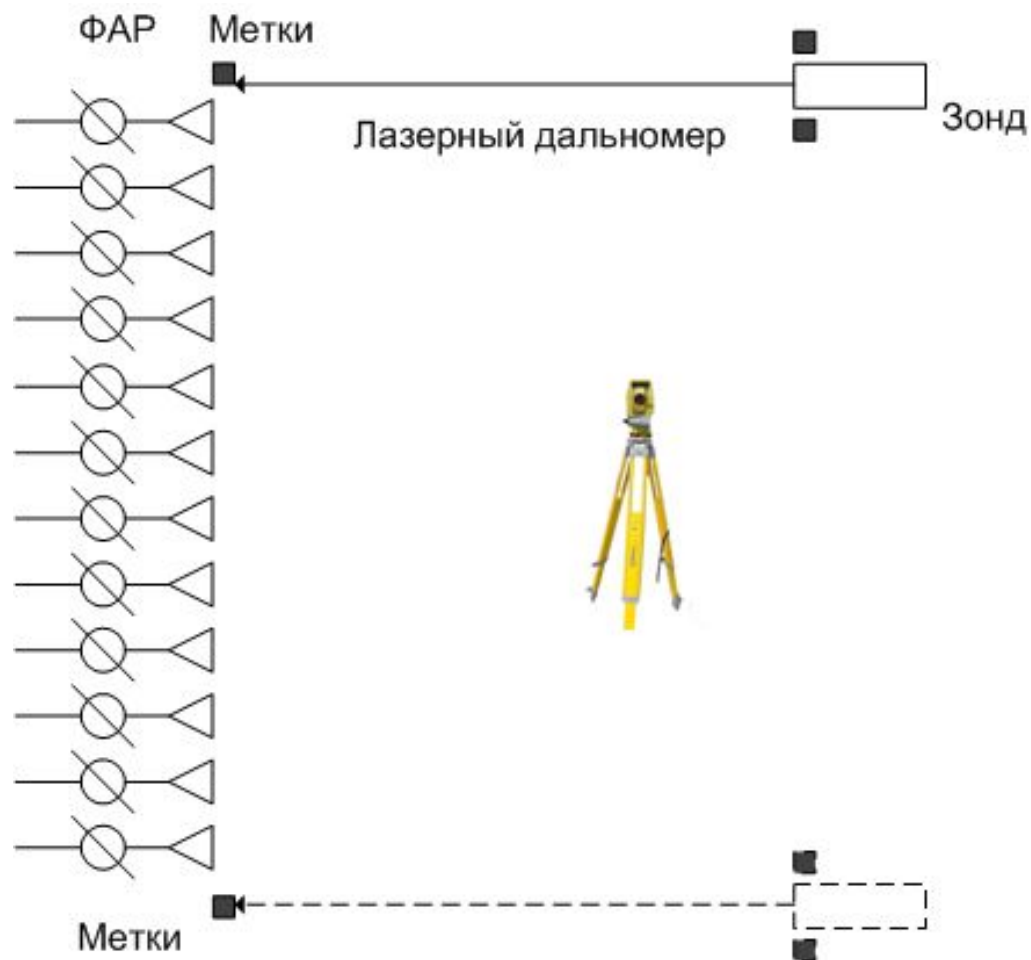
# Привязка зонда с помощью тахеометра



# Привязка зонда с помощью тахеометра



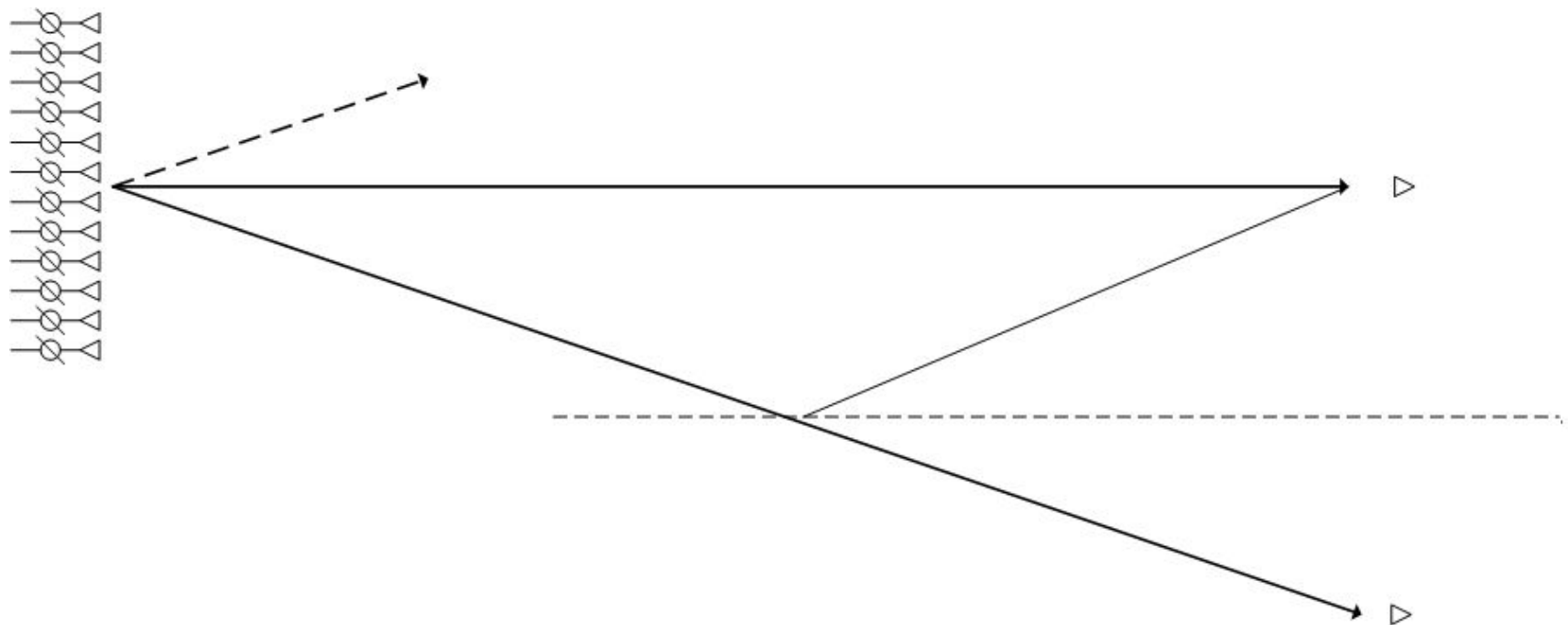
# Привязка плоскости апертуры и сканера



# К вопросу выбора взаимного положения ФАР и зонда

- Определение зоны допустимого положения зонда
- Определение требуемой точности задания положения
- **Учет влияния переотражений**

# Учет влияния переотражений



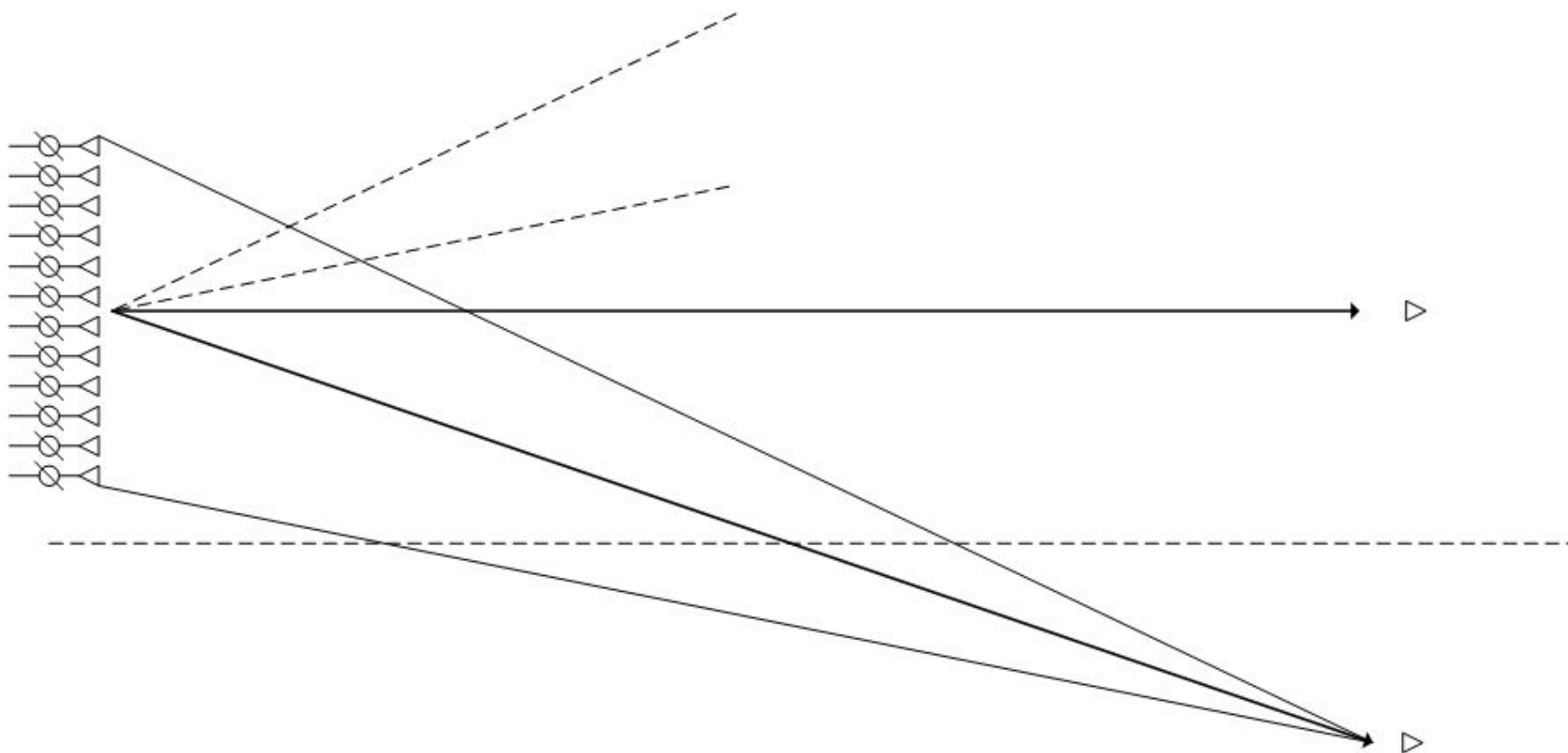
# При амплитудно-фазовом управлении

- Диаграмма направленности ФАР становится равной сумме двух диаграмм – основной и «ДН помехи»
- ДН помехи направлено симметрично направлению на переотражение
- Амплитуда ДН помехи равна амплитуде отраженного сигнала

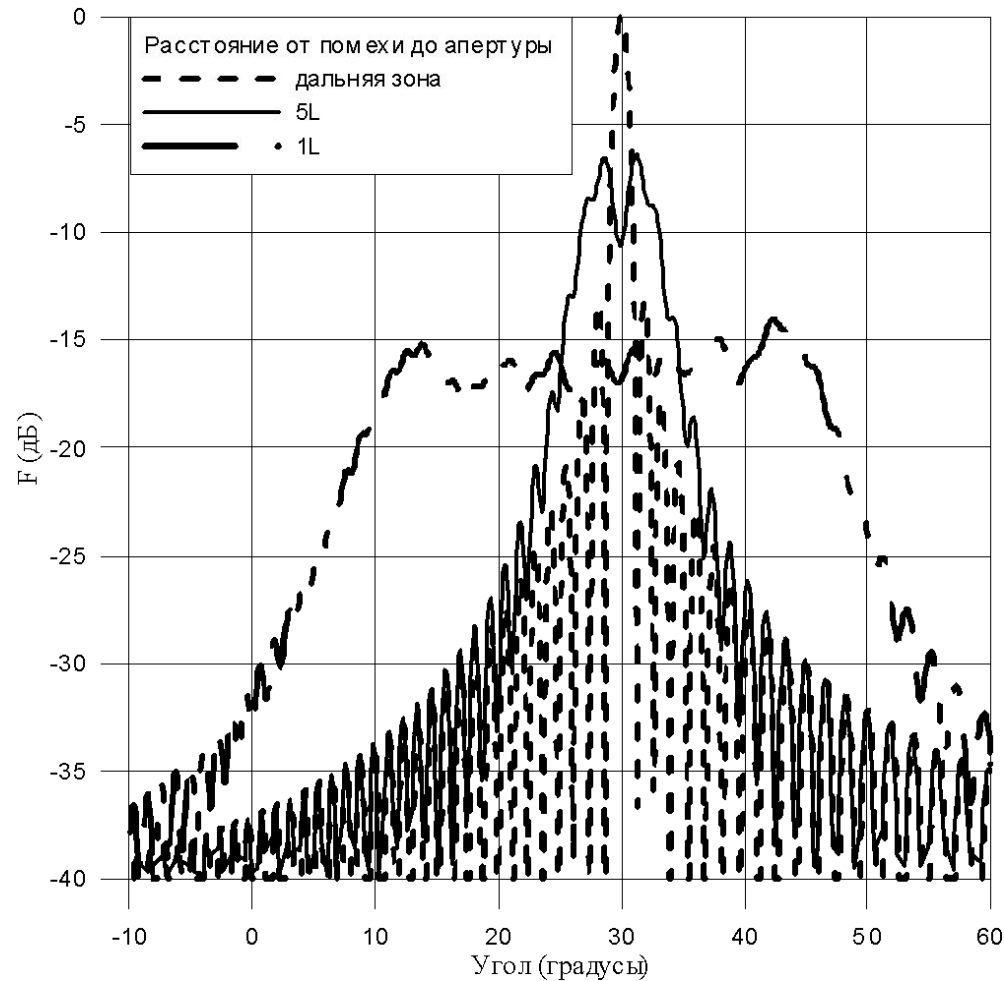
# При чисто фазовом управлении

- Для чисто фазового управления «ДН помехи» две
- Они расположены симметрично относительно направления на источник
- Их мощность вдвое меньше
- Они противоположны по фазе

# Переотражения при близком расположении зонда



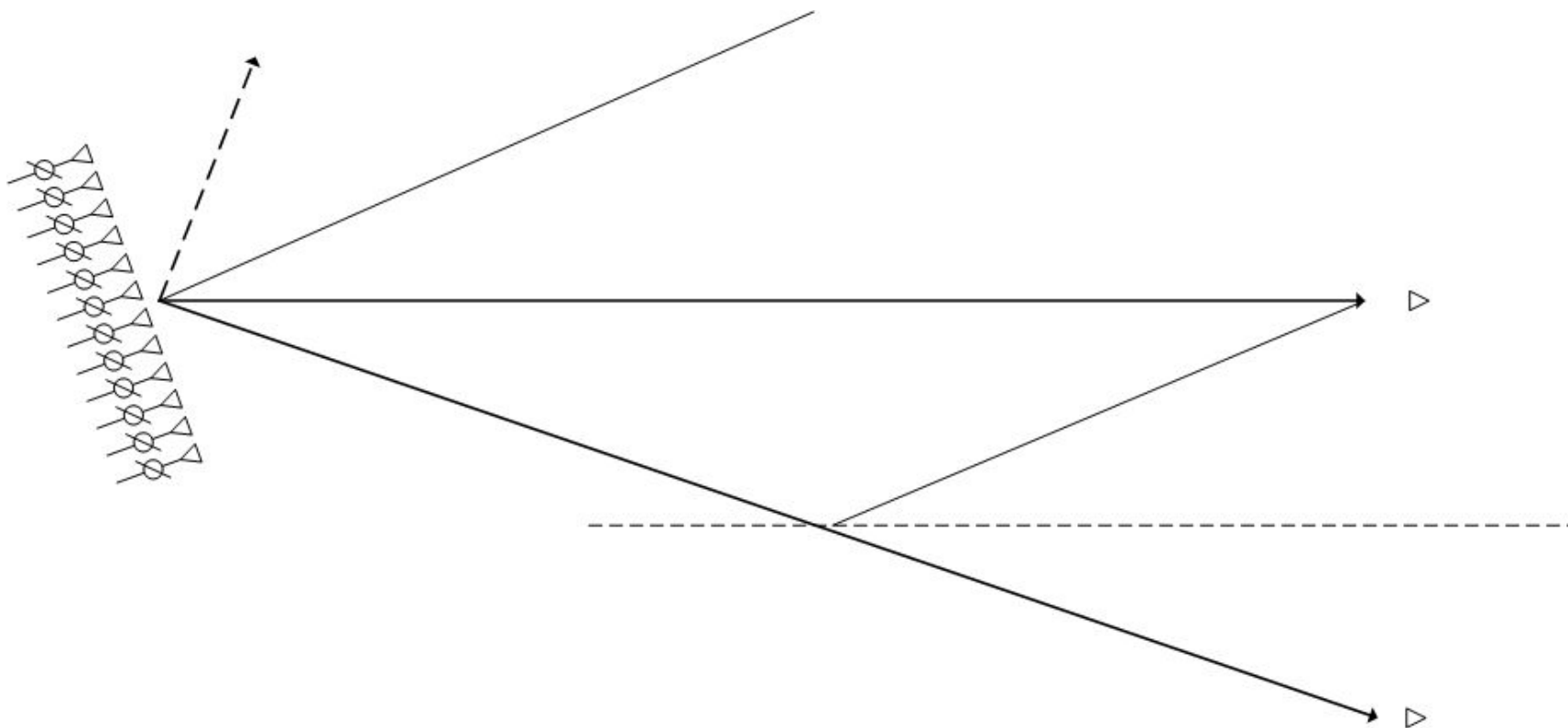
# Форма помеховой диаграммы



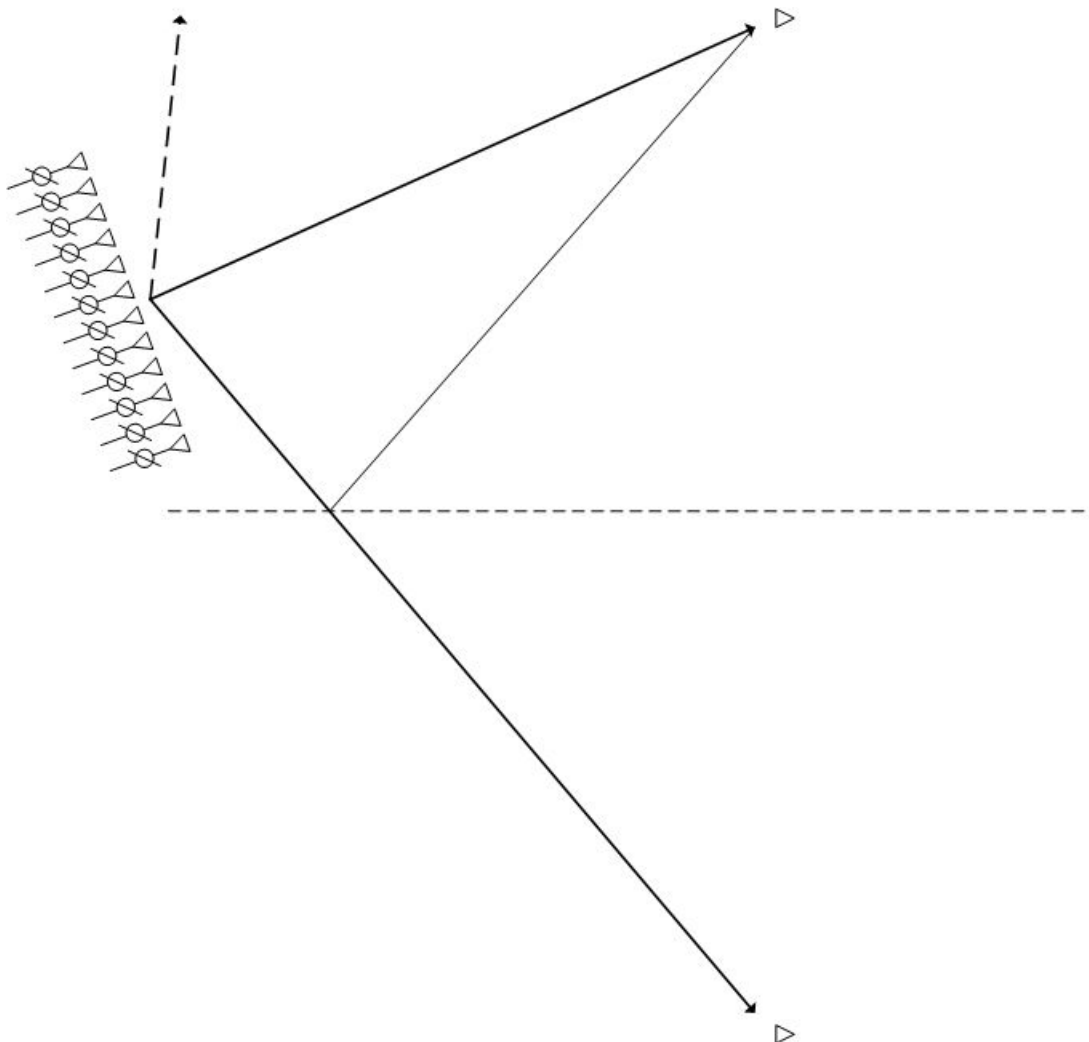
# Методы борьбы с переотражениями

- Установка поглощающих экранов
- Подбор ДН зонда
- Разворот ФАР нулем элемента на помеху
- Увеличение высоты зонда
- Калибровка в нескольких положениях и усреднение

# Методы борьбы с переотражениями



# Методы борьбы с переотражениями



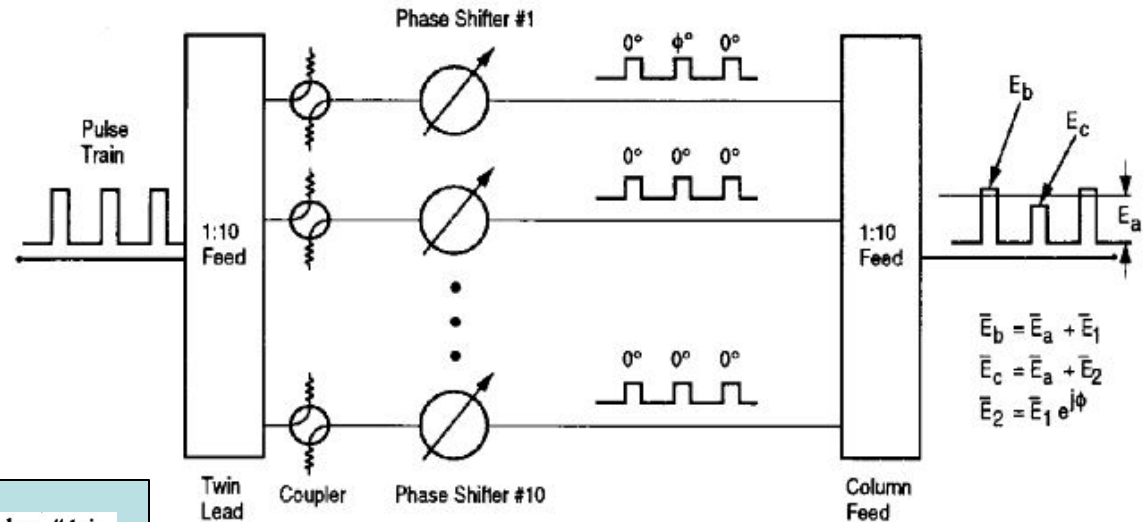
# Что нужно выбрать при разработке метода калибровки:

- Как часто будет проводиться калибровка
- Как доставить контрольный сигнал
- **Как измерять суммарный сигнал**
- **(амплитуда или еще и фаза)**
- **Как управлять фазовращателями каналов**
- **Как обрабатывать данные**
- Дополнительные особенности - для многоканальных антенн

# Простой поиск максимума сигнала

- Последовательно увеличивать фазу канала
  - Измерять мощность поля
  - Определить положение фазовращателя с максимальным уровнем мощности
  - Повторить для всех каналов
  - Повторить несколько раз
- 
- Очень просто
  - Не нужна фаза сигнала
  - Относительно долго
  - Точность – до шага фазовращателя
  - Для многоканальных ФАР не работает

# Single channel, 180-degrees phase toggle



- Phase measurement is used, but calculation is very simple :

the 1 : 10 column feed, the resultant vector for pulse #1 is represented by  $E_b = E_1 + E_a$ , where  $E_1$  is the vector of pulse #1 for element #1 and  $E_a$  is the sum of the other nine vectors of pulse #1 from the other nine elements. During pulse #2, the phase shifter of element #1 is biased to a different phase state. The phase states for the other nine elements remain the same. At the feed output, the resultant vector is represented by  $E_c = E_2 + E_a$ , with  $E_2$  the vector of pulse #2 for element #1 and  $E_a$  the sum of the other nine vectors. Note that  $E_2 = E_1 e^{j\phi}$ ; therefore, if we take the difference of  $E_b$  and  $E_c$ , the net signal is given by

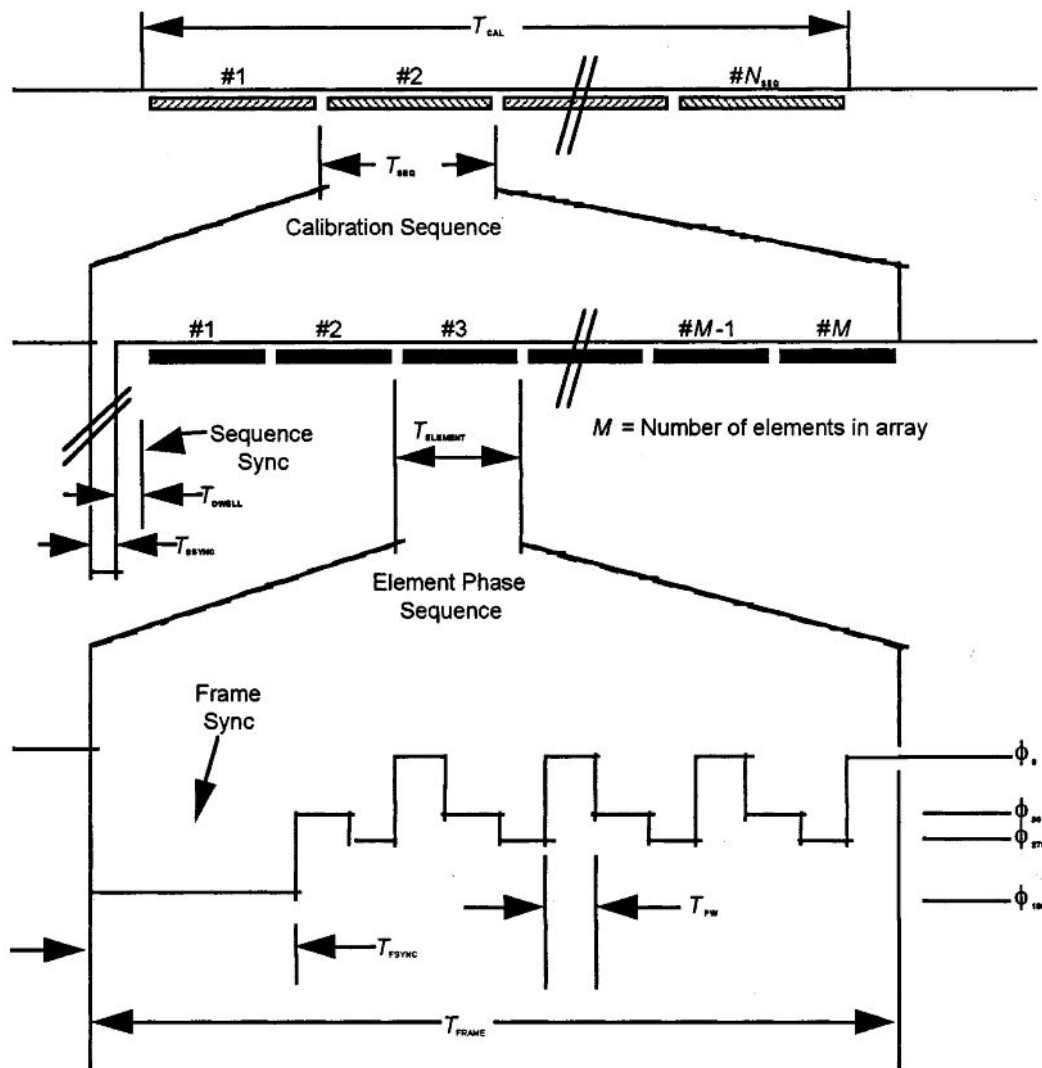
$$E_d = E_b - E_c = E_1 - E_2 = E_1(1 - e^{j\phi}). \quad (1)$$

$E_a$  has been canceled out. If the phase shifter is toggled from 0 to 180° between pulses,  $\phi = 180^\circ$ , then  $E_d = 2E_1$ , which can be used to determine the  $E_1$  signal going through element #1. The method can be applied to other

A Built-In Performance-Monitoring/Fault Isolation and Correction (PM/FIC) System for Active Phased-Array Antennas  
Kuan-Min Lee, Ruey-Shi Chu, Sien-Chanliu

IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION,  
VOL. 41, NO. 11, NOVEMBER 1993

# Single channel, 180-degrees phase toggle



- Good:
  - ✓ No need to measure phase
- Bad:
  - ✓ Comparatively complex procession formulae (see article)

# Phased Array Calibration

## Ron Sorace

IEEE TRANSACTIONS ON ANTENNAS AND PROPAGATION,  
VOL. 49, NO. 4, APRIL 2001

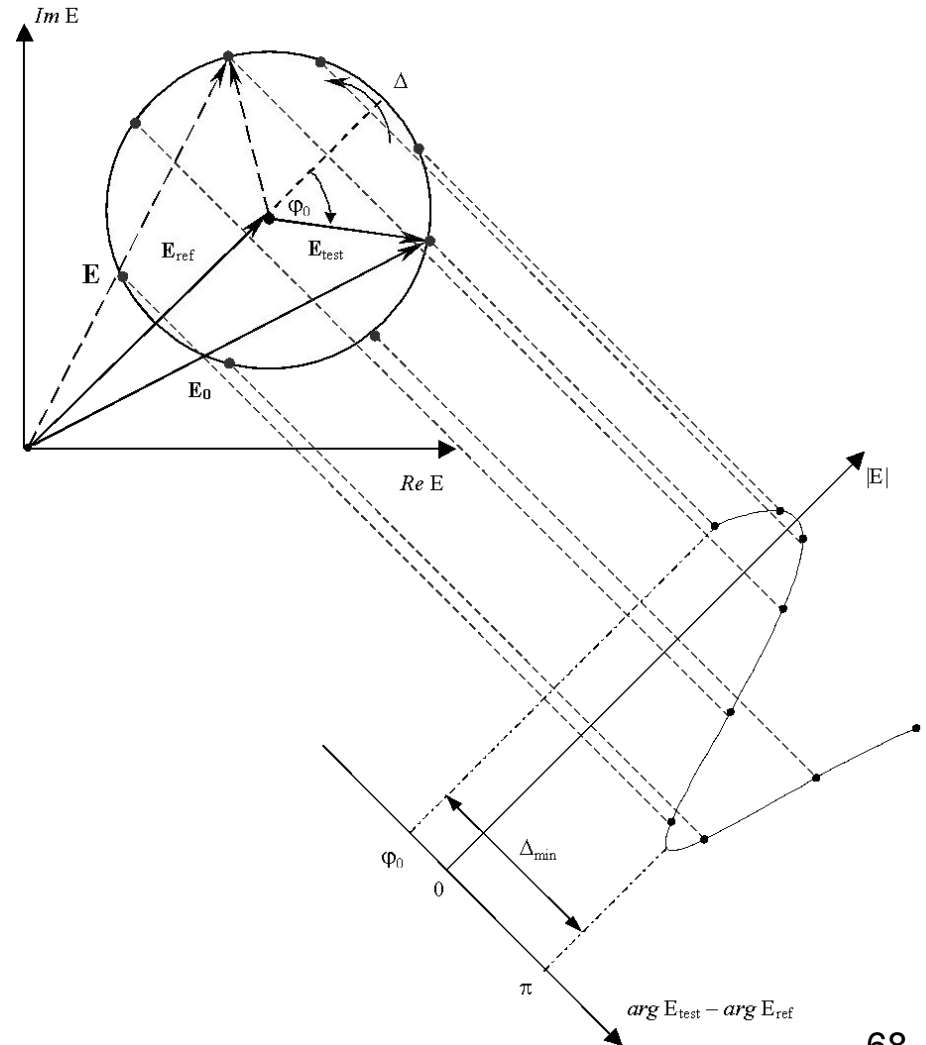
# Метод кодирования контрольной последовательностью

- Манипуляция фазой производится в соответствии со значениями столбцов матрицы Адамара или другого набора ортогональных кодов
- Изменение фазы всех каналов происходит синхронно и одновременно
- Производится измерение нескольких, по числу элементов в столбце, значений суммарного сигнала
- Для выделения сигнала канала, данные домножаются на значения манипулирующей функции и суммируются.

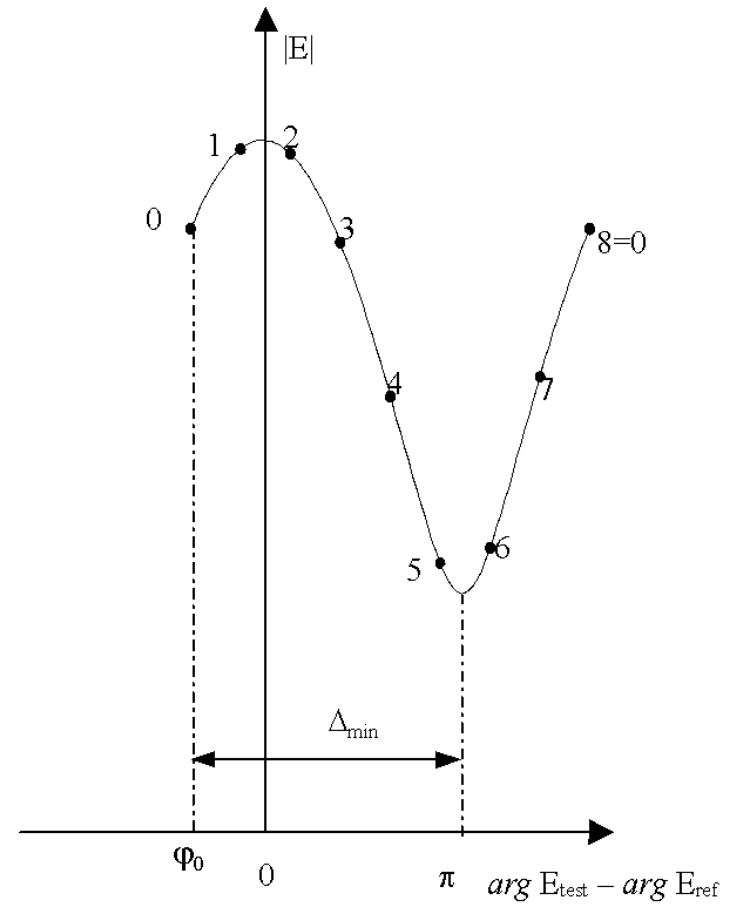
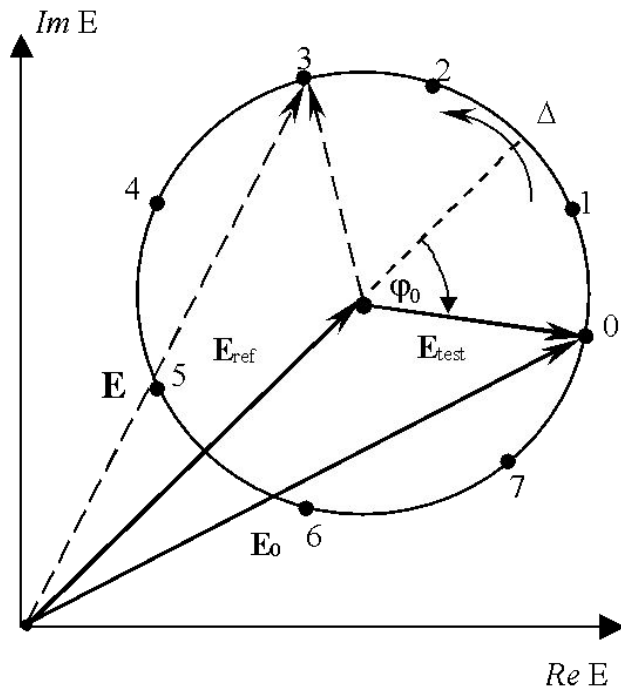
# 3. MTE Method (Method of Two Elements)

# Сущность МТЕ

- Все каналы кроме двух (опорного и тестируемого) отключаются.
- Фазовое состояние фазовращателя (а значит, и фаза в канале) тестируемого фазовращателя последовательно приращается, производятся измерения мощности суммарного сигнала
- Вычисляется начальная фаза и амплитуда тестируемого канала, по отношению к опорному
- Тестируемый канал отключается, подключается следующий канал. Опорный канал тот же.
- Вычисляется относительная амплитуда и фаза второго канала
- ИТД.



# Изменение суммарного сигнала



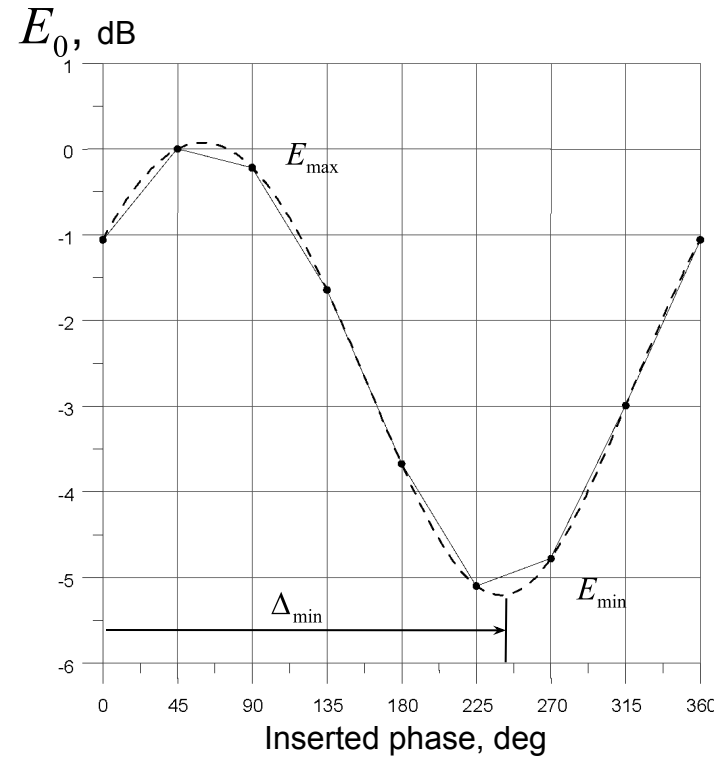
# MTE – простые формулы

$$\varphi_0 = \pi - \Delta_{\min}$$

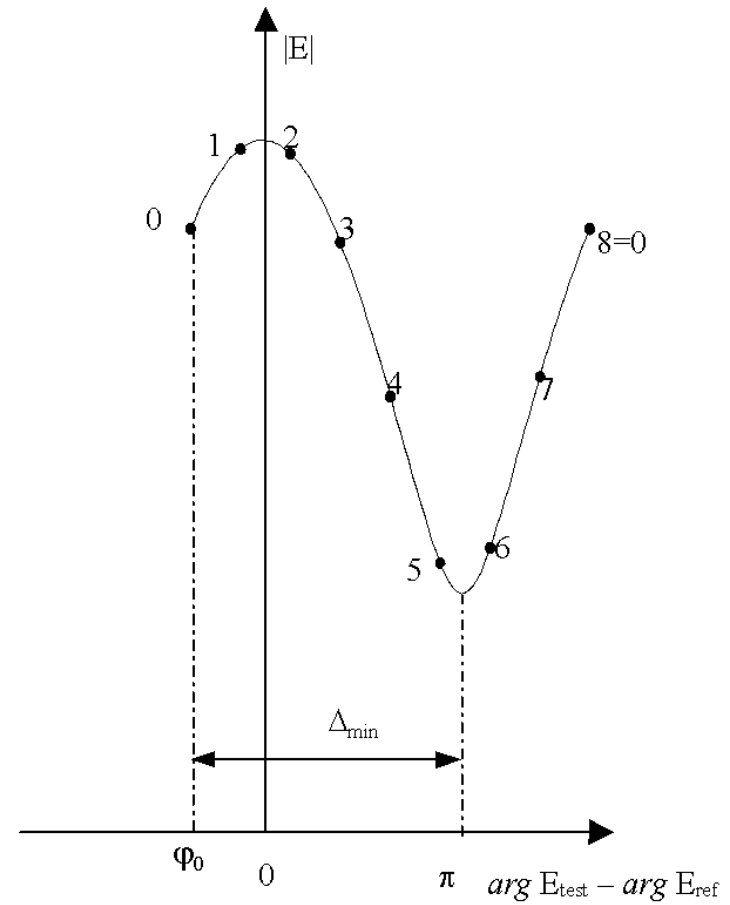
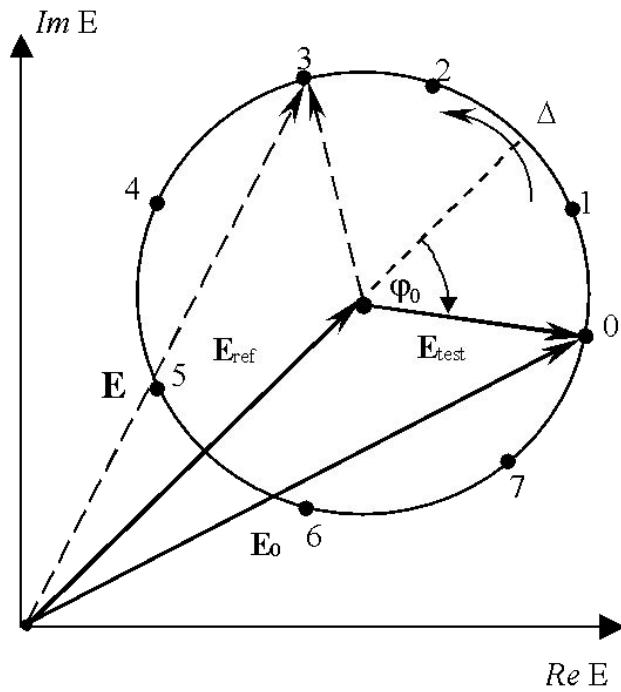
$$E_{\text{test}} = \frac{1}{2}(E_{\max} - E_{\min})$$

$$E_{\text{ref}} = \frac{1}{2}(E_{\max} + E_{\min})$$

for  $|E_{\text{test}}| < |E_{\text{ref}}|$



# Изменение суммарного сигнала



# МТЕ – точная формула

$$P_m = E_{test}^2 + E_{ref}^2 + 2E_{test}E_{ref} \cos(\varphi_0 - \Delta_\varphi m) \quad \text{Теорема косинусов}$$

если

$$\begin{aligned} A &= E_{test}^2 + E_{ref}^2 \\ B &= 2E_{test}E_{ref} \cos(\varphi_0) \\ C &= 2E_{test}E_{ref} \sin(\varphi_0) \end{aligned}$$

тогда  $P_m = A + B \cos(\Delta_\varphi m) + C \sin(\Delta_\varphi m)$

Для оценки можем использовать дискретное преобразование Фурье

$$A \cong \sum_{m=0}^{M-1} P_m \quad B \cong 2 \sum_{m=0}^{M-1} P_m \cos(\Delta_\varphi m) \quad C \cong 2 \sum_{m=0}^{M-1} P_m \sin(\Delta_\varphi m)$$

окончательно

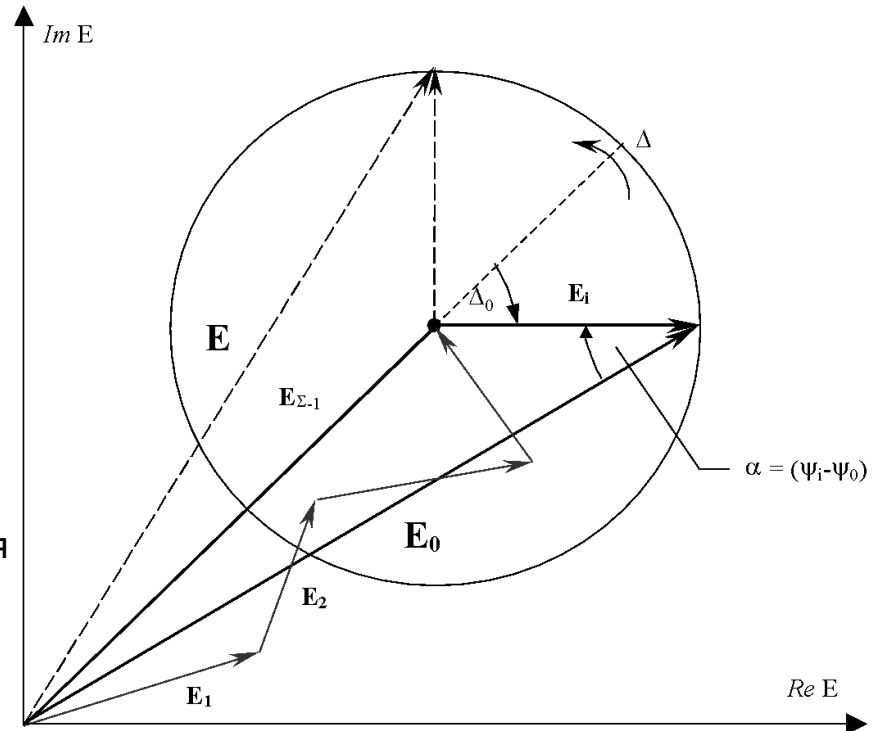
$$\varphi_0 = \arg(B, C) \quad \frac{A}{\sqrt{B^2 + C^2}} = \frac{E_{test}^2 + E_{ref}^2}{E_{test}E_{ref}} = \frac{E_{test}}{E_{ref}} + \frac{E_{ref}}{E_{test}}$$

# 4. REV Method

(Rotating Electrical Vector)

# Сущность REV

- Все каналы включены
- Для всех каналов, начинаем калибровку с одного и того же набора состояний фазовращателей
- Состояние тестового канала инкрементируется, как в МТЕ, остальных – не меняется
- В этом случае опорный сигнал – это «суммарный без одного»
- Опорный сигнал меняется от канала к каналу, нужны дополнительные вычисления
- Комплексная сумма «опорный + тестируемый» от канала к каналу не меняется, так что вычисление возможно

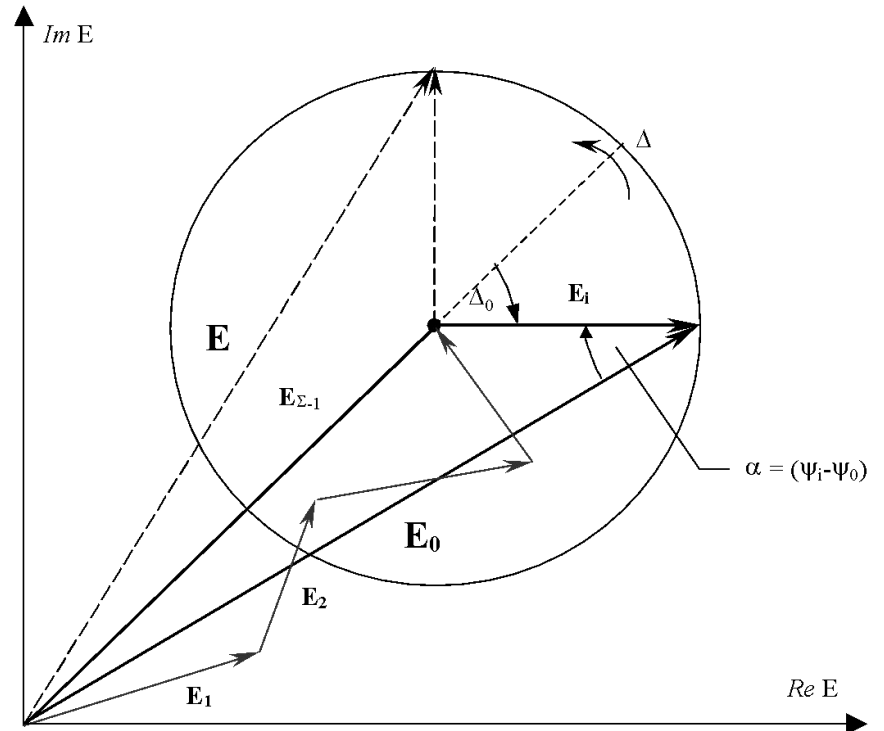


# Формулы REV

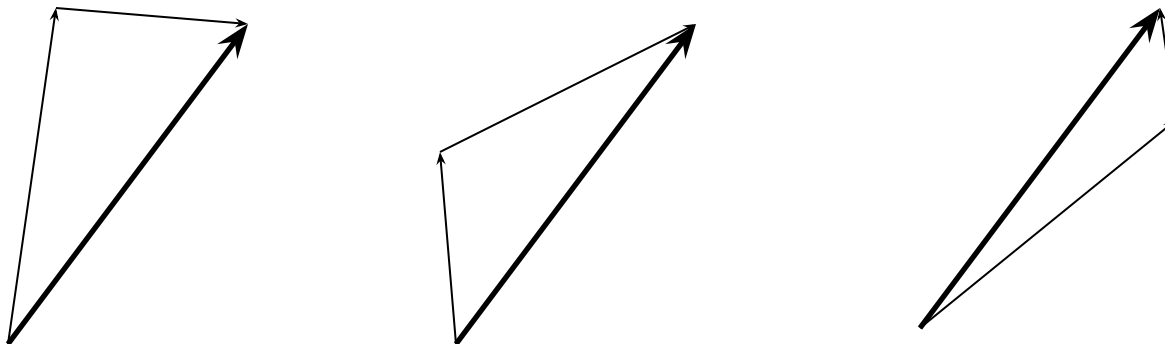
$$r = \frac{E_{max}}{E_{min}} \quad \Gamma = \frac{r-1}{r+1}$$

$$K = \frac{E_i}{E_0} = \frac{\Gamma}{\sqrt{1 + 2\Gamma \cos \Delta_0 + \Gamma^2}}$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{-\sin \Delta_0}{\cos \Delta_0 + \Gamma}\right)$$



# От MTE к REV (альтернатива)

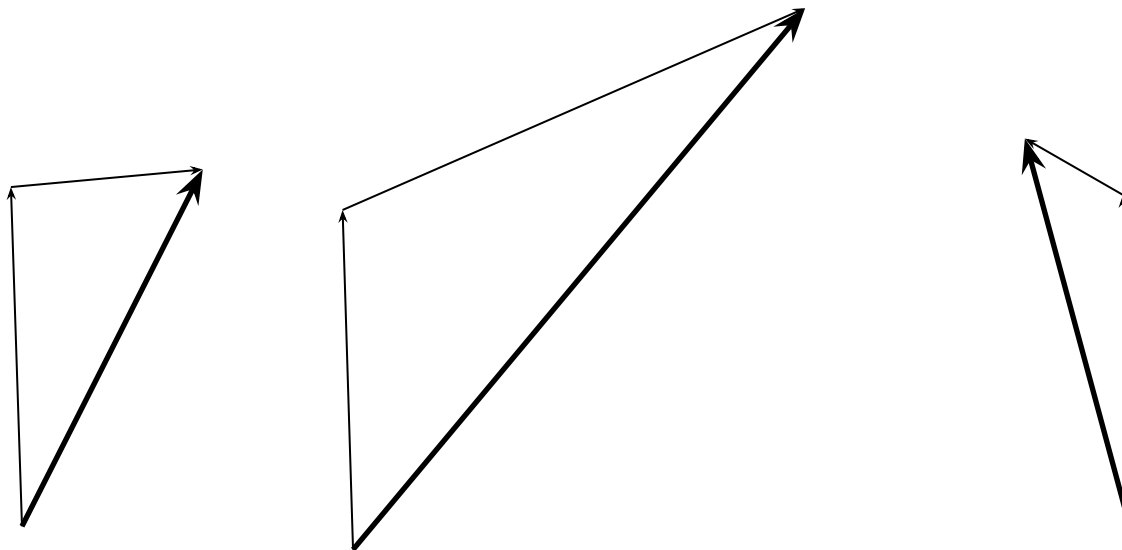


Для всех комбинаций опорного (тонкая линия) и тестируемого (пунктир) сигналов, их сумма (толстая линия) - константа

Ну так пусть возьмем опорный за единицу, методом MTE вычислим тестируемый (для каждого канала).

Затем вычислим комплексную сумму опорного и тестируемого

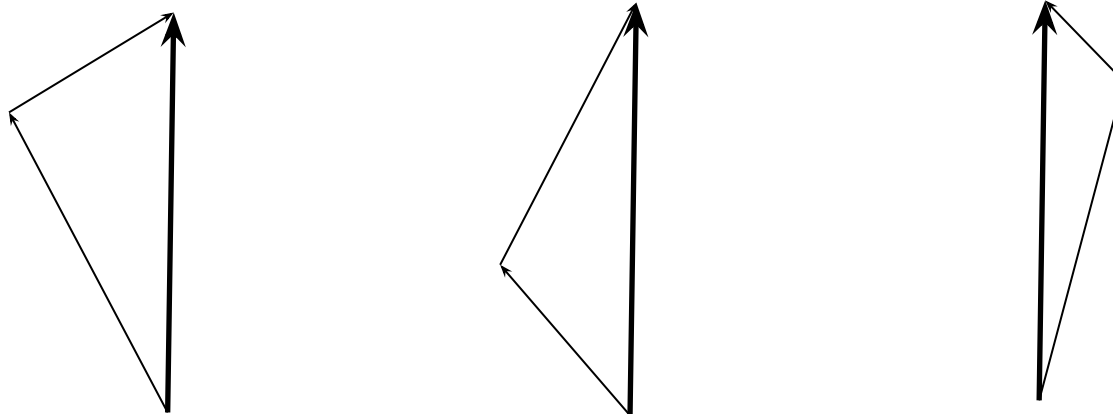
# От MTE к REV (альтернатива)



Нормируем суммарные вектора к константе (единице)  
Масштабированием и доворотом

# От МТЕ к REV (альтернатива)

... а с ними и пары опорный - тестируемый

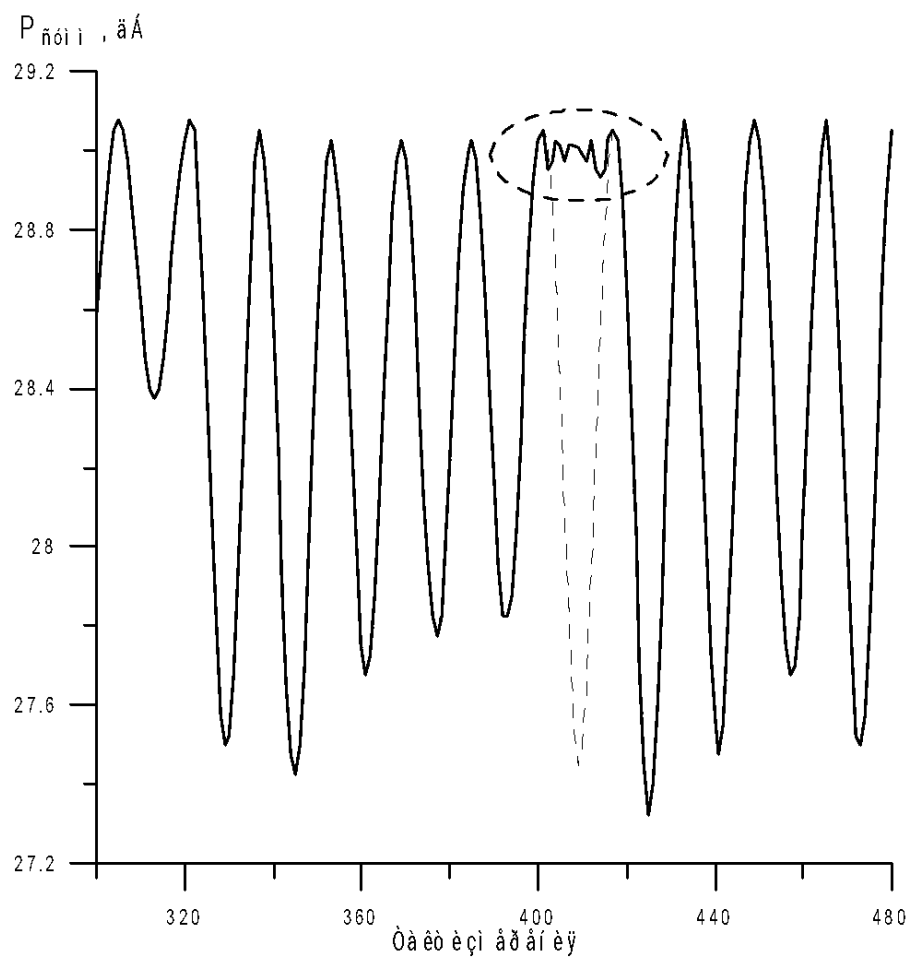


... теперь сигналы каналов можно сравнить друг с другом  
(не забыть учесть начальное состояние)

# Метод, может быть, и не оптимален, но удобен во многих отношениях

- Удобно управлять (простой алгоритм)
- Удобно измерять (только амплитуда)
- Можно отложить калибровку и вернуться позже
- Удобно искать отказавшие элементы

# Поиск отказавшего элемента



# Оптимальность по критерию наименьшего квадрата

Модель фазовращателя:

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta k$$

Поле канала :

$$E = A * \exp(\varphi_0 + \Delta k)$$

Мощность суммарного поля:  $P = [1 + A * \exp(\varphi_0 + \Delta k)]^2$

Метод МТЕ позволяет найти такие амплитуду и начальную фазу, что мощность суммарного поля модельной антенны наилучшим образом соответствует набору измеренных мощностей

**Начальная фаза по МТЕ - это не фаза в нулевом состоянии!!!**

# Начальная фаза - это не фаза в нулевом состоянии

|                |   |    |     |     |
|----------------|---|----|-----|-----|
| Фазовращатель  | 0 | 90 | 180 | 270 |
| Начальная фаза | 0 |    |     |     |

|                |        |                             |     |     |
|----------------|--------|-----------------------------|-----|-----|
| Фазовращатель  | 10     | 90                          | 180 | 260 |
| Начальная фаза | тоже 0 | (ну, почти, но точно не 10) |     |     |

# Что нужно выбрать при разработке метода калибровки:

- Как часто будет проводиться калибровка
- Как доставить контрольный сигнал
- Как измерять суммарный сигнал
- (амплитуда или еще и фаза)
- Как управлять фазовращателями каналов
- Как обрабатывать данные
- **Дополнительные особенности калибровки  
многоканальных антенн**

# Основная проблема калибровки многоэлементной ФАР

- С увеличением количества каналов, амплитуда модуляций мощности уменьшается
- Допустим, до калибровки ФАР сфазирована в направлении источника сигнала

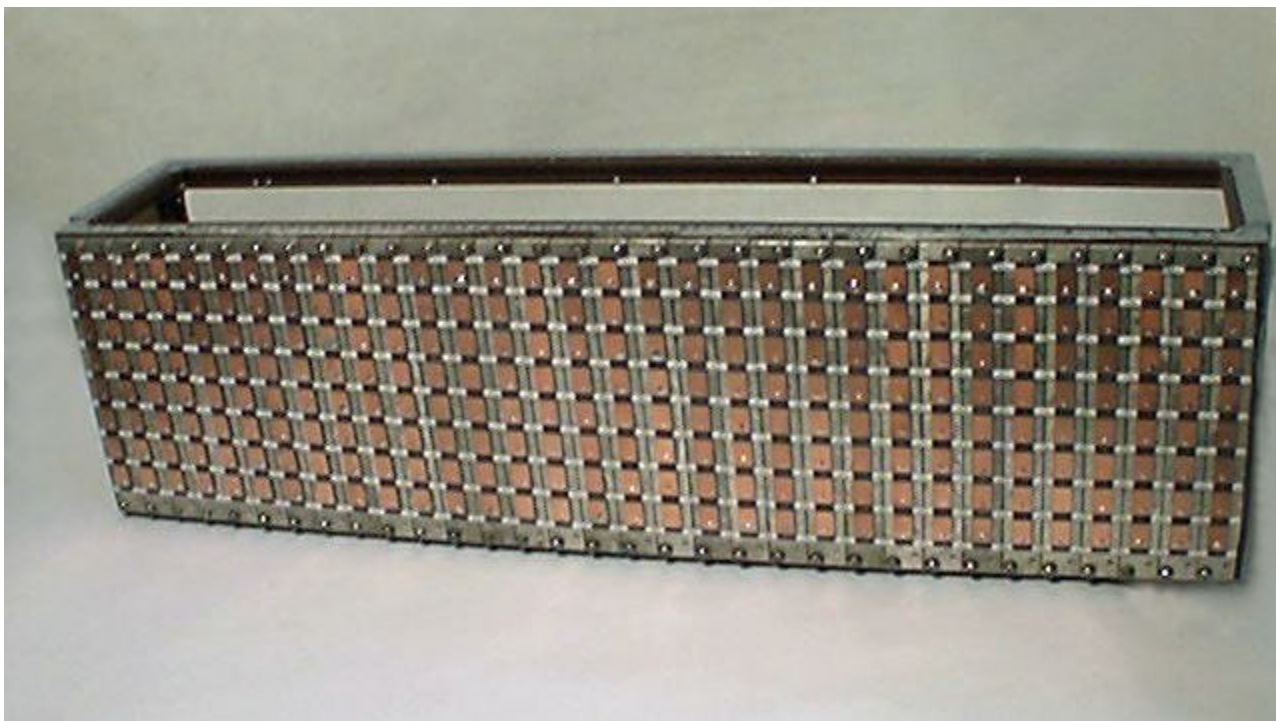
| Каналов   | 10             | 100              | 1000              |
|-----------|----------------|------------------|-------------------|
| Модуляция | $\approx 2$ dB | $\approx 0.2$ dB | $\approx 0.02$ dB |

- Очевидно, что затруднительно калибровать антенну уже с 100 элементами, так как вариации 0.1 дБ может быть трудно отследить
- Невозможно калибровать многоэлементные ФАР без подготовки.
- Метод REV нуждается в доработке

# Основные подходы к калибровке многоканальных ФАР

- Сигнал ФАР должен быть снижен
  - Отключением некоторых каналов или
  - Расфазировкой групп каналов для снижения суммарного сигнала групп или
  - Вся ФАР может быть расфазирована для снижения полного суммарного сигнала
- Затем :
- 1-й подход
  - Каналы ФАР условно разделяются на отдельные группы (подрешетки)
  - Каналы внутри групп калибруются между собой,
  - Группы целиком калибруются друг относительно друга, как единое целое
- 2-й подход
  - Каналы ФАР условно разделяются на перекрывающиеся группы
  - Каналы внутри групп калибруются между собой,
  - Фазы между группами сшиваются через зоны перекрытия
- 3-й подход
  - ФАР целиком калибруется за один или несколько проходов

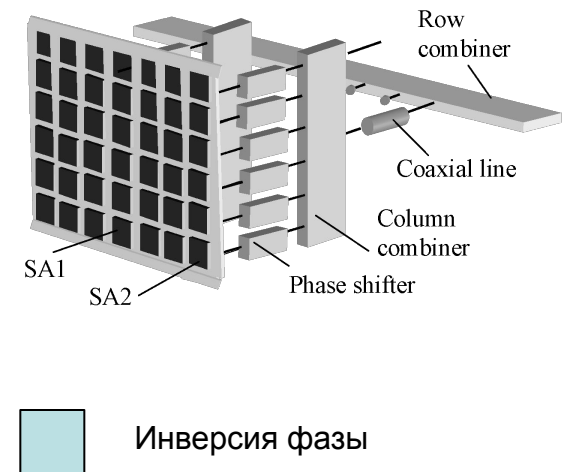
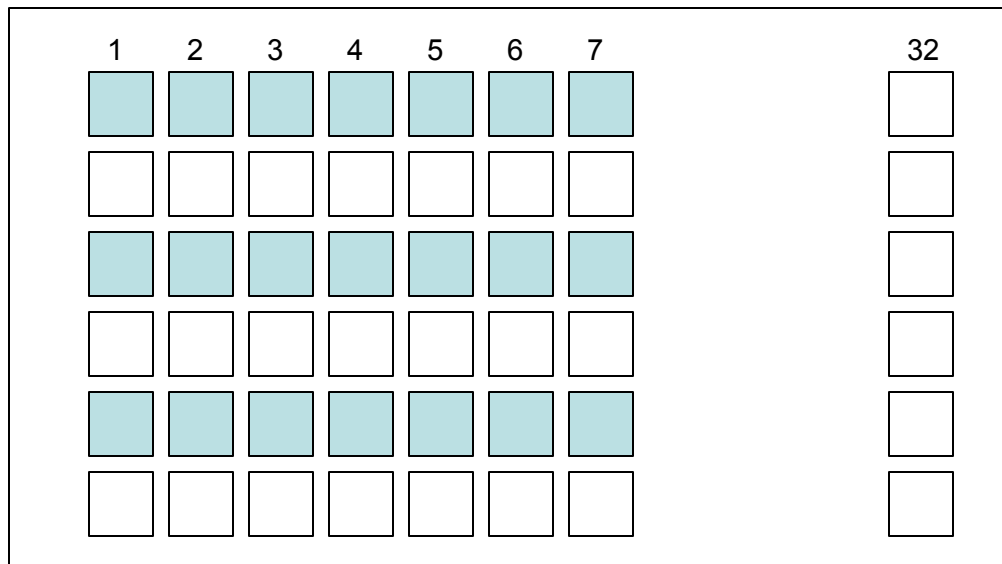
# Готовые подрешетки



# Расфазировка в группах

- Фаза каждого второго канала в группе инвертируется

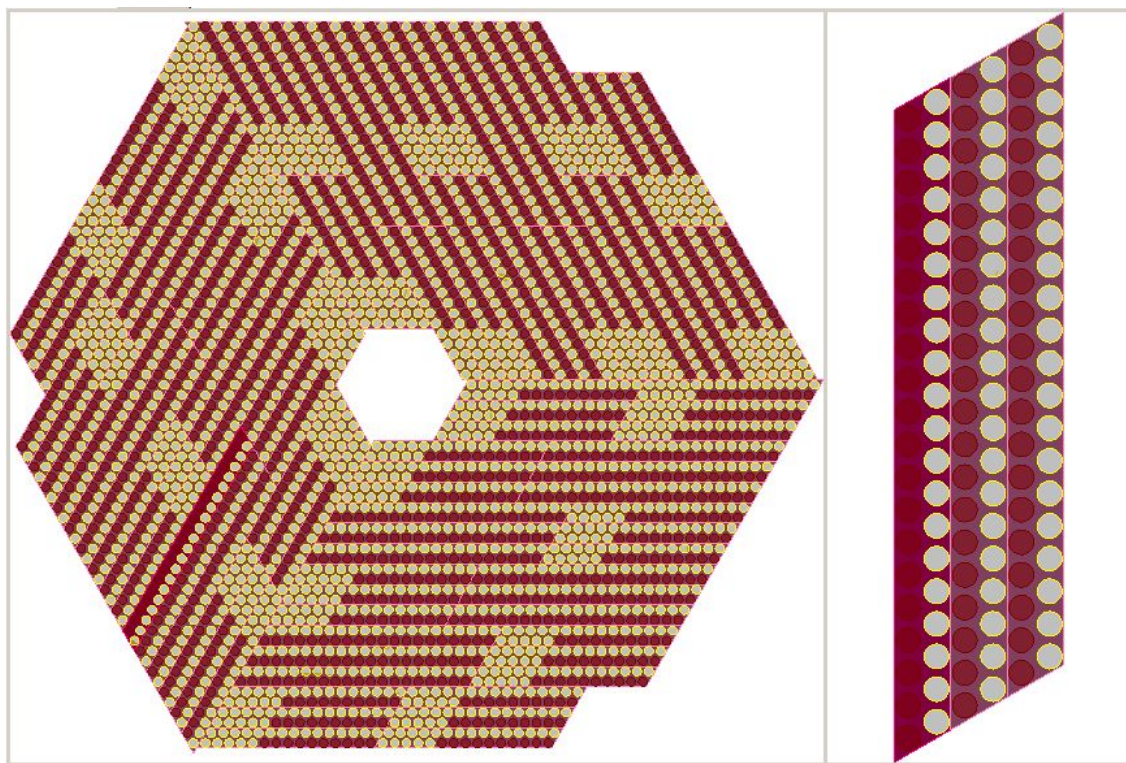
Antenna aperture.



Противоречие: глубокое подавление сигнала возможно только для хорошей начальной калибровки.  
Так что, может быть удобно для перекалибровки после замены

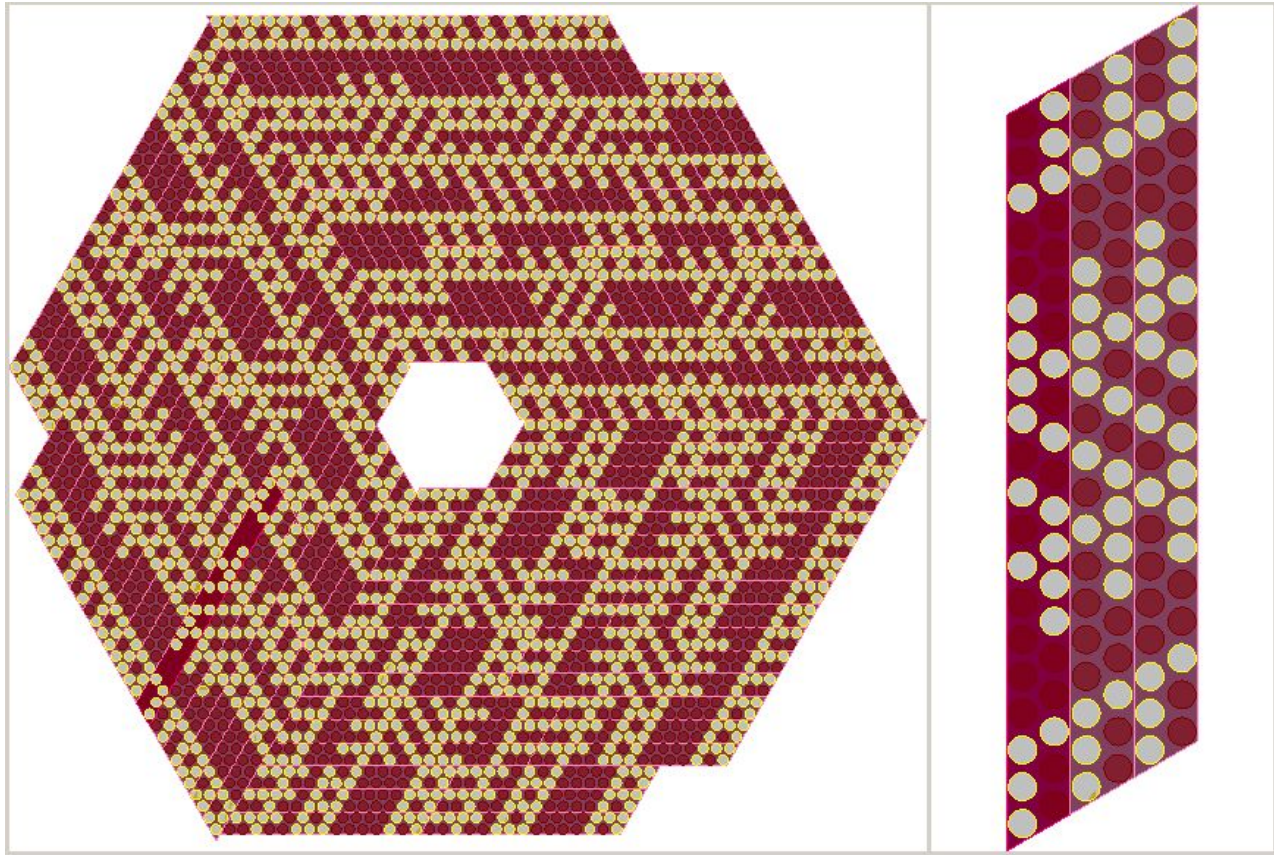
# Расфазировка всей ФАР (шаг 1)

- Все каналы делятся на группы, примерно пополам
- Фазы в каналах одной группы последовательно инкрементируются, измеряется мощность суммарного сигнала
- Выбирается управляющий набор состояний, обеспечивающий минимальную мощность



# Расфазировка всей ФАР (шаг 2)

- Каналы разделяются на две группы по другому, и все повторяется



# Расфазировка всей ФАР

- Чтобы хорошо перемешать каналы между группами, удобно применять функцию Уолша
- За несколько первых шагов сигнал резко падает, дальше снижается медленно
- На этом этапе, можно взять один какой-нибудь канал и минимизировать по его состоянию
- Остановиться следует тогда, когда вариации сигнала одного канала составляют 0.5 – 2.5 dB
- Рекомендуется загнать сигнал в ноль, потом максимизировать по 3-5 каналам

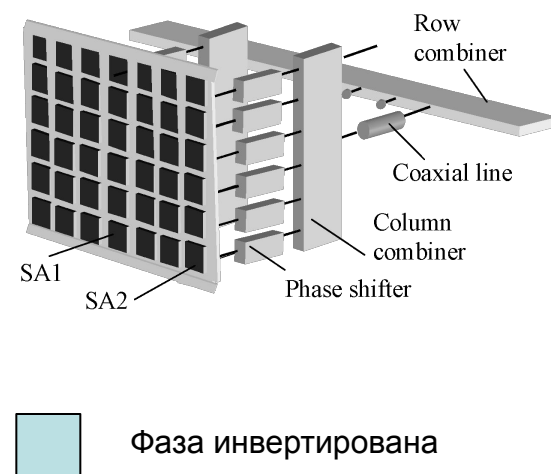
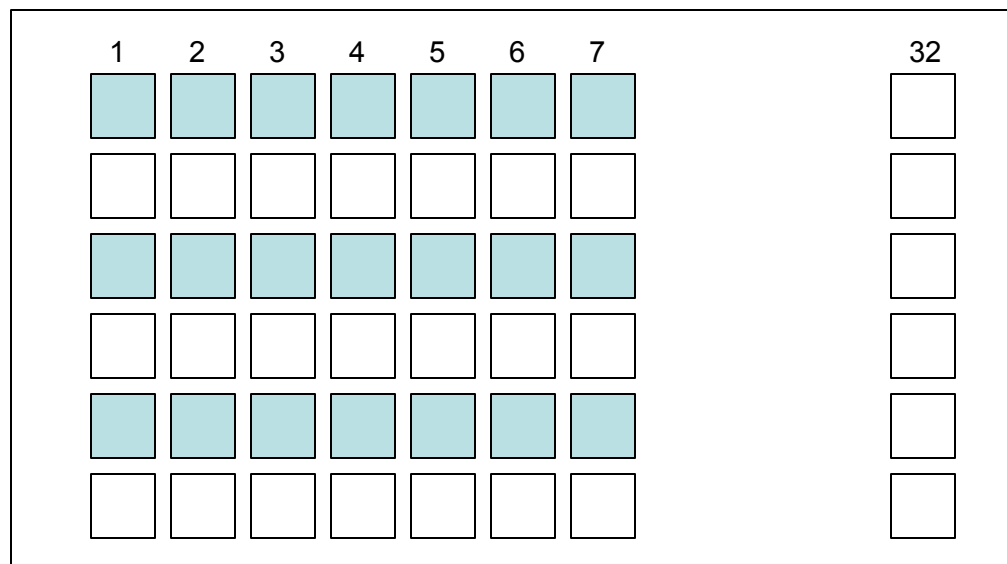
# Основные подходы к калибровке многоканальных ФАР

- Сигнал ФАР должен быть снижен
  - Отключением некоторых каналов или
  - Расфазировкой групп каналов для снижения суммарного сигнала групп или
  - Вся ФАР может быть расфазирована для снижения полного суммарного сигнала
- Затем :
- 1-й подход
  - Каналы ФАР условно разделяются на отдельные группы (подрешетки)
  - Каналы внутри групп калибруются между собой,
  - Группы целиком калибруются друг относительно друга, как единое целое
- 2-й подход
  - Каналы ФАР условно разделяются на перекрывающиеся группы
  - Каналы внутри групп калибруются между собой,
  - Фазы между группами сшиваются через зоны перекрытия
- 3-й подход
  - ФАР целиком калибруется за один или несколько проходов

# 1-й подход: Калибруем каналы внутри групп

- Работает только модуль 32, остальные «отключены»
- Калибруем его как 6-элементную антенну

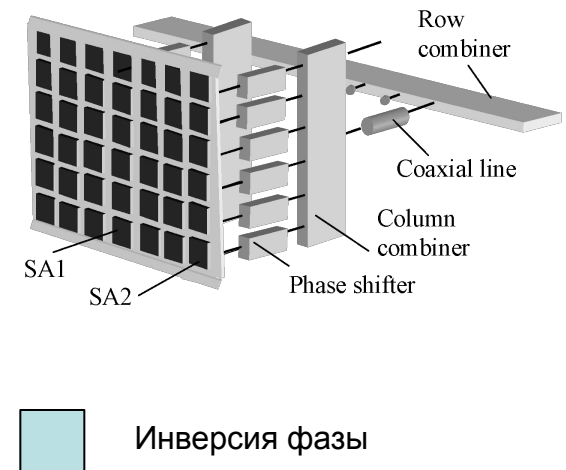
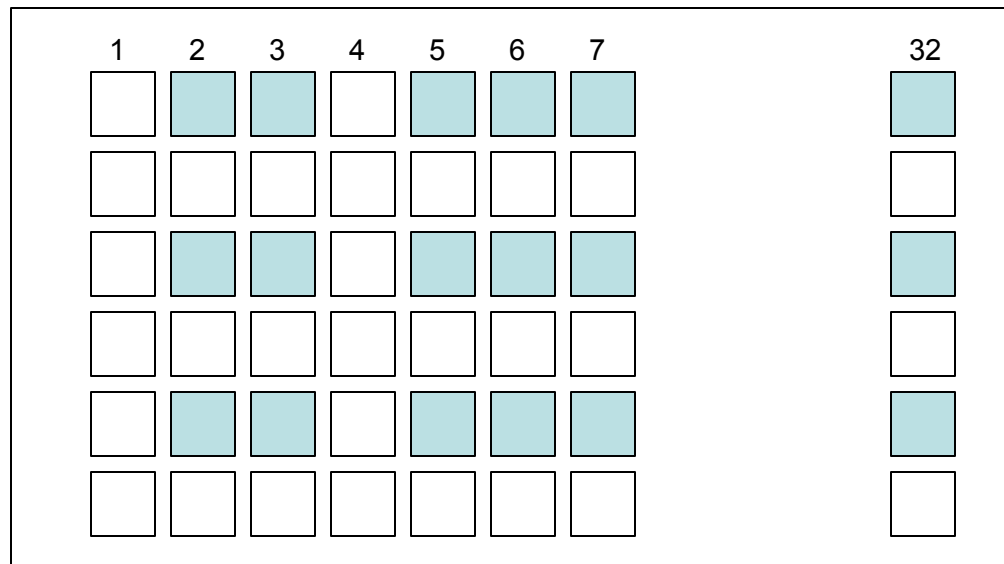
Antenna aperture.



# 1-й подход: Группы калибруются друг относительно друга как единый канал

- Колонки 1 и 4 «включены», остальные «отключены». Калибруем их МТЕ методом

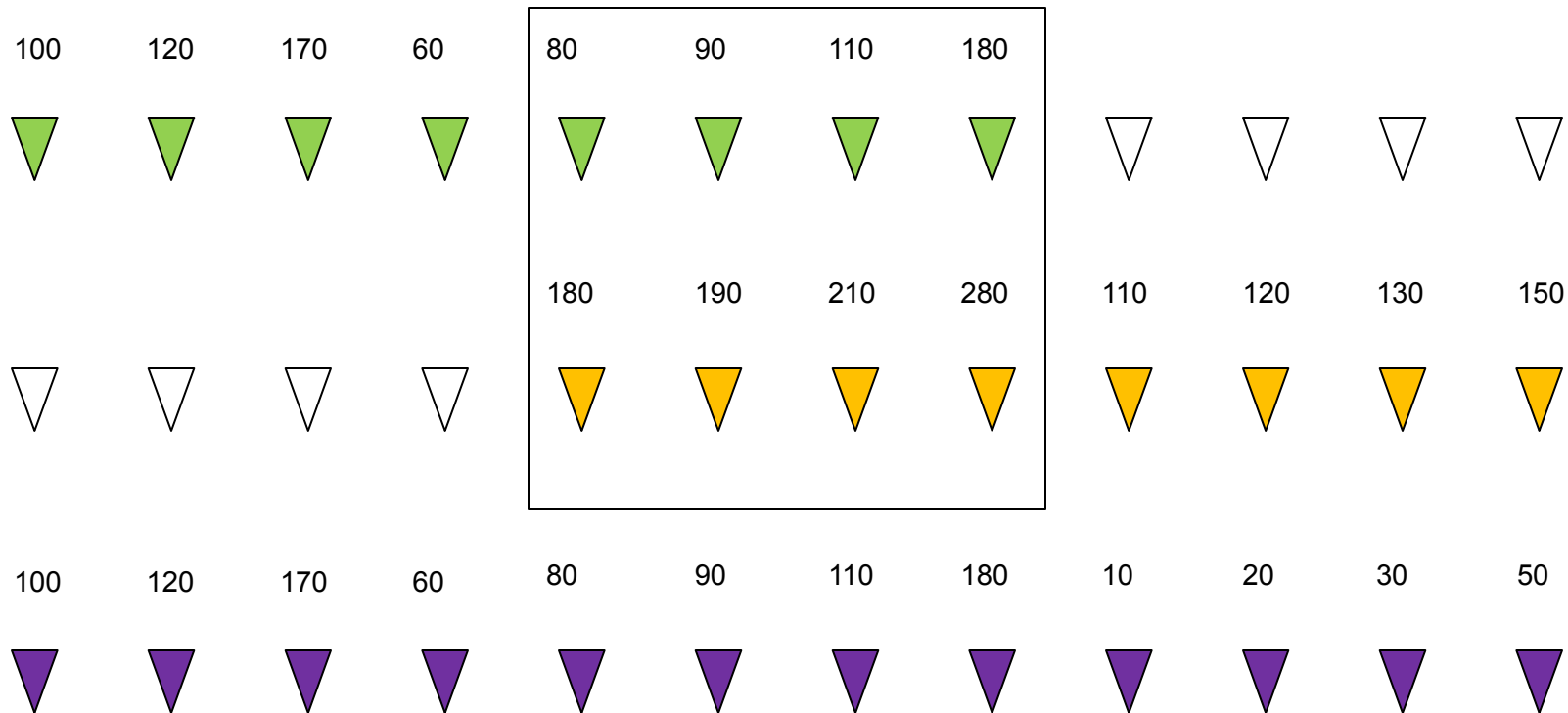
Antenna aperture.



## 2-й подход: Группы перекрываются ...



## 2-й подход: совмещаем фазы используя перекрытие



### 3-й подход:

Вся антенна калибруется за  
один или несколько проходов

