



**Тема 1: Принципы построения системы ПРН.  
Теоретические основы радиолокации и основы  
построения РЛС**

**Теоретические основы радиолокации**

## **Учебные вопросы**

- 1. Принципы получения радиолокационной информации.**
- 2. Радиолокационные сигналы и их характеристики.**
- 3. Оптимальное обнаружение сигналов и измерение их параметров.**
- 4. Расчет характеристик радиолокационного обзора.**

## **Вопрос 1**

**Принципы получения радиолокационной информации**

## Основные определения радиолокации

Совокупность сведений о целях, получаемых средствами радиолокации, называют **радиолокационной информацией**.

Технические средства, с помощью которых получается информация, называются **радиолокационными станциями (РЛС)**.

**Этапы получения радиолокационной информации:**

- обнаружение цели;
- измерение координат и параметров движения;
- разрешение;
- распознавание цели.

## Этапы получения радиолокационной информации

**Разрешение** состоит в выполнении задач обнаружения и измерения параметров цели при наличии других целей.

Степень способности РЛС обеспечить раздельное наблюдение и измерение координат двух близко расположенных целей называют **разрешающей способностью РЛС**.

**Измерение** сводится к выработке и определению координат и параметров цели с минимально

**Распознавание** сводится к установлению принадлежности цели к определенному классу. Результатами распознавания могут быть следующие решения: "цель одиночная", "цель групповая", "цель - постановщик помех", "боевой блок баллистической ракеты" и др.

ускорение и др.

# Принципы получения радиолокационной информации

## Основные положения:

- 1. Информация получается за счет возмущения среды целью, в частности, за счет эффекта переизлучения целью радиоволн.**
- 2. Для получения необходимой информации учитываются и используются реальные закономерности распространения радиоволн в пространстве.**
- 3. Выделение слабых сигналов, приходящих от цели, и разрешение целей обеспечивается за счет различий сигналов и помех, а также сигналов от разных целей между собой.**
- 4. Информация о целях получается параллельно или последовательно во времени и выдается в виде информационных потоков.**

## Эффективная поверхность рассеяния целей

Явление **вторичного излучения** свойственно волнам

ЭПР цели можно рассчитать по формуле:

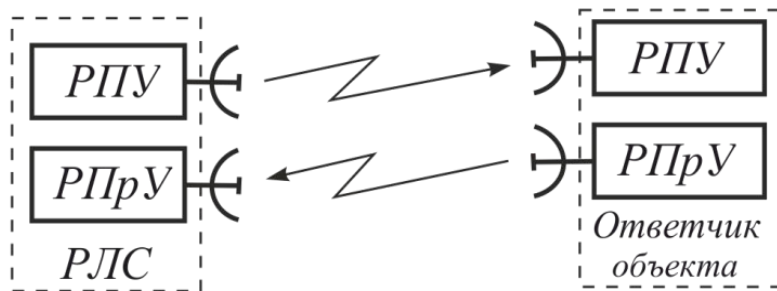
встречает препятствие (цель) на пути своего распространения.

$$\sigma_{\text{ц}} = 4\pi \cdot r^2 \cdot \frac{S_{\text{пр}}}{S_{\text{ц}}}$$

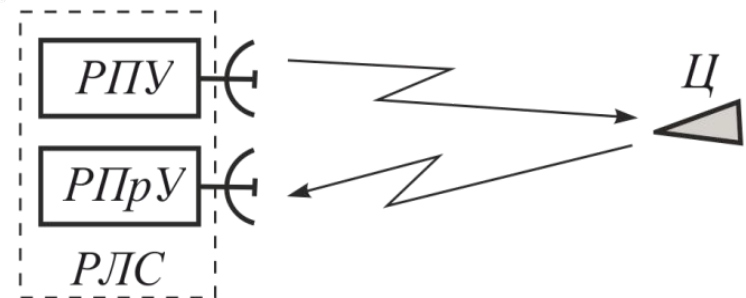
**Эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) цели** – это площадь некоторой фиктивной поверхности, являющейся **идеальным изотропным отражателем**, который, будучи помещённым в **точку приема** точку расположения цели нормально по **направлению облучения**, создаёт **вторичное излучение** РЛС ту же плотность потока мощности, что и реальная цель.

## Виды радиолокации

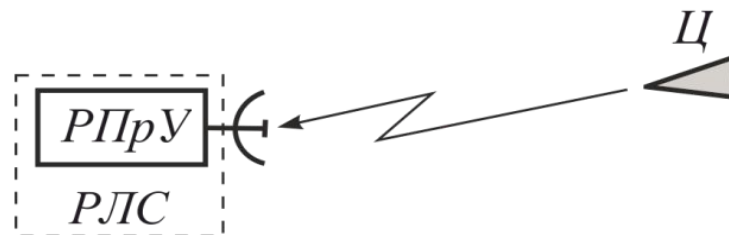
Радиолокация с использованием вторичного излучения и переизлучения (ретрансляции) называется **активной**, а радиолокация с использованием собственного излучения — **пассивной**.



Активная радиолокация с активным ответом



Активная радиолокация с пассивным ответом

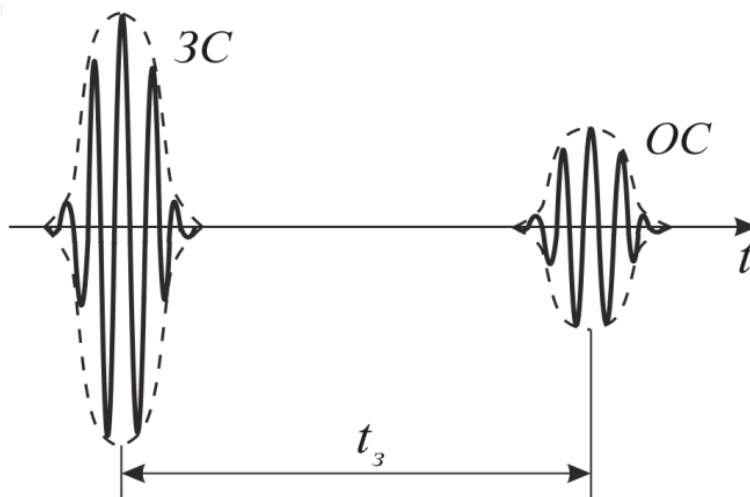


Пассивная радиолокация



## Принцип измерения дальности до цели

Время запаздывания отраженного сигнала относительно зондирующего для совмещенной РЛС определяется соотношением:  $t_3 = 2r/c$ .



Тогда дальность до цели равна:

$$r = \frac{c \cdot t_3}{2}$$

## Принцип измерения радиальной скорости цели

Измерение радиальной скорости  $V_r$  цели основано на эффекте Доплера:

Отраженный от движущейся цели сигнал оказывается смещенным по частоте относительно зондирующего сигнала на величину частоты Доплера  $F_D$ , пропорциональную радиальной скорости цели:

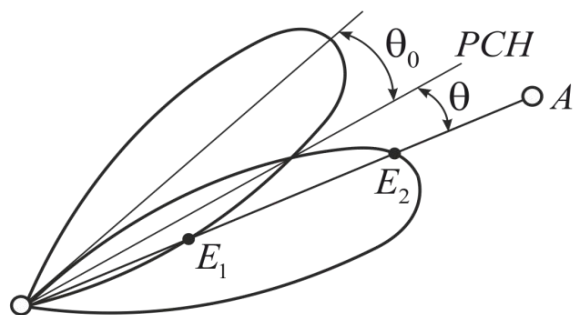
$$F_D = \frac{2V_r}{\lambda}$$

Тогда радиальная скорость цели равна:

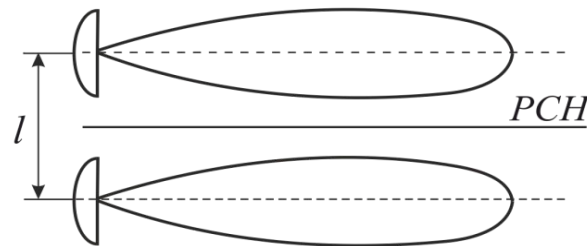
$$V_r = \frac{F_D \cdot \lambda_B}{2}$$

# Принцип измерения угловых координат цели

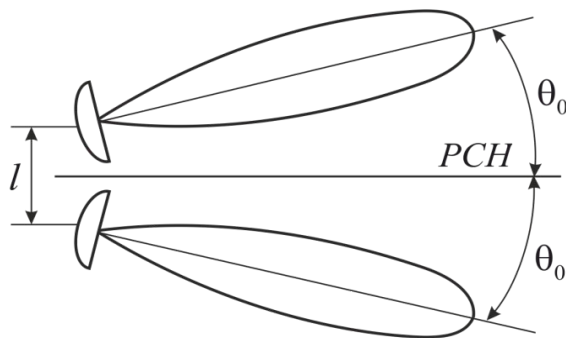
Физическую основу радиолокационных методов измерения угловых координат цели составляют: прямолинейность распространения и направленность излучения и приема радиоволн.



Амплитудный метод пеленгации



Фазовый метод пеленгации



Амплитудно-фазовый метод пеленгации

# Технические характеристики РЛС

1. Несущая частота  $f_0$  (длина волны  $\lambda_B$ ).
2. Параметры зондирующего сигнала (ширина спектра  $\Delta f_0$ , длительность  $\tau_c$ , период повторения  $T_{II}$ ).
3. Характеристики радиопередающего устройства (РПУ) РЛС:
  - излучаемая (импульсная) мощность  $P_{II}$ ;
  - коэффициент усиления  $G_{II}$ ;
  - скважность  $Q$  (для импульсных РЛС);
4. Характеристики радиоприемного устройства (РПрУ) РЛС:
  - чувствительность приемного устройства  $P_{пр}$ ;
  - коэффициент усиления  $G_{пр}$ ;
  - шумовая температура РПрУ  $T_0$ ;
  - коэффициент шума РПрУ  $k_{ш}$ ;
5. Характеристики антенного устройства РЛС.

## Тактические характеристики РЛС

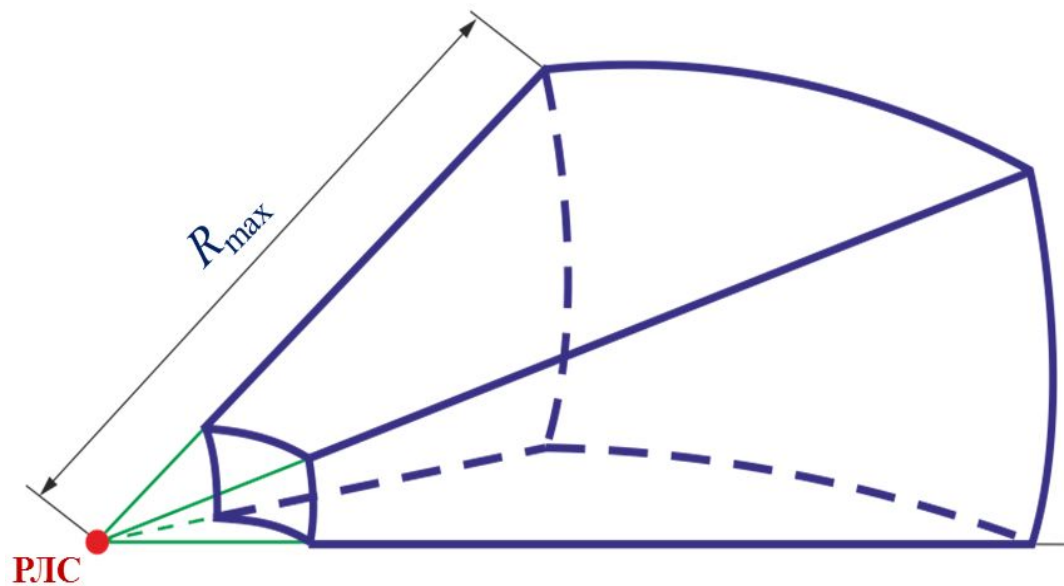
Под **тактическими характеристиками** понимают характеристики, описывающие возможности практического использования РЛС.

Основными тактическими характеристиками любой РЛС являются:

- **зона действия;**
- **максимальная дальность действия;**
- **разрешающая способность;**
- **точность измерения координат цели;**
- **пропускная способность;**
- **помехозащищенность;**
- **надежность.**

## Зона действия (сектор обзора) РЛС

Представляет собой область пространства, в которой РЛС решает ту или иную задачу. Зона действия РЛС ограничивается минимальной и максимальной дальностями действия, а также, секторами обзора по азимуту и углу места.



## Максимальная дальность действия РЛС

Зависит не только от параметров РЛС, но и от ЭПР наблюдаемых целей:

$$R_{\max} = 4 \sqrt{\frac{P_{\text{и}} \cdot G_{\text{п}} \cdot G_{\text{пр}} \cdot \lambda_{\text{в}}^2 \cdot \sigma_{\text{ц}}}{(4\pi)^3 \cdot k_{\text{Б}} \cdot T_0 \cdot \Delta f \cdot k_{\text{ш}} \cdot q^2}}$$

- $k_{\text{Б}}$  – коэффициент Больцмана, определяющий связь между температурой и энергией;
- $q^2$  – отношение сигнал/шум на входе приемного устройства РЛС. Является безразмерной величиной, равной отношению мощности полезного сигнала к мощности шума на входе приемного устройства РЛС.

## **Разрешающая способность РЛС**

**Способность РЛС осуществлять раздельное радиолокационное наблюдение целей.**

## **Пропускная способность РЛС**

**Определяется максимальным числом одновременно сопровождаемых целей (элементов для сложных целей), по которым на заданных рубежах были выполнены критерии обнаружения, захвата и сопровождения, и выдана вся необходимая информация.**



## **Точность измерения координат целей**

**Определяется абсолютным значением систематической ошибки и среднеквадратическим значением случайной ошибки.**

## **Надежность РЛС**

**Способность РЛС сохранять свои тактико-технические характеристики в заданных допусках при определенных условиях эксплуатации.**

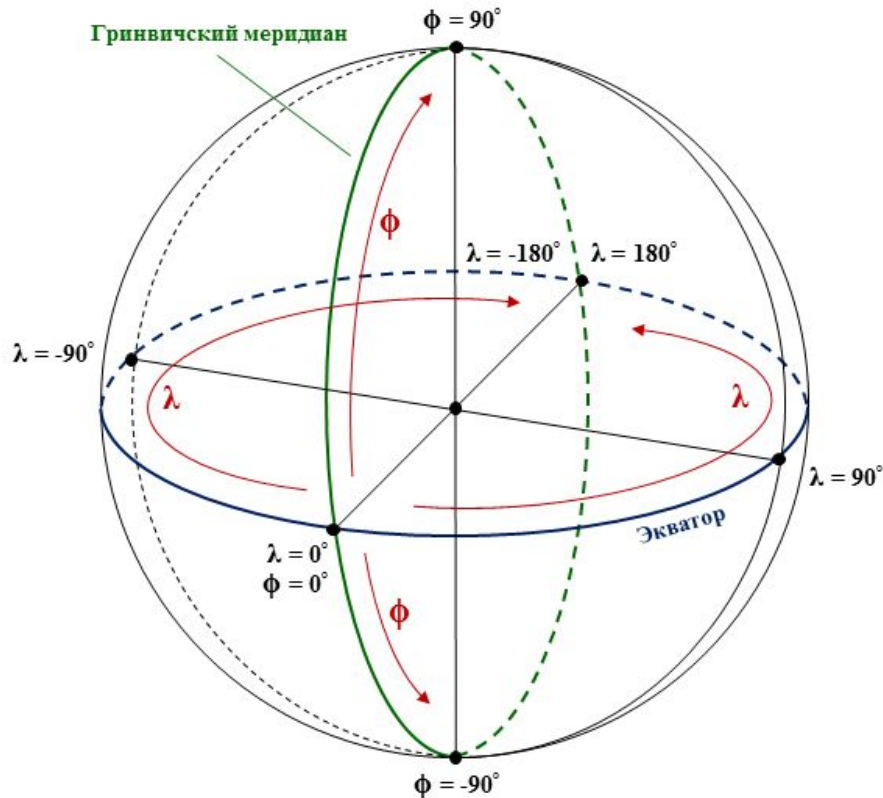
**Оценивается надежность обычно вероятностью безотказной работы РЛС в течение установленного промежутка времени или средним временем исправной работы РЛС (частотой отказов).**

При решении задач получения и обработки радиолокационной информации используются следующие **системы координат**:

1. Географическая система координат (ГСК).
2. Геоцентрическая система координат (ГЦСК).
3. Местные (топоцентрические) системы координат (МСК).
4. Антенные системы координат (АСК).

# Географическая система координат (ГСК)

Определяет положение точки (объекта) на земной поверхности или, более широко, в географической оболочке.

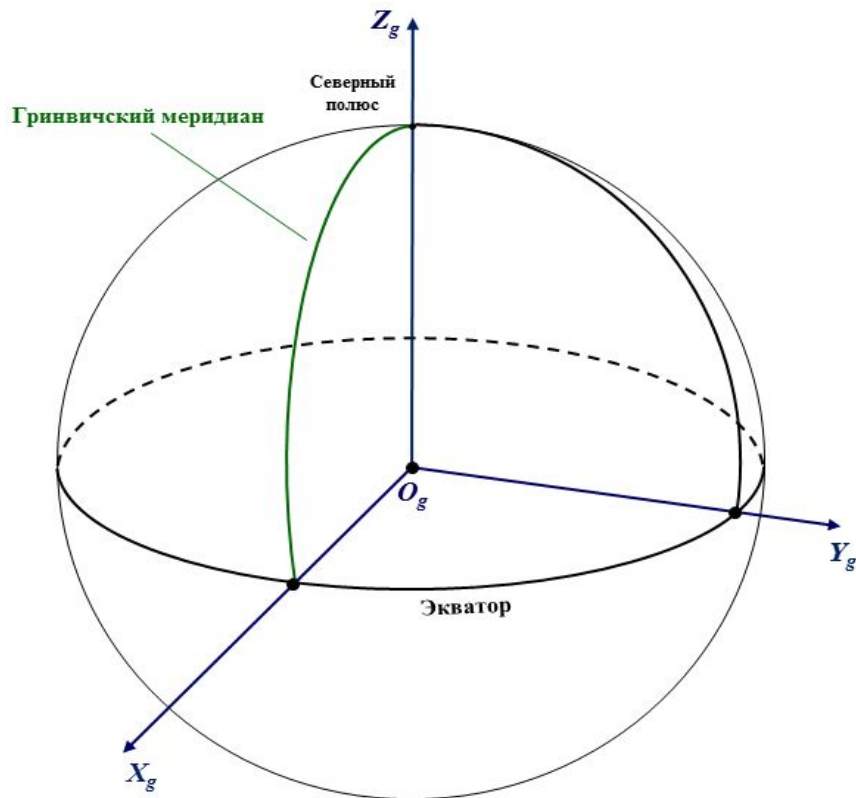


**Долгота** – двугранный угол  $\lambda$  между плоскостью меридиана, проходящего через данную точку, и плоскостью нулевого (Гринвичского) меридиана, от которого ведётся отсчёт долготы.

**Широта** – угол  $\phi$  между местным направлением зенита и плоскостью экватора, отсчитываемый от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  (от  $0^\circ$  до  $-90^\circ$ ) в обе стороны от экватора.

## Геоцентрическая система координат (ГЦСК)

В ГЦСК которой координаты объекта задаются вектором  $(x_g, y_g, z_g)$  прямоугольной системы координат с центром в центре Земли.



Ось  $Z$  проходит через северный полюс, ось  $X$  проходит через точку пересечения линии экватора и гринвичского меридиана, а ось  $Y$  дополняет систему до правой системы координат.

## Местные системы координат (МСК)

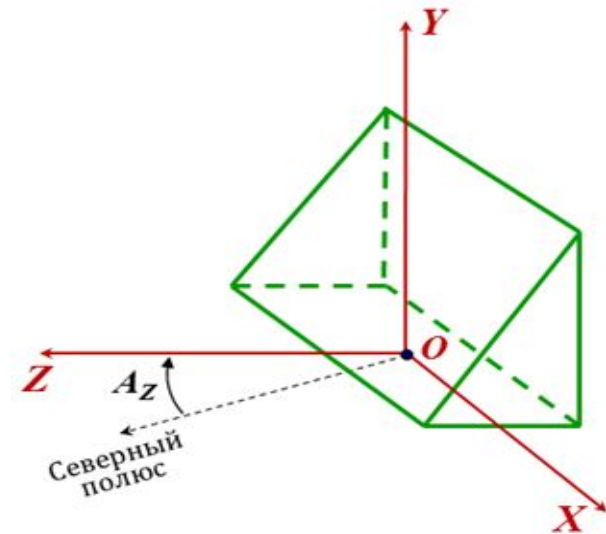
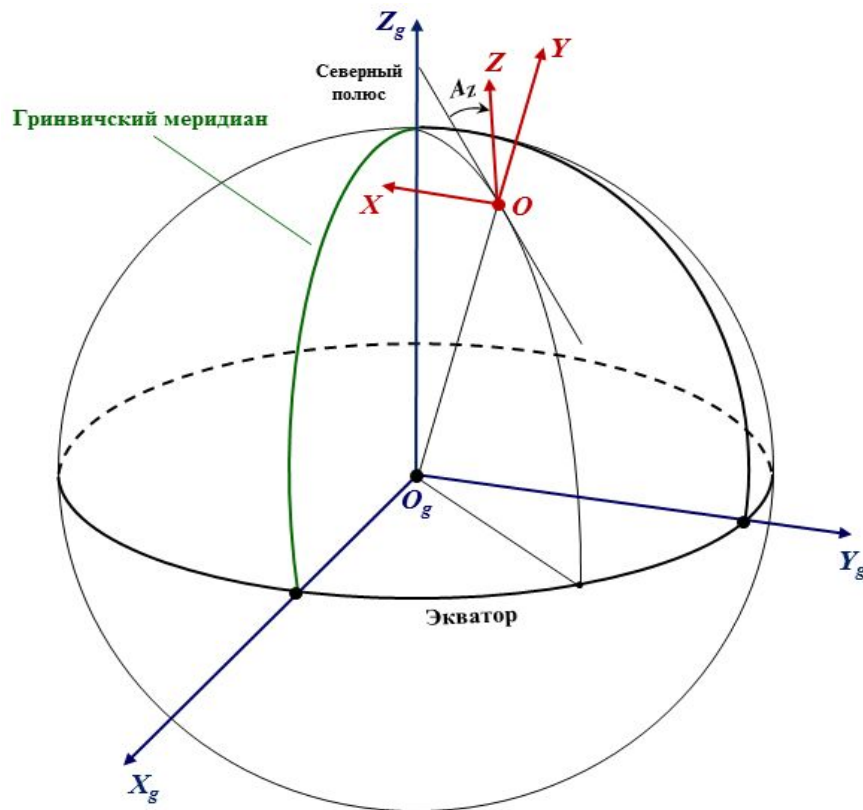
**Местными (топоцентрическими) системами координат (МСК)** называют такие системы координат, начало которых находится в точке наблюдения (в радиолокации – точки стояния РЛС).

**Различают:**

- **местную прямоугольную систему координат;**
- **местную сферическую систему координат.**

# Местная прямоугольная система координат (МПСК)

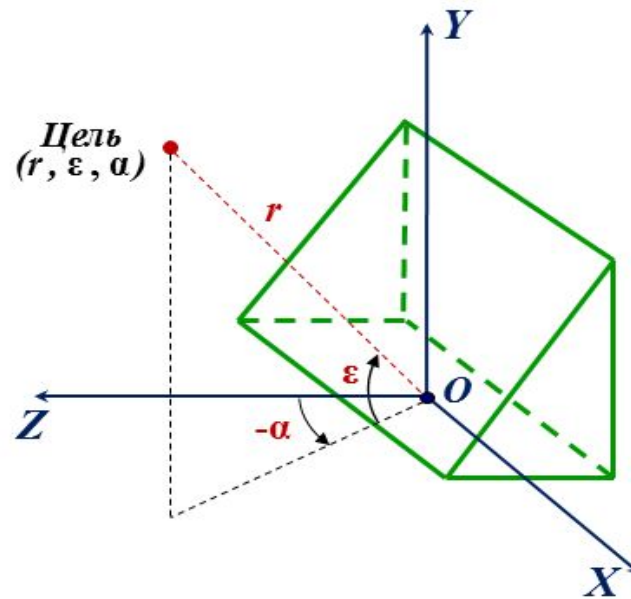
Система координат, центр которой находится в точке стояния РЛС, заданной географическими координатами  $\lambda_0$ ,  $\phi_0$ ,  $h_{30}$ . Ось  $Y$  направлена в зенит по местной нормали к поверхности земли, ось  $X$  и ось  $Z$  лежат в горизонтальной плоскости и вместе с осью  $Y$  образуют правую систему координат.



РЛС в МПСК

## Местная сферическая система координат (МСфСК)

Задается тремя параметрами: наклонной дальностью до объекта наблюдения (цели)  $r$ , углом места  $\varepsilon$  и азимутом  $\alpha$ .



**Угол места** отсчитывается от горизонтальной плоскости до направления на цель. **Азимут**, отсчитывается от оси  $Z$  МПСК, связанной с данной МСфСК. Причем, значения углов, отсчитываемых влево от оси  $Z$  МПСК – отрицательные, вправо – положительные.

## Антенные системы координат (АСК)

**Антенными системами координат (АСК)** называют такие системы координат, начало отсчета, которых совмещено с центром антенной системы РЛС.

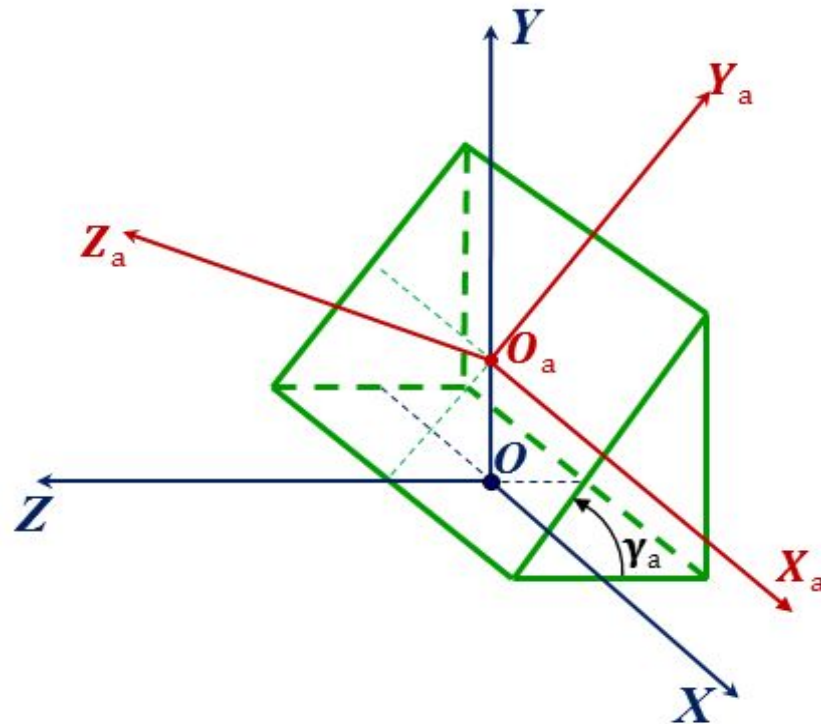
**Различают:**

- **антенную прямоугольную систему координат;**
- **антенную биконическую систему координат;**
- **антенную сферическую систему координат.**



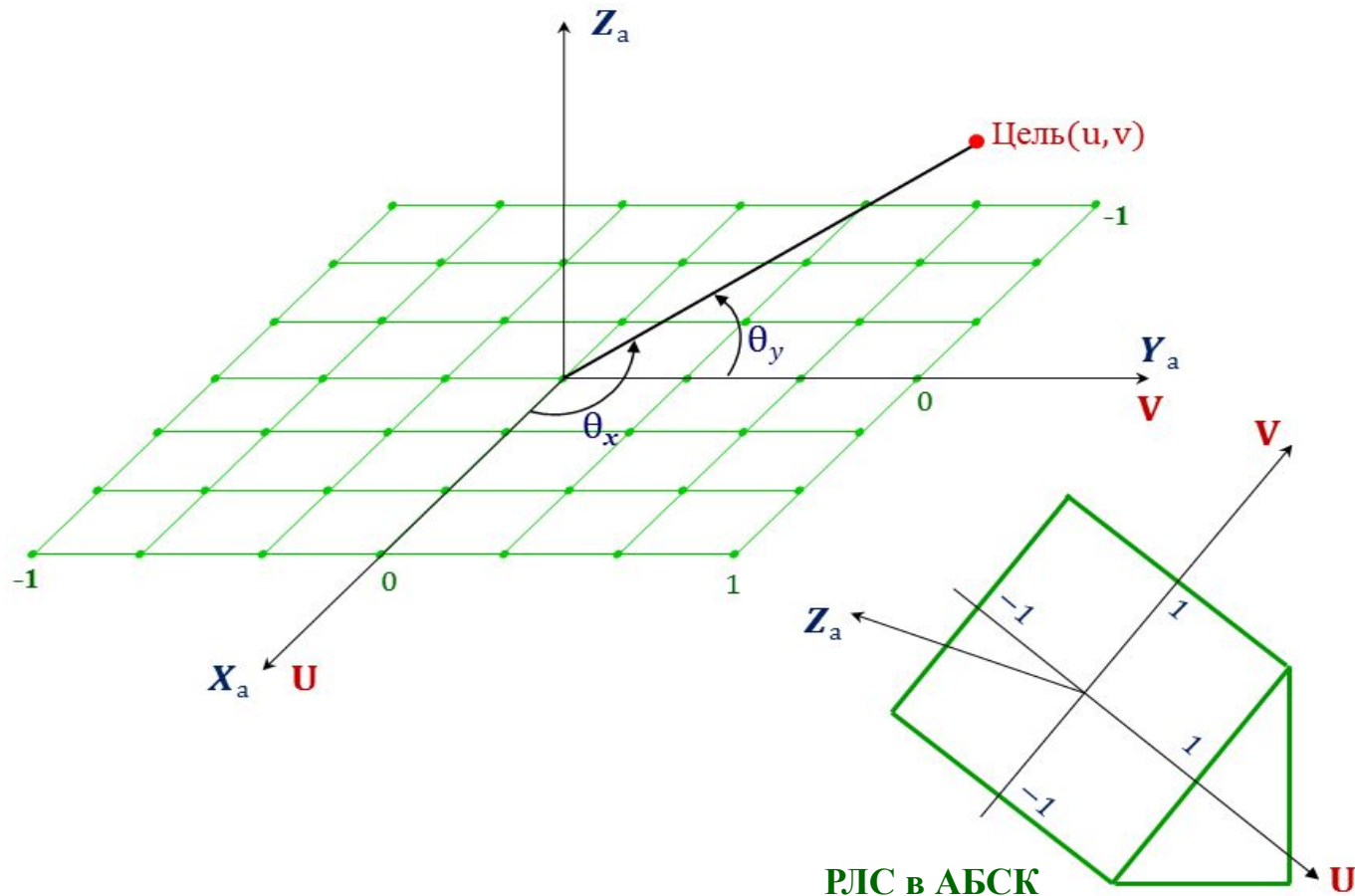
## Антенная прямоугольная система координат (АПСК)

Система координат, начало отсчета, которой совпадает с геометрическим центром антенной системы РЛС, ось  $Z_a$  – нормальна к плоскости ФАР, ось  $Y_a$  – лежит на линии пересечения плоскости антенны и плоскости, проходящей через местную нормаль к поверхности Земли в точке  $O_a$  и ось  $Z_a$ , ось  $X_a$  дополняет систему координат до правой



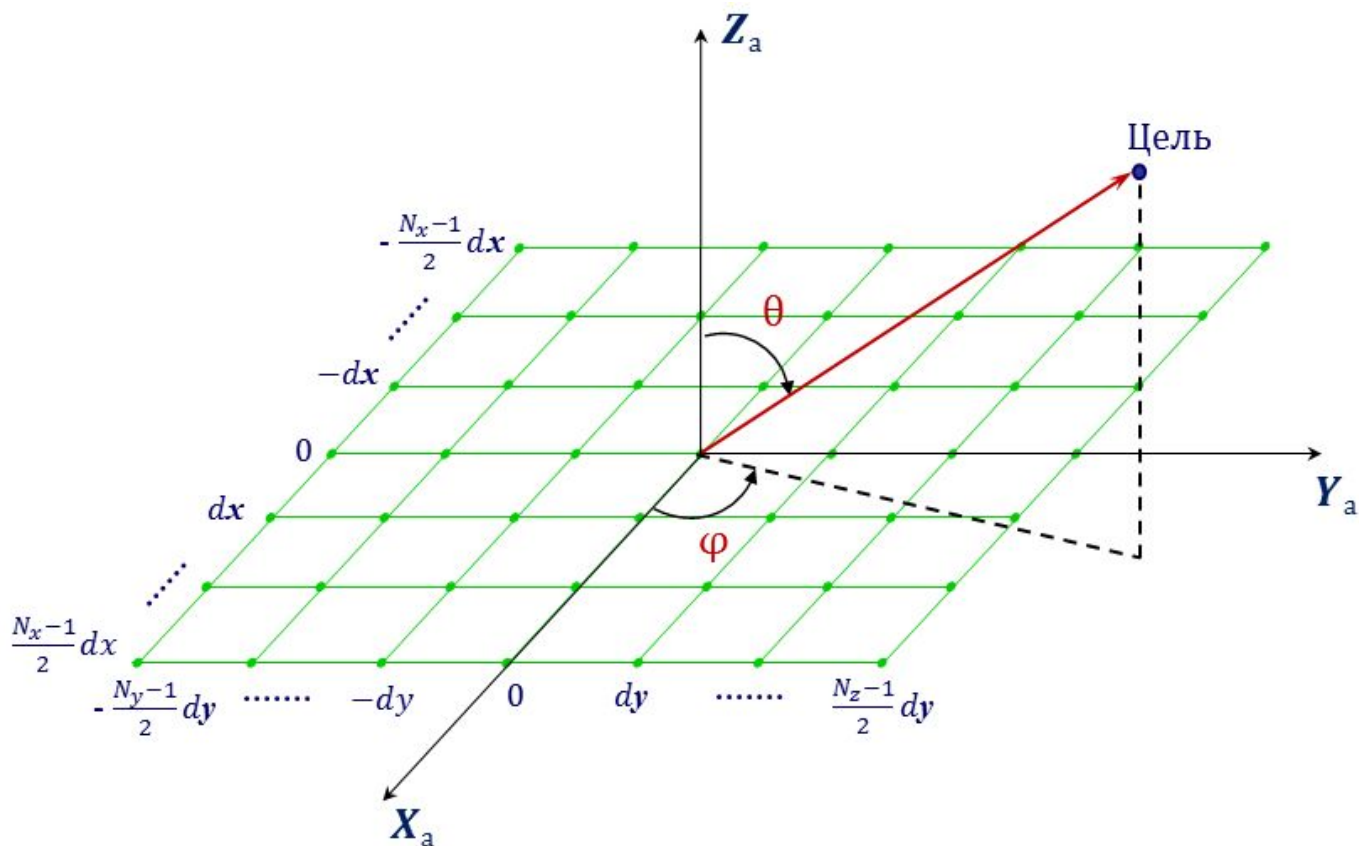
# Антенная биконическая система координат (АБСК)

Система ортогональных криволинейных координат, в которой положение точки (объекта) определяется координатами:  $r_a$ ,  $u = \cos\theta_x$  и  $v = \cos\theta_y$ .



## Антенная сферическая система координат (АСфСК)

Система координат в которой, положение ДН антенной системы РЛС в пространстве (направление на цель), задается двумя координатами  $\theta$  и  $\varphi$ .



## **Вопрос 2**

**Радиолокационные сигналы и их  
характеристики**

## Радиолокационные сигналы

**Под радиолокационным (зондирующим) сигналом в радиолокации понимают электромагнитную волну, излучаемую антенным устройством РЛС.**

**В зависимости от назначения РЛС зондирующий сигнал должен **позволять реализовывать:****

- **энергию излучения, достаточную для обнаружения целей и оценки их параметров;**
- **требуемое разрешение целей;**
- **достаточное подавление помех (нежелательных отраженных сигналов).**

## Представление РЛ сигнала во временной области

$$s(t) = a(t) \cos(\omega_0 t + \varphi(t))$$

$a(t)$  – функция, выражающая **амплитудную модуляцию** сигнала;

$\varphi(t)$  – функция, выражающая **фазовую модуляцию** сигнала;

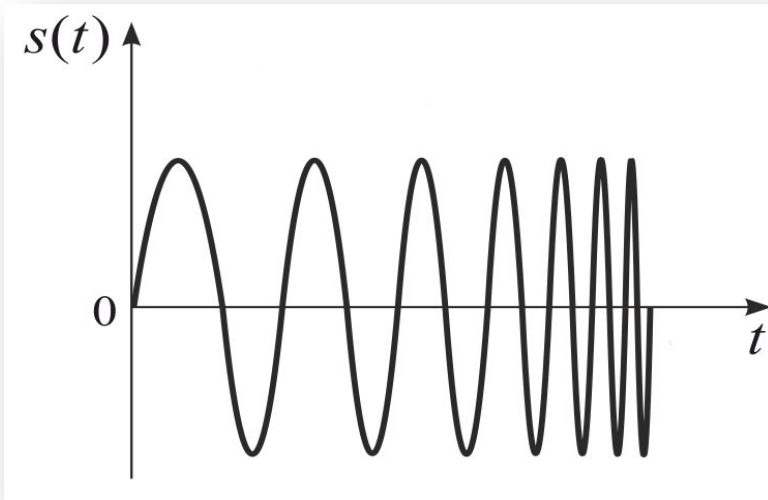
$\omega_0 = 2\pi f_0$  – круговая несущая частота сигнала;

$f_0$  – несущая частота сигнала.

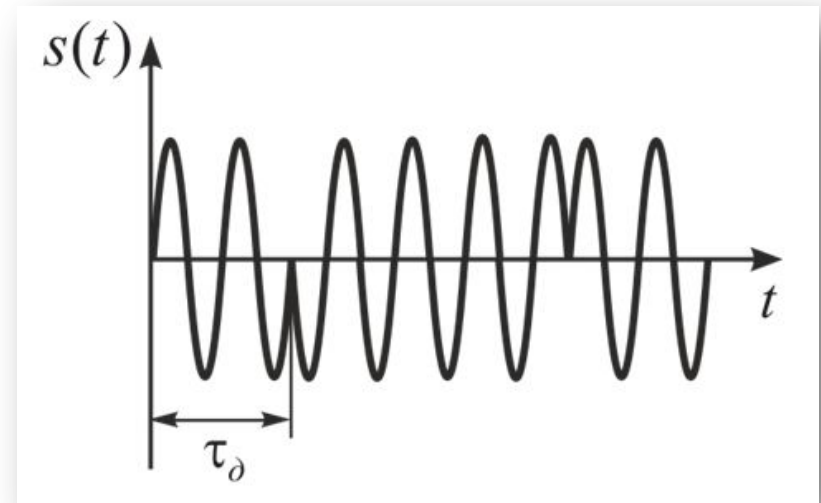
Через фазовую модуляцию сигнала можно выразить его **частотную модуляцию**:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}$$

В случае, когда сигнал является дискретным, то фазовую модуляцию называют **фазовой манипуляцией**.



РЛ сигнал с частотной модуляцией



РЛ сигнал с фазовой манипуляцией

## Представление РЛ сигнала в частотной области

Любой сколь угодно сложный по своей форме сигнал

Так как функция  $S(j\omega)$  – комплексная, то ее можно представить в виде:

колебаний (гармоник).

**Спектральная плотность сигнала**  $S(j\omega) = |S(j\omega)| e^{j\varphi(\omega)} = S(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$  определяется **прямым преобразованием Фурье:**

Модуль спектральной плотности:  $|S(j\omega)| = S(\omega)$

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt$$

называется **амплитудно-частотным спектром** сигнала.

**Обратное преобразование Фурье:**

Аргумент спектральной плотности:  $\arg[S(j\omega)] = \varphi(\omega)$

называется **фазо-частотным спектром** сигнала.

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega$$



## Автокорреляционная функция (АКФ) сигнала

Для количественного определения степени отличия АКФ сигнала и его частотный спектр связаны преобразованием Фурье:

$$R(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} [S(\omega)]^2 e^{j\omega\tau} d\omega$$

$\tau$  – величина временного сдвига сигнала

Максимальное значение АКФ (при  $\tau = 0$ ) равно энергии сигнала, т.к. сигнал полностью коррелирован сам с собой: называют энергетическим спектром сигнала, который показывает распределение его энергии по частоте.

$$R(0) = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt = E$$

## Функция неопределенности сигнала

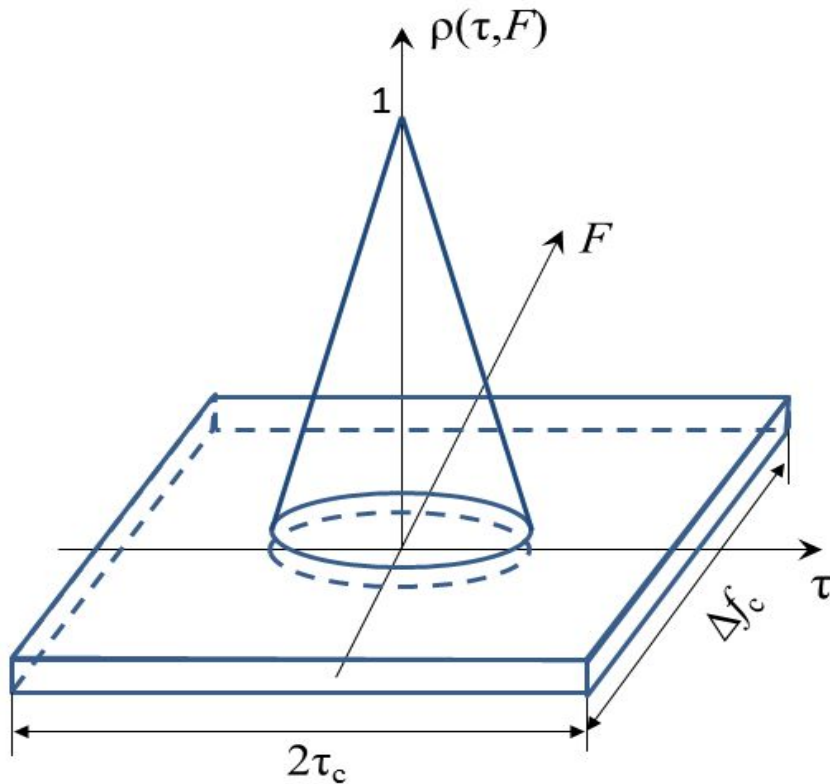
**Функцией неопределенности (рассогласования) сигнала называют его нормированную двумерную АКФ:**

$$\rho(\tau, F) = \left| \frac{1}{2E} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(t - \tau) e^{j2\pi Ft} dt \right|$$

$\tau$  и  $F$  – рассогласования сигнала по времени запаздывания и доплеровской частоте.

## Тело неопределенности РЛ сигнала

Геометрическое тело, ограниченное плоскостью и функцией неопределенности сигнала называют **телом неопределенности сигнала**.



Для улучшения разрешающей способности по времени запаздывания и частоте Доплера необходимо, чтобы тело неопределенности сигнала имело игольчатый вид при  $\tau = 0$  и  $F = 0$  и равномерный минимальный уровень боковых лепестков.

# Основные параметры радиолокационных сигналов

1. **Мощность сигнала  $P(t)$**
2. **Энергия сигнала  $E$**
3. **Длительность сигнала  $\tau_c$** , определяющая интервал времени, в течение которого сигнал существует
4. **Ширина спектра сигнала  $\Delta f_c$**  – полоса частот, в пределах которой сосредоточена основная энергия сигнала
5. **База сигнала** – произведение длительности сигнала на ширину его спектра:  $B = \tau_c \cdot \Delta f_c$


# Прямоугольный радиоимпульс

**Прямоугольный радиоимпульс (ПРИ) длительностью  $\tau_{\text{И}}$  определяется выражением:**

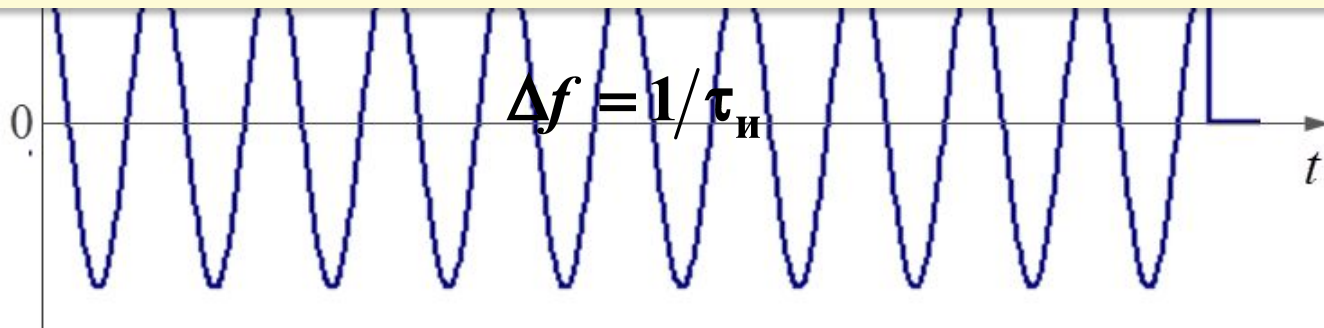
**Частотный спектр ПРИ имеет форму функции  $(\sin x)/x$ :**

$$S(\omega) = \int_{-\frac{\tau_{\text{И}}}{2}}^{\frac{\tau_{\text{И}}}{2}} e^{-j\omega t} dt = \begin{cases} U_m \frac{\sin(\omega \tau_{\text{И}}/2)}{\omega \tau_{\text{И}}/2}, & \leq |t| \leq \tau_{\text{И}} \\ 0, & \text{при } |t| > \tau_{\text{И}} \end{cases}$$

где:  $\omega = 2\pi f_{\text{И}}$  – круговая частота



**Ширина спектра ПРИ:**

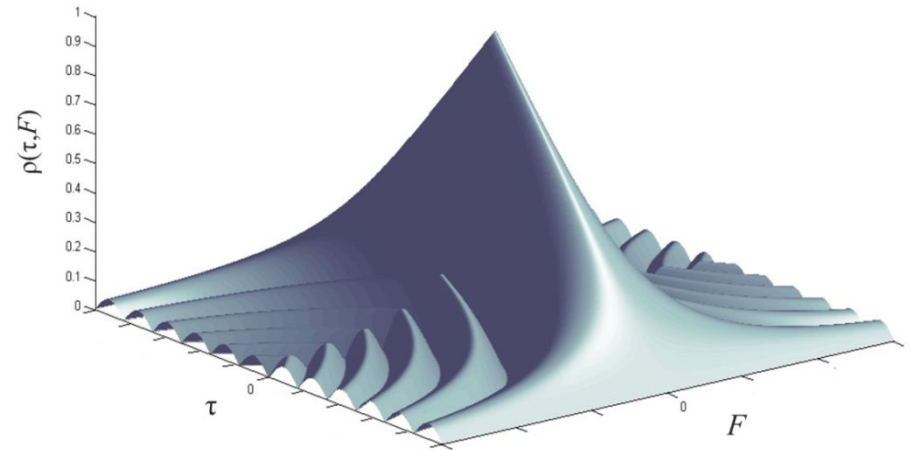


# Тело неопределенности ПРИ

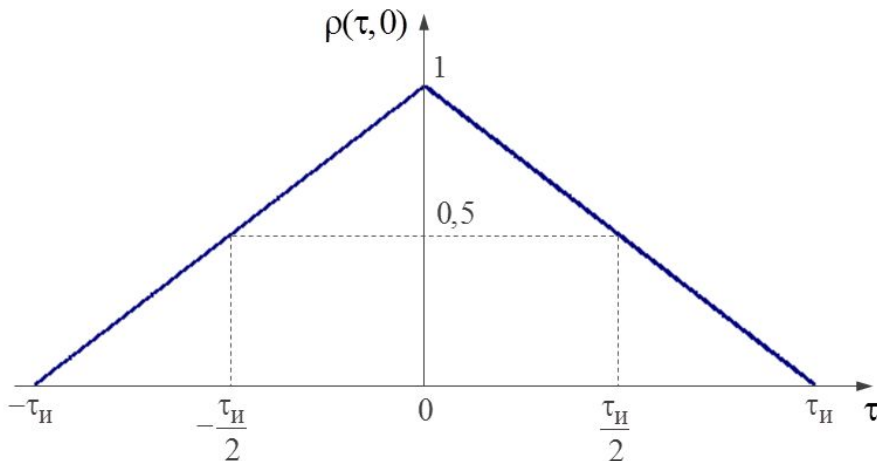
Функция неопределенности

$$\rho(\tau, F) = \left| \frac{\sin(\pi F (\tau_{\text{И}} - |\tau|))}{\pi F \tau_{\text{И}}} \right|$$

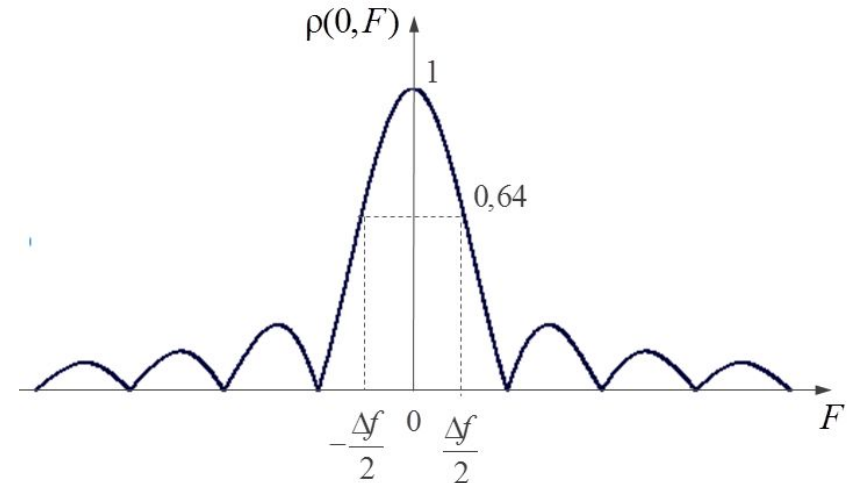
Тело неопределенности (ТН)



Сечение ТН во временной области



Сечение ТН в частотной области



# Прямоугольный радиоимпульс

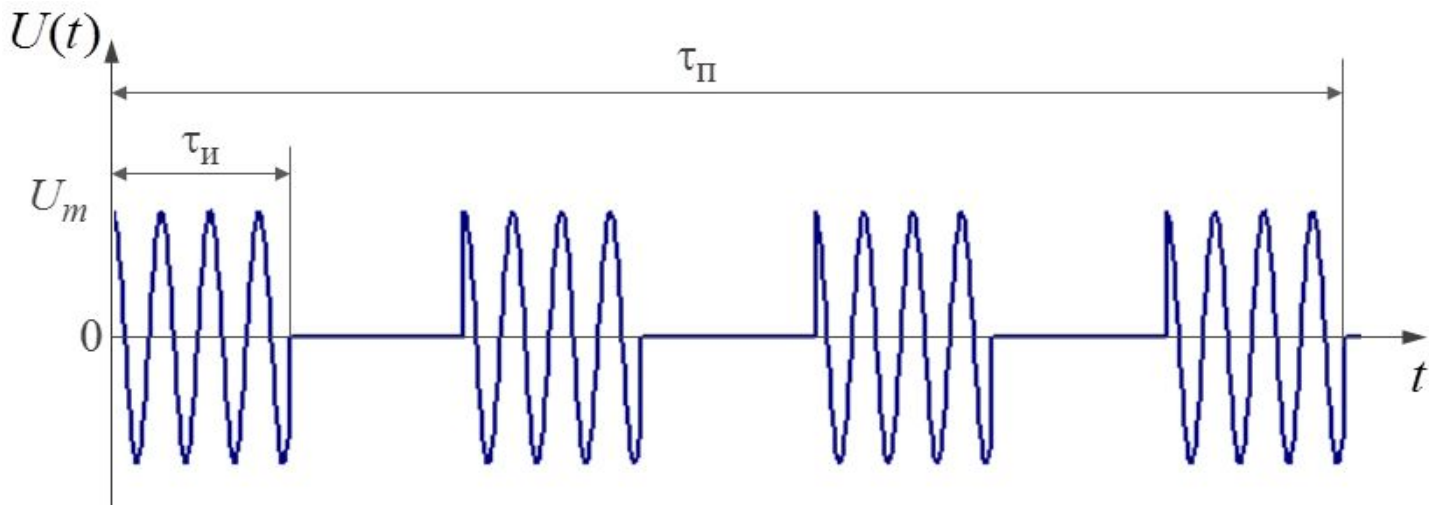
**Преимущества:** простота генерации и обработки.

**Недостатки:** невозможность обеспечить одновременно хорошее разрешение по дальности (для чего требуется импульс малой длительности) и большую энергию сигнала (для чего требуется импульс большой длительности).

# Пачка прямоугольных радиоимпульсов

**Пачка прямоугольных радиоимпульсов (ПРИ)** представляет собой сигнал, длительностью  $\tau_{\Pi}$ , состоящий из  $M$  прямоугольных радиоимпульсов, следующих с периодом повторения  $T_{\Pi}$ :

$$U(t) = \begin{cases} \sum_{m=0}^{M-1} U_{\Pi}(t - mT_{\Pi}), & 0 \leq t \leq \tau_{\Pi} \\ 0, & \text{при } t > \tau_{\Pi} \end{cases}$$





# Пачка прямоугольных радиоимпульсов

## Частотный спектр ППРИ:

$$S(\omega) = S_{\Pi}(\omega) \cdot \frac{\sin \frac{m\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}} = \tau \frac{\sin \frac{\omega\tau_{\Pi}}{2}}{\frac{\omega\tau_{\Pi}}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{m\omega T}{2}}{\frac{\omega T}{2}}$$

## Ширина спектра ППРИ:

$$\Delta f = 1/\tau_{\Pi}$$

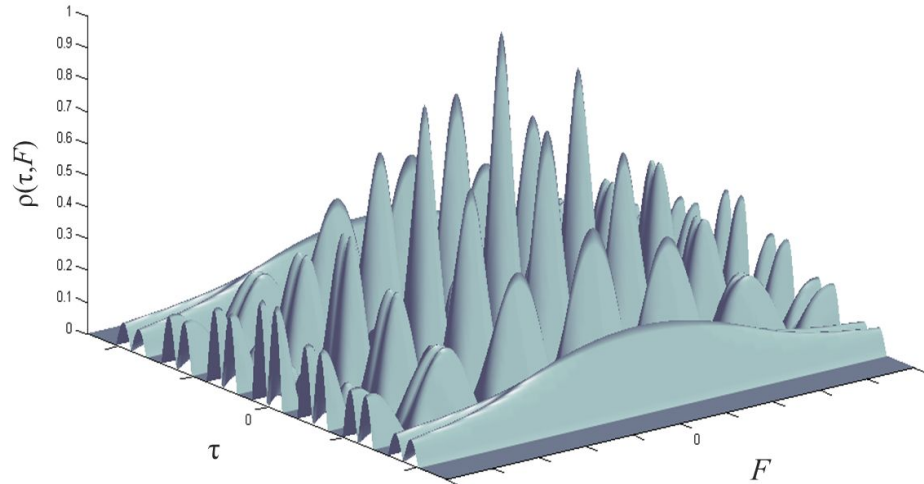
## Функция неопределенности ППРИ:

$$\rho(\tau, F) = \left| \sum_{m=-(M-1)}^{M-1} \frac{\sin(\pi F T_{\Pi} (M - |m|))}{M \sin(\pi F T_{\Pi})} \cdot \rho_{\Pi}(\tau - mT, F) \cdot e^{-j2\pi m F T_{\Pi}} \right|$$

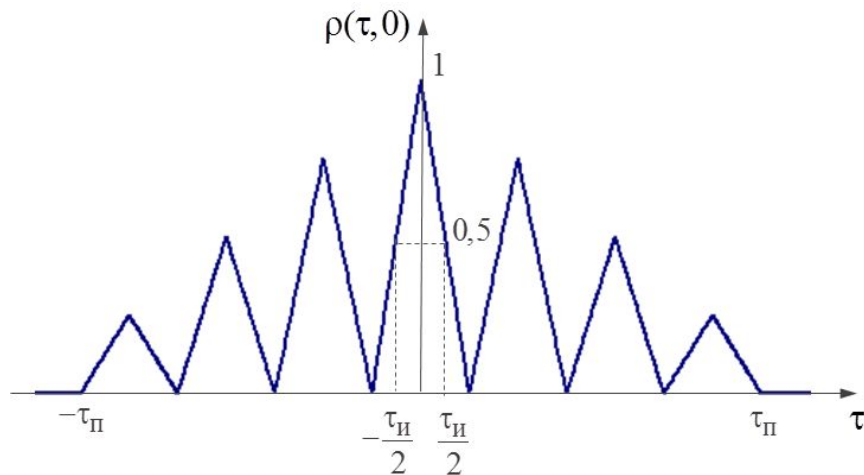
$\rho_1(\tau, F)$  – функция неопределенности одного ПРИ, входящего в ППРИ

# Тело неопределенности ППРИ ( $M=4$ )

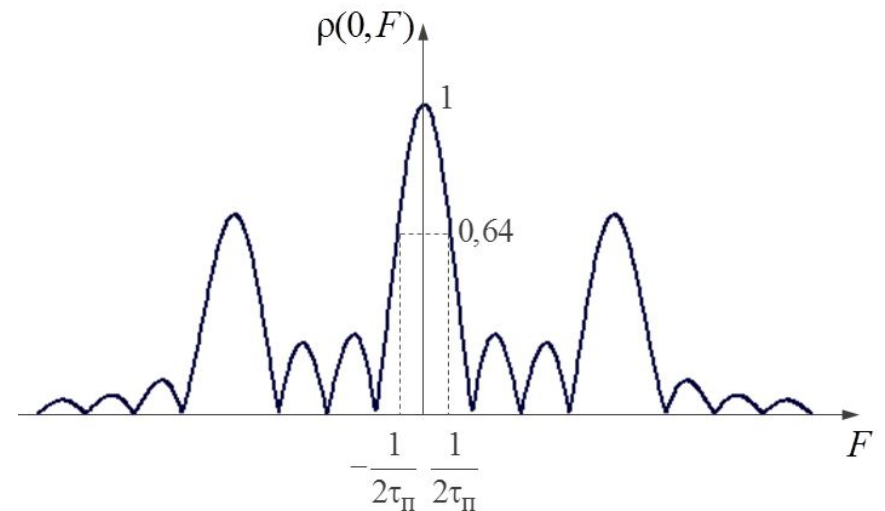
## Тело неопределенности (ТН)



## Сечение ТН во временной области



## Сечение ТН в частотной области



## Пачка прямоугольных радиоимпульсов

**Преимущества:** пачечные сигналы обеспечивают существенно более высокую разрешающую способность по частоте (радиальной скорости).

**Недостатки:** в силу периодического характера проявляется неоднозначность измерений времени запаздывания (дальности) и частоты (радиальной скорости).

# Радиоимпульс с линейной частотной модуляцией

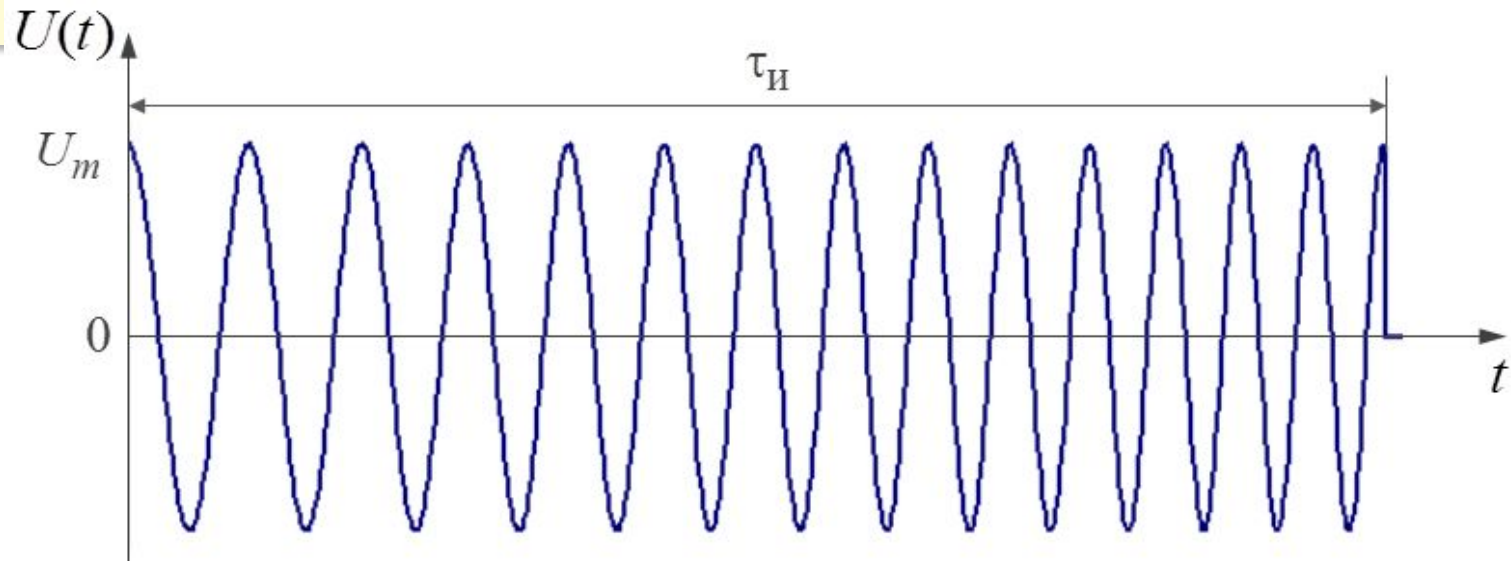
ЛЧМ РИ с прямоугольной огибающей описывается выражением:

(ЛЧМ РИ) называется радиоимпульс, частота которого изменяется по

$$U(t) = \begin{cases} U_m \cos \left( 2\pi t \left( f_H + \frac{k_{сж} t}{\tau_{И}} \right) \right), & \leq |t| \leq \tau_{И} \\ 0, & \text{при } |t| > \tau_{И} \end{cases}$$

$f(t) = f_H + \frac{k_{сж} t}{\tau_{И}}$

Ширине спектра (длина частоты) ЛЧМ РИ.



# Тело неопределенности ЛЧМ РИ

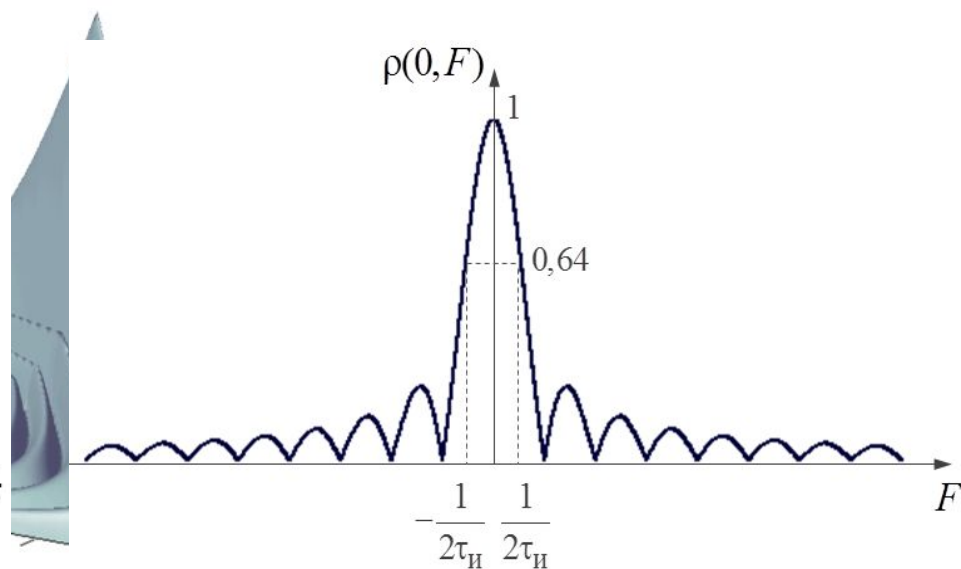
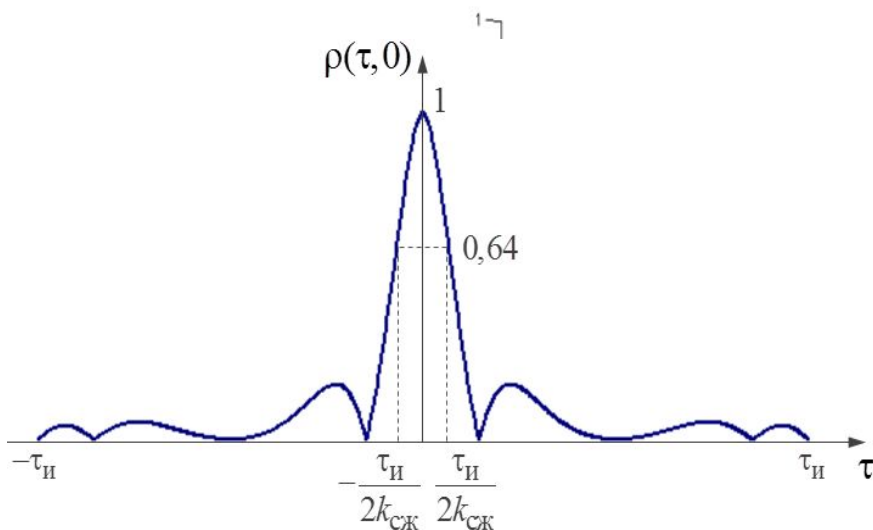
## Функция неопределенности

$$\rho(\tau, F) = \left| \frac{\sin \left( \pi \left( \frac{k_{\text{сж}} \tau}{\tau_{\text{И}}} + F \tau_{\text{И}}} \right) \right) \left( 1 - \frac{|\tau|}{\tau_{\text{И}}} \right)}{\pi \left( \frac{k_{\text{сж}} \tau}{\tau_{\text{И}}} + F \tau_{\text{И}}} \right)} \right|$$

## Тело неопределенности

Сечение ТН во временной области

Сечение ТН в частотной области



## ЛЧМ РИ

**Преимущества:** в результате корреляционной обработки длительность ЛЧМ РИ уменьшается, что позволяет повысить точность измерений и разрешать близко расположенные объекты.

**Недостатки:** сложность формирования сигналов большой длительности.

## Радиоимпульс с фазокодовой манипуляцией

**Радиоимпульс с фазокодовой манипуляцией (ФКМ РИ) – это совокупность  $N_d$  сомкнутых прямоугольных радиоимпульсов (дискрет) одинаковой длительности и частоты при ограниченном числе  $p$  различающихся возможных значений начальной фазы сигнала.**

При  $p = 2$ , фазовая манипуляция называется бинарной фазовой манипуляцией. Фаза такого сигнала изменяется, попеременно принимая значения  $0^0$  или  $180^0$ , в соответствии с чередованием элементов бинарного кода  $1$  и  $-1$ .

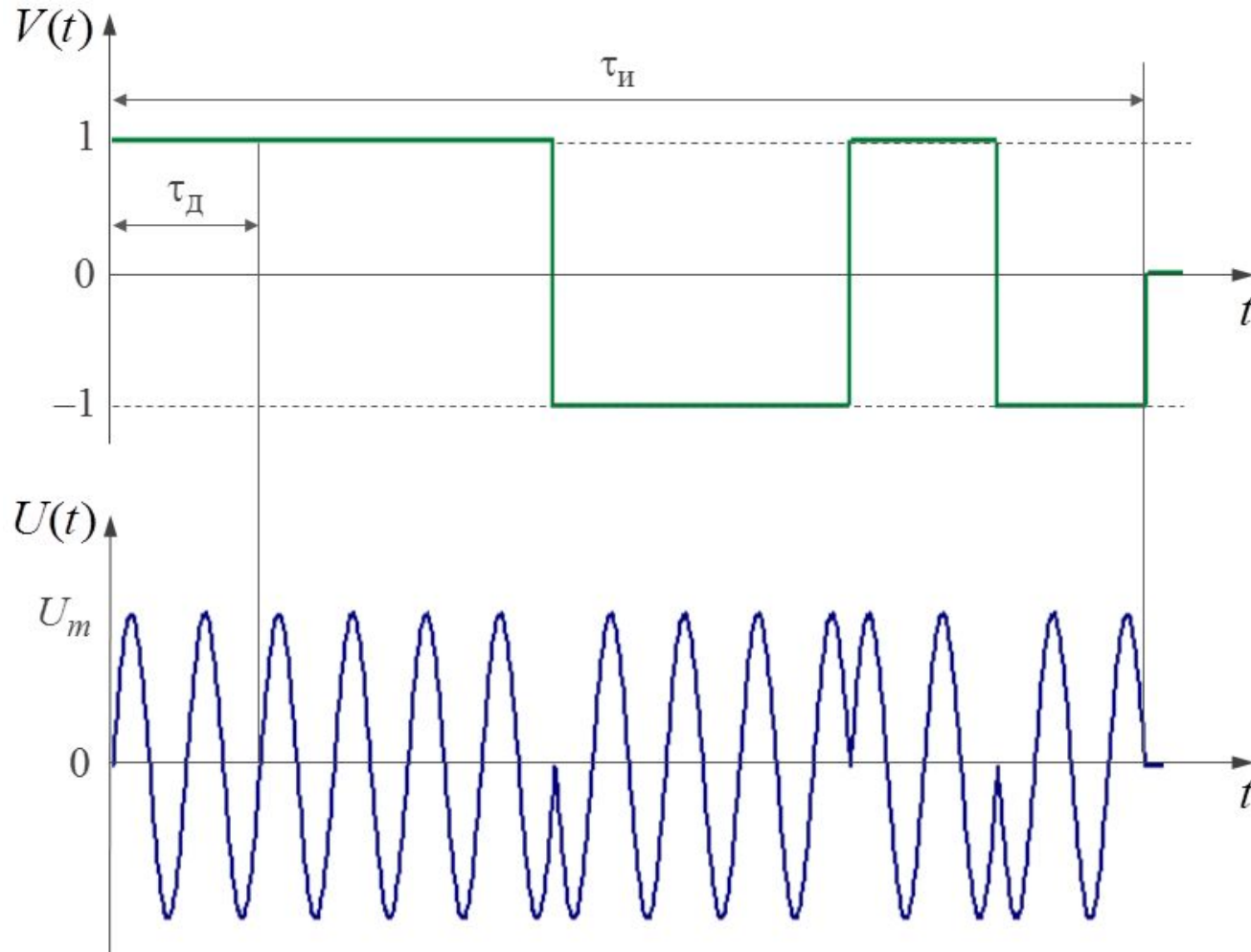
**Ширина спектра ФКМ РИ:**

$$\Delta f = \frac{1}{\tau_d}$$

где  $\tau_d$  – длительность дискрета

# Радиоимпульс с фазокодовой манипуляцией

## ФКМ РИ, кодированный 7-значным кодом Баркера





# Радиоимпульс с фазокодовой манипуляцией

Огибающая одного дискрета кода:

$$V_1(t) = \begin{cases} U_m \text{ при } 0 \leq t \leq \tau_D \\ 0 \text{ при } t > \tau_D \end{cases}$$

Огибающая кода:

$$V(t) = \sum_{k=0}^{N_D-1} q_k V_1(t - k\tau)$$

где  $q_k$  – код фазовой манипуляции (например:  $q_k = [111-1-11-1]^T$ )

Временное представление сигнала:

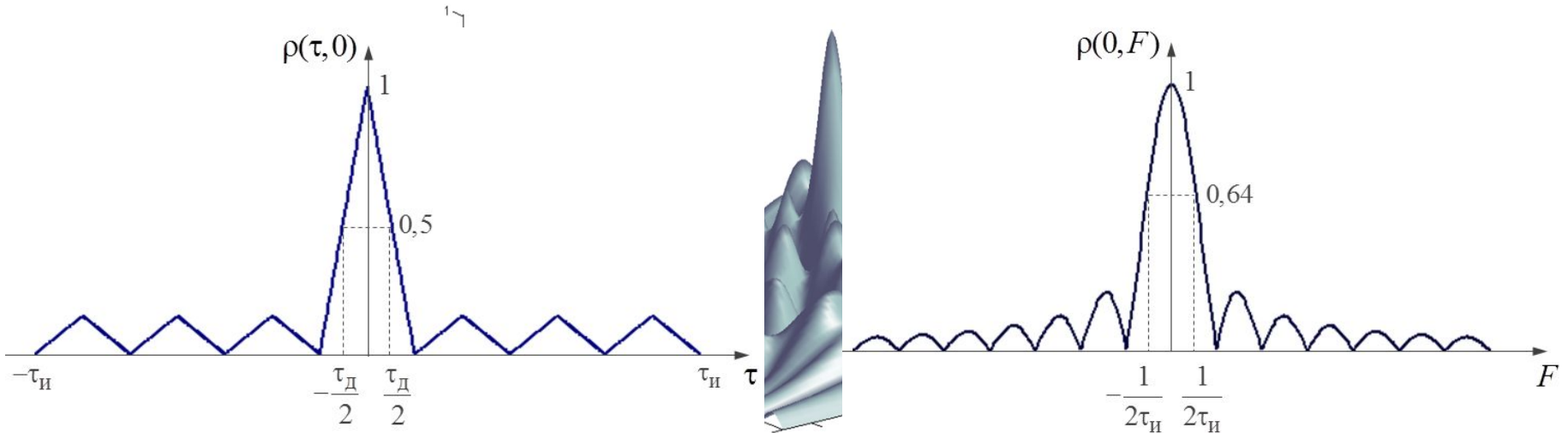
$$U(t) = \sum_{k=0}^{N_D-1} q_k V_1(t - k\tau) \sin(2\pi f t)$$

# Функция неопределенности ФКМ РИ

$$\rho(\tau, F) = \left| \frac{1}{N_d} \cdot \sum_{k=0}^{N_d-1} \sum_{m=0}^{N_d-1} q_k q_m \rho_d(\tau - (k - m)\tau_d, F) \cdot e^{j2\pi Fk\tau_d} \right|$$

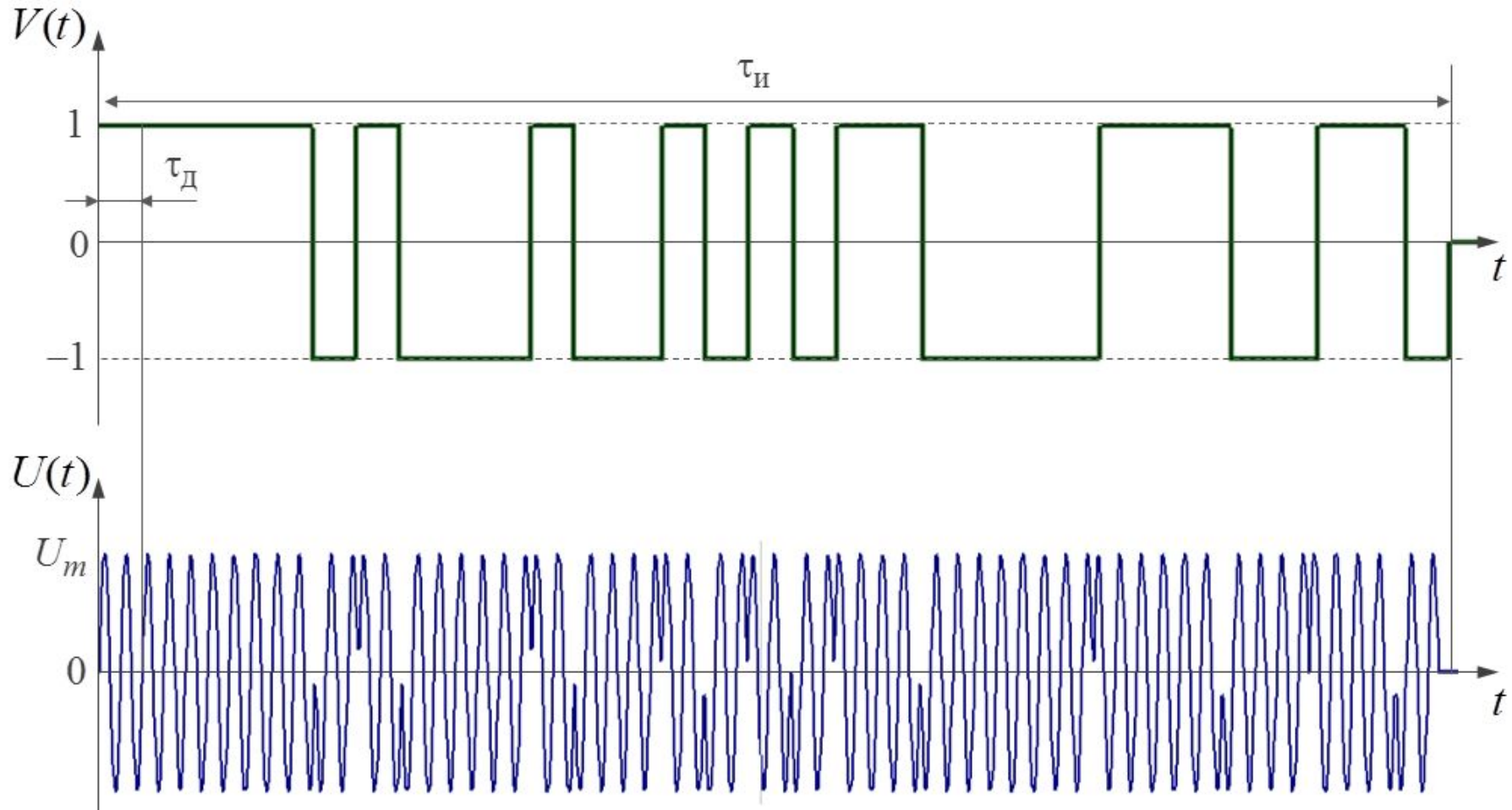
$$\rho_d(\tau, F) = \begin{cases} \left| \frac{\sin(\pi F(\tau_d - |\tau|))}{\pi F \tau_d} \right| & \text{при } |\tau| \leq \tau_d \\ 0 & \text{при } |\tau| > \tau_d \end{cases} \quad \text{— функция неопределенности одного дискрета ФКМ РИ}$$

Сечение ТН во временной области неопределенности Сечение ТН в частотной области



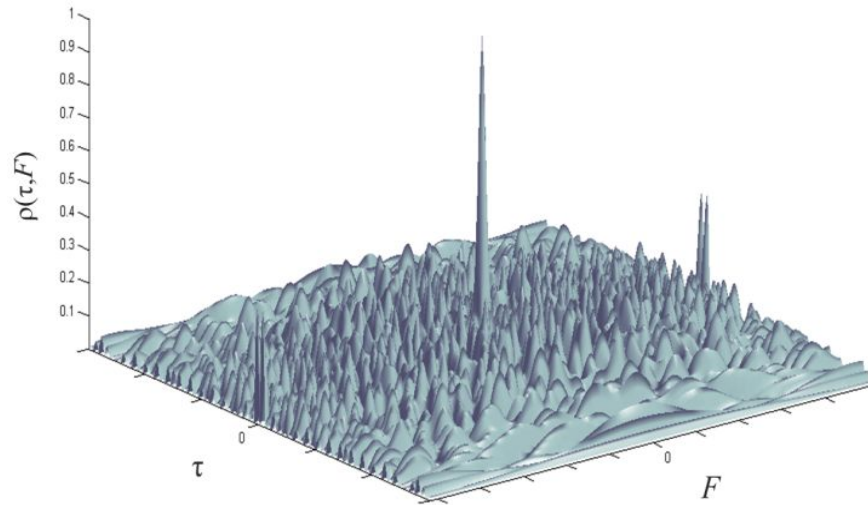
# ФКМ РИ, кодированные M-последовательностями

## ФКМ РИ, кодированный 31-значной M-последовательностью

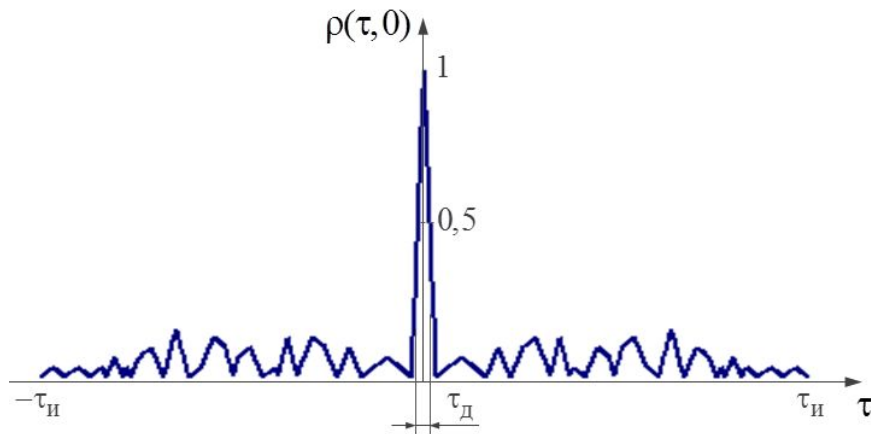


# Тело неопределенности ФКМ РИ (31-значная M-последовательность)

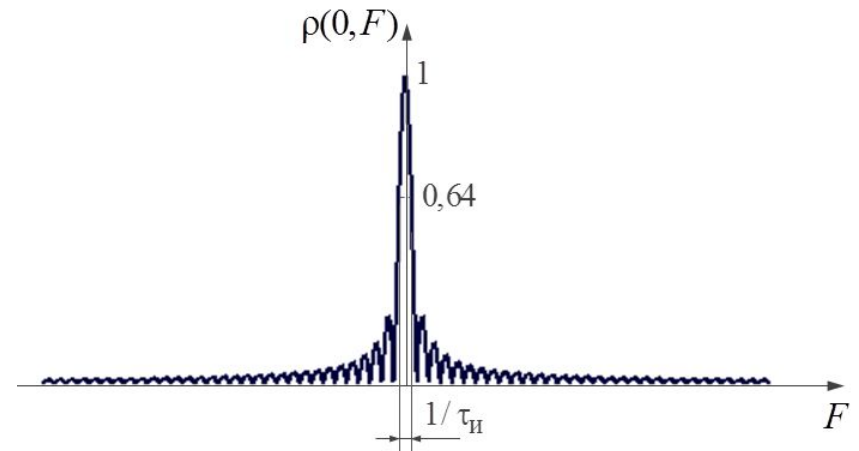
## Тело неопределенности



## Сечение ТН во временной области



## Сечение ТН в частотной области



## ФКМ РИ

**Преимущества:** энергоемкость и высокая разрешающая способность одновременно по времени и по частоте (дальности и скорости).

**Недостатки:** сложность формирования сигналов большой длительности.

## **Вопрос 3**

**Оптимальное обнаружение сигналов и  
измерение их параметров**

**В результате процесса обнаружения должно быть выдано решение о наличии или отсутствии цели в произвольном разрешаемом объеме зоны действия РЛС.**

**Решение может быть принято при двух взаимно исключающих **условиях**:**

- **условие  $A_1$  – «цель есть»,**
- **условие  $A_0$  – «цели нет»,**

**которые при выработке решения неизвестны.**

**За счет помех и флюктуаций полезного сигнала каждому условию могут соответствовать два вида **решений**:**

- **решение  $A_1^*$  – «цель есть»,**
- **решение  $A_0^*$  – «цели нет».**

**Третьего решения – «не знаю» – после завершения процесса обнаружения быть не должно.**

При обнаружении возможны четыре ситуации совмещения случайных событий «решения» и «условия»:

- 1) ситуация  $A_1^* A_1$  – «правильное обнаружение»;
- 2) ситуация  $A_0^* A_1$  – «пропуск цели»;
- 3) ситуация  $A_1^* A_0$  – «ложная тревога»;
- 4) ситуация  $A_0^* A_0$  – «правильное необнаружение».

Перечисленным ситуациям соответствуют четыре вероятности совмещения событий, сумма которых равна единице:

$$P(A_1^* A_1) + P(A_0^* A_1) + P(A_1^* A_0) + P(A_0^* A_0) = 1$$



Если каждому ошибочному решению поставить в соответствие некоторую плату – стоимость ошибки  $r_{ik}$  ( $i = 0, 1; k = 0, 1$ ), и для безошибочных решений условиться считать эту стоимость равной нулю  $r_{11} = r_{00} = 0$ , то систему обнаружения можно характеризовать **средней стоимостью (математическим ожиданием стоимости) ошибочных решений**:

$$M(r) = \bar{r} = r_{01}P(A_0^* A_1) + r_{10}P(A_1^* A_0)$$

Лучшей из сравниваемых систем обработки можно тогда считать систему, удовлетворяющую критерию минимума этой стоимости, иначе – критерию минимума среднего риска.

**Критерий минимума среднего риска** основан на введении неотрицательных стоимостей ущерба (штрафов)  $r_{ik}$  за неправильные решения ( $i \neq k$ ). За правильные решения штраф задается отрицательным (премия) или нулевым.

Качественными показателями обнаружения при условии отсутствия цели являются **условные вероятности ложной тревоги**:

$$D = P(A_1^* | A_0) = P(A_1^* A_0) / P(A_0)$$

**и правильного необнаружения**:

$$\bar{D} = P(A_0^* | A_0) = P(A_0^* A_0) / P(A_0)$$

Преобразуем выражение для среднего риска:

$$\bar{r} = r_{01}\bar{D}P(A_1) + r_{10}FP(A_0) = r_{01}P(A_1)(\bar{D} + l_0F)$$

где  $l_0$  – весовой множитель, равный:

$$l_0 = \frac{r_{10}P(A_0)}{r_{01}P(A_1)}$$

Критерий минимума среднего риска сводится, таким образом, к **весовому критерию**:

$$D - l_0F = \max$$

**Условные вероятности правильного обнаружения и ложной тревоги определяются выбором решающей функции и плотностями вероятностей реализаций сигнала и помехи («сп») и только одной помехи («п»):**

$$D = \int_{(V_y)} \hat{A}(y) p_{сп}(y) dV_y, \quad F = \int_{(V_y)} \hat{A}(y) p_{п}(y) dV_y$$

Объем  $V_y$  многомерного пространства  $y$  разбит на элементарные объемы  $dV_y$ . Произведения условных плотностей вероятности на эти объемы определяют элементарные вероятности попадания в них реализаций  $y$  при условиях «сп» или «п».

Отношение условных плотностей вероятностей как функций одной и той же принятой реализации  $y$  при условиях наличия сигнала и помехи и только помехи называется **отношением правдоподобия**:

$$l(y) = p_{\text{сп}}(y) / p_{\text{п}}(y)$$

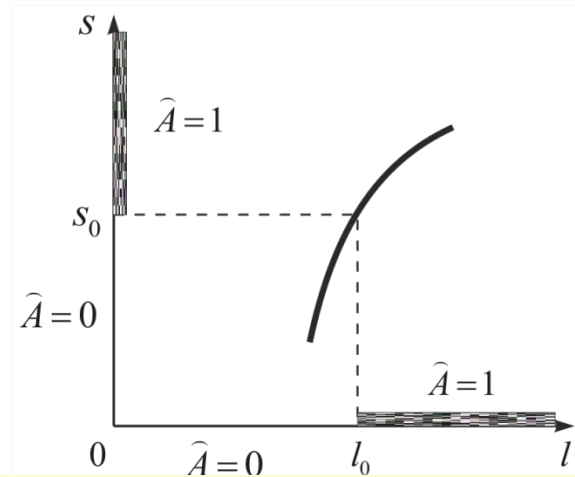
Отношение правдоподобия влияет на выбор оптимальной решающей функции. Большие значения  $l(y)$  характеризуют правдоподобность гипотезы о наличии сигнала.

### **Оптимальное решающее правило**

$$\hat{A}_{\text{опт}}(y) = \begin{cases} 1, & l(y) \geq l_0 \\ 0, & l(y) < l_0 \end{cases}$$

## Выбор оптимальной решающей функции

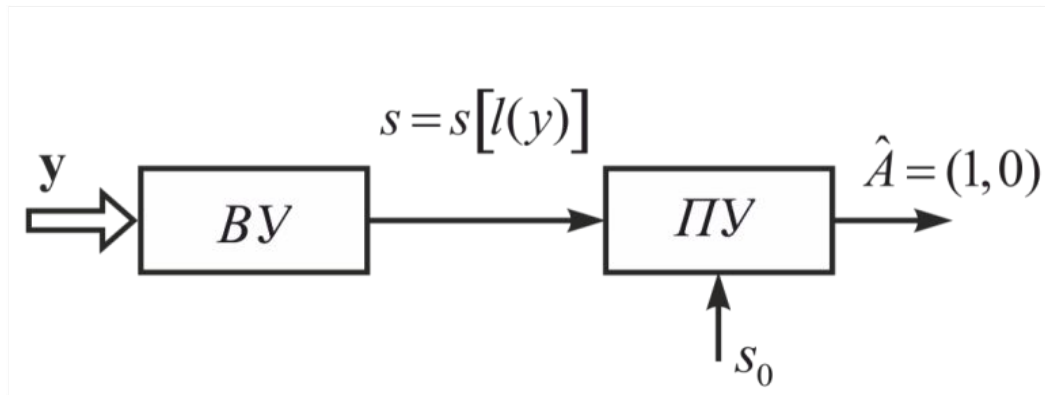
Наряду с отношениями правдоподобия  $l$  вводятся их монотонно нарастающие функции  $s(l)$ . Оптимизация обнаружения не нарушается, если решающая функция выбирается в результате сравнения функции  $s(l)$  со своим порогом  $s_0 = s(l_0)$ .



Функции  $s(l)$  несут информацию, достаточную для принятия оптимального решения. Их называют, поэтому **достаточными статистиками**.

Таким образом, алгоритмы оптимального обнаружения сводятся к вычислению отобранных из этих соображений достаточных статистик и сравнению их с порогом.

# Двухальтернативный оптимальный обнаружитель



## Критерий Неймана-Пирсона:

Оптимальный обнаружитель дает наименьшую вероятность пропуска среди всех обнаружителей, у которых условная вероятность ложной тревоги не больше, чем у оптимального.

Критерий Неймана-Пирсона используют для выбора порога по допустимому уровню условной вероятности ложной тревоги в элементе разрешения.

## Ошибки измерения параметров цели

Если в результате проведенного измерения должна быть дана оценка  $\alpha^*$  каждого измеряемого параметра  $\alpha$ , то показателем качества измерения является **статистически усредненная величина ошибки**  $\varepsilon = \alpha^* - \alpha$  измерения параметра. Чем меньше величина ошибки, тем выше качество измерения.

**Ошибки измерений** делятся на:

- грубые промахи;
- систематические ошибки;
- случайные ошибки.

Если приняты меры для исключения систематических ошибок и грубых промахов, ошибки измерений сводятся к **случайным**.



**Случайные ошибки** обусловлены действием помех на входе приемника РЛС, флюктуациями сигнала, а иногда случайным поведением самой системы измерений.

**Качественными показателями измерения** одномерной случайной величины являются:

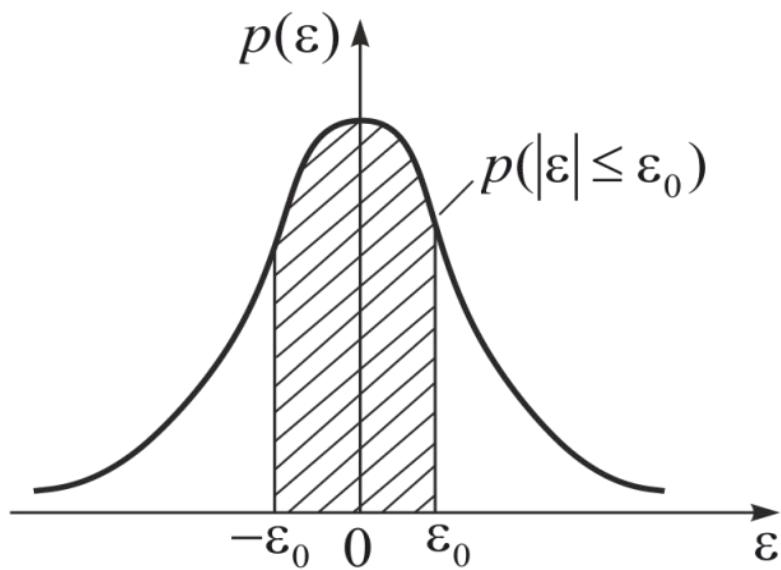
- **среднеквадратичная ошибка;**
- **вероятная (срединная) ошибка;**
- **максимальная ошибка;**
- **математическое ожидание;**
- **дисперсия и др.**

Для произвольного закона распределения случайных ошибок  $p(\varepsilon)$  **среднеквадратичная ошибка** измерения определяется из соотношения:

$$\varepsilon_{\text{СКВ}}^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \varepsilon^2 p(\varepsilon) d\varepsilon = \overline{\varepsilon^2}$$

В случае наиболее распространенного **центрированного нормального закона распределения случайных ошибок** среднеквадратичная ошибка полностью характеризует другие виды ошибок – вероятную и максимальную.

Центрированный нормальный закон распределения случайных ошибок

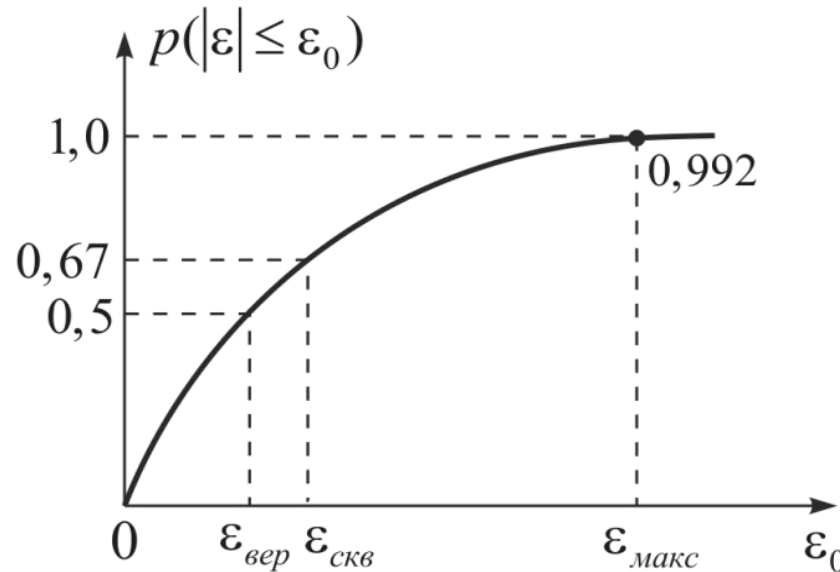


**Вероятная (срединная) ошибка  $\varepsilon_{\text{вер}}$**  соответствует такому значению  $\varepsilon_0 = \varepsilon_{\text{вер}}$ , при котором заштрихованная площадь составляет половину всей площади под кривой  $p(\varepsilon)$ :

$$P(|\varepsilon| \leq \varepsilon_{\text{вер}}) = P(|\varepsilon| \geq \varepsilon_{\text{вер}}) = 0,5$$

$$\varepsilon_{\text{вер}} \approx \frac{2}{3} \varepsilon_{\text{СКВ}}$$

# Ошибки измерения



В качестве **максимальной ошибки**  $\varepsilon_{\text{макс}}$  обычно принимают ошибку, вероятность превышения которой по модулю составляет **0,8%**.

Говорят, что интервал  $2\varepsilon_{\text{макс}} = 8\varepsilon_{\text{вер}}$  вокруг оценки является **доверительным**, причем вероятность выхода истинного значения величины за пределы доверительного интервала составляет в данном случае **0,8%**.

**Математическое ожидание ошибки  $M\{\varepsilon\}$  отлично от нуля, когда действует источник систематической ошибки. Оценку  $\alpha^*$  в этом случае называют **смещенной**.**

**Дисперсия ошибки определяется выражением:**

$$D\{\varepsilon\} = M\left\{\left[\varepsilon - M\{\varepsilon\}\right]^2\right\} = M\{\varepsilon^2\} - M^2\{\varepsilon\}$$

**В случае несмещенной оценки  $D\{\varepsilon\}$  совпадает со средним квадратом ошибки:**

$$D\{\varepsilon\} = M\{\varepsilon^2\} = \overline{\varepsilon^2} = \varepsilon_{\text{СКВ}}^2$$

В качестве обобщенного критерия качества измерения можно ввести **средний риск ошибки измерения**. Для этого рассмотрим совокупность ситуаций совмещения случайного значения параметра  $\alpha$  и случайной оценки  $\alpha^*$ .

Для каждой из ситуаций введем **совместную плотность вероятности**  $p(\alpha^*, \alpha)$  и **дифференциальную вероятность совмещения**:

$$dP(\alpha^*, \alpha) = p(\alpha^*, \alpha) d\alpha^* d\alpha$$

Каждой ситуации совмещения поставим в соответствие некоторую стоимость ошибки  $r(\alpha^*, \alpha)$  в зависимости от ее важности. Тогда критерием качества оценки  $\alpha^*$  является **средняя стоимость (средний риск) ошибки измерений**:

$$\overline{r(\alpha^*, \alpha)} = \int_{(\alpha^*, \alpha)} r(\alpha^*, \alpha) p(\alpha^*, \alpha) d\alpha^* d\alpha$$

Пусть на вход измерителя поступают колебания  $y(t)$  в виде наложения флюктуационной помехи и сигнала:

$$y(t) = n(t) + x(t, \alpha, \beta)$$

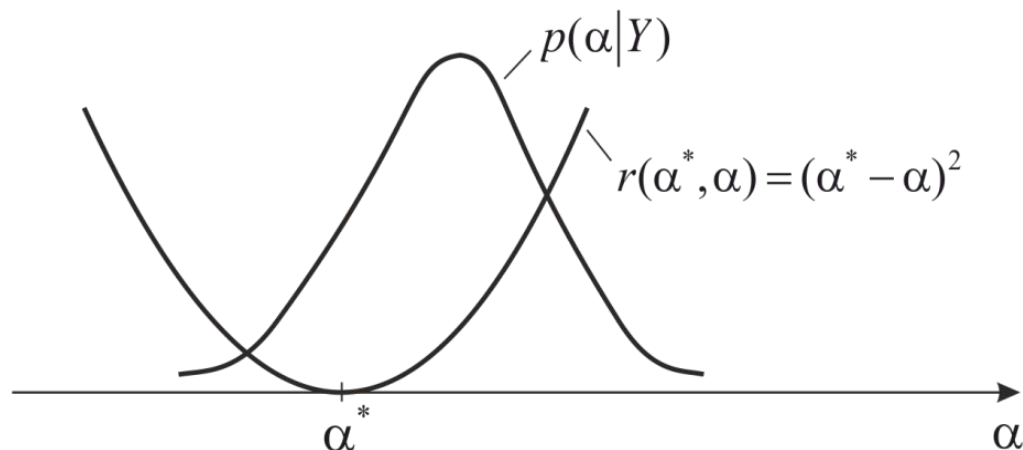
$x(t, \alpha, \beta)$  – известная функция времени случайного измеряемого параметра  $\alpha$  и случайных неизмеряемых параметров  $\beta$ , имеющих заданную плотность вероятности  $p(\beta)$ .

При решении задачи измерения наряду с непрерывными реализациями входных колебаний  $y(t)$  введем соответствующие **дискретные многомерные реализации  $Y$**  с целью более удобного использования соотношений теории вероятностей:

$$\overline{r(\alpha^*(Y))} = \int_{(Y)} p(Y) \overline{r[\alpha^*(Y)|Y]} dY$$

$\overline{r[\alpha^*(Y)|Y]}$  – условный средний риск ошибки измерений.

## Кривые для произвольно установленной оценки



$p(\alpha|Y)$  – кривая послеопытной плотности вероятности

$r(\alpha^*, \alpha) = (\alpha^* - \alpha)^2$  – кривая стоимости ошибки

Данные кривые иллюстрируют, что для неудачно выбранной оценки  $\alpha^*$  минимум  $\overline{r[\alpha^*(Y)|Y]}$  не достигается.

Оценка значительно отличается от оптимальной, поскольку наиболее вероятным значениям  $\alpha$  соответствует большая стоимость ошибки.

**Оптимальная по минимуму среднеквадратичной ошибки оценка  $\alpha_{\text{опт}}^*$**  представляет собой математическое ожидание измеряемого параметра, соответствующее кривой послеопытной плотности вероятности для принятой реализации  $Y$ :

$$\alpha_{\text{опт}}^*(Y) = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha p(\alpha|Y) d\alpha = M\{\alpha|Y\}$$

**Минимальный средний квадрат возможной ошибки** определяется дисперсией распределения послеопытной плотности вероятности для принятой реализации  $Y$ :

$$\overline{(\alpha - \alpha_{\text{опт}}^*)^2} = \overline{[\alpha - M\{\alpha|Y\}]^2} = D\{\alpha|Y\}$$



**Плотность вероятности совмещения случайных событий:**

$$p(Y|\alpha) = p(Y)p(\alpha|Y) = p(\alpha)(Y|\alpha)$$

**Послеопытная плотность вероятности параметра**

$$p(\alpha|Y) = \frac{1}{p(Y)} p(\alpha)(Y|\alpha)$$

## Аналог формулы полной вероятности

$$p(Y) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\alpha) p(Y|\alpha) d\alpha$$

## Аналог формулы Байеса

$$p(\alpha|Y) = \frac{p(\alpha) p(Y|\alpha)}{\int_{-\infty}^{\infty} p(\alpha) p(Y|\alpha) d\alpha}$$

## **Вопрос 4**

**Расчет характеристик радиолокационного  
обзора**

## Радиолокационный обзор

Под **радиолокационным обзором** понимают поэлементное облучение зоны обзора РЛС для выявления имеющихся в зоне целей и измерения их координат и параметров движения.

Обзор по угловым координатам производится перемещением ДН антенны РЛС по такому закону, чтобы за один цикл облучить всю зону. Длительность этого цикла называется **периодом обзора**  $T_{\text{обз}}$ .

**Периодом облучения**  $T_{\text{обл}}$  точечной цели называется время, протекающее с момента начала излучения радиоволн в направлении данной цели до конца приема отраженного сигнала от этой цели:

$$T_{\text{обл}} = N_{\text{с}} T_{\text{п}}$$

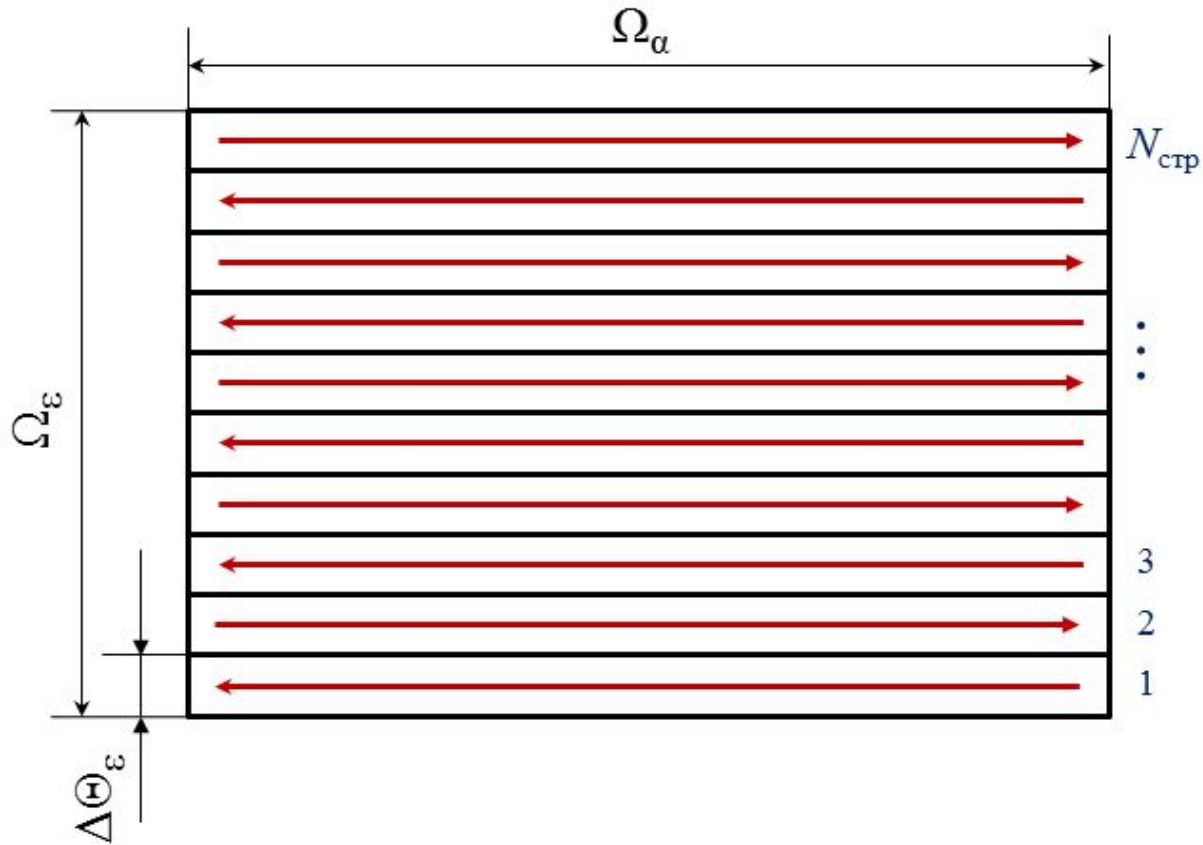
## Методы радиолокационного обзора

**Параллельный обзор** одним неподвижным лучом ДН ФАР применяют в РЛС, измеряющих только дальность и, следовательно, не нуждающихся в сканировании луча, например, в самолетных радиовысотомерах и дальномерам.

Однолучевой обзор со сканированием называют **последовательным**, так как он требует последовательного облучения всех элементов зоны.

## Построчный радиолокационный обзор

Последовательный обзор, при котором луч ДН передвигается по горизонтальным строкам зоны обзора с периодическим изменением угла места называют **построчным**.



## Радиолокационный обзор

**Количество элементов обзора в одной строке зоны обзора можно рассчитать как:**

$$N_{\text{эл зо}} = \Omega_{\alpha} / \Delta\Theta_{\alpha}$$

**Период обзора одной строки зоны обзора РЛС равен произведению количества элементов обзора и периода облучения каждого из них:**

$$T_{\text{обз стр}} = N_{\text{эл зо}} \cdot T_{\text{обл}} = N_{\text{эл зо}} \cdot N_{\text{с}} \cdot T_{\text{п}}$$

**Период обзора всей зоны обзора моноимпульсной РЛС ( $N_{\text{с}}=1$ ) рассчитывается как:**

$$T_{\text{обз}} = N_{\text{стр}} \cdot T_{\text{обз стр}}$$

## **Задание на самостоятельную подготовку**

- 1. Отработать материал занятия с использованием рекомендуемой литературы.**
- 2. Подготовиться к следующему занятию.**
- 3. Быть готовым к контрольному опросу по изученному материалу.**



## Литература

- 1. Чепурнов И.А., Серов С.А., Воротнюк Ю.С. Военно-техническая подготовка. Введение в специальность. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012.**
- 2. Федоров И.Б. Информационные технологии в радиотехнических системах. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011.**
- 3. Леонов А.И., Леонов С.А., Нагулинко Ф.В. Испытания РЛС. Оценка характеристик. – М.: Радио и связь, 1990.**

A view of Earth from space, showing the curvature of the planet and the atmosphere. A bright light source, likely the sun, is visible at the top, casting a beam of light down to the surface. The text "Спасибо за внимание!" is overlaid in the center.

**Спасибо за внимание!**