

## Общесистемные понятия и определения

**Радиотехнические системы** (РТС) – сложные системы, представляющие собой совокупность устройств, предназначенных для передачи, извлечения, обработки и накопления информации с использованием **радиоволн**.

Основные показатели РТС: Назначение, точность, разрешающая способность, дальность действия, помехоустойчивость, диапазон частот, ЭМС, скрытность, устойчивость к внешним воздействиям, стоимость, Г/М/В, функциональная надежность, перспективность.

РТС локации (РЛС), навигации (РНС) и радиоэлектронной борьбы (РЭБ) относятся к радиотехническим системам извлечения и преобразования информации с использованием методов местоопределения положения объектов в пространстве. К РТС относят также радиотехнические системы передачи информации и радиотехнические системы управления.

---

## РЛС И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

**Локация** (location происходит от латинского locatio - размещение) — определение размещения, местоположения предмета, точки в пространстве.

По способу локации различают РЛС активные (с пассивным или активным ответом), полуактивные и пассивные.

**АКТИВНАЯ РЛС.** Принцип ее действия основан на излучении в направлении на объект прямого (первичного) радиолокационного сигнала и приеме возникающего вследствие этого обратного (вторичного) сигнала от объекта. По способу получения обратного сигнала активные РЛС подразделяются на:

**РЛС С ПАССИВНЫМ ОТВЕТОМ,** в которых обратный сигнал образуется вследствие отражения электромагнитной энергии от объекта;

**РЛС С АКТИВНЫМ ОТВЕТОМ,** в которых обратный сигнал образуется в результате ретрансляции (переизлучения) прямого сигнала на объекте локации.

**ПОЛУАКТИВНАЯ РЛС.** Принцип ее действия основан на излучении зондирующих сигналов из одной точки пространства, а приеме отраженных сигналов в другой точке пространства.

**ПАССИВНАЯ РЛС** не имеет передающего устройства и в качестве информационного сигнала использует естественное излучение объектов.

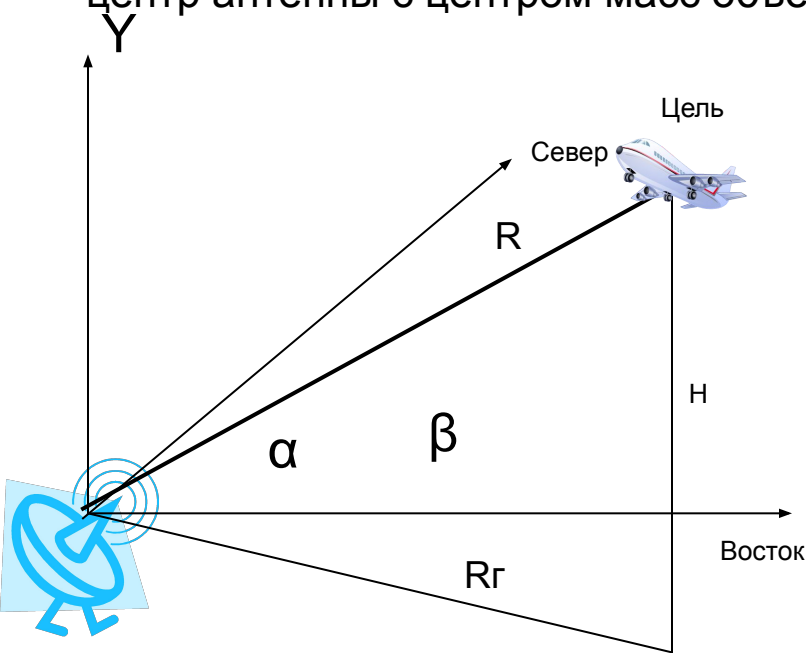
РЛС также классифицируются диапазоны волн, виду сигналов, числу каналов обработки информации, количеству измеряемых координат, способу измерения и отображения координат, функциональному назначению и другим характеристикам.

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ В РТС

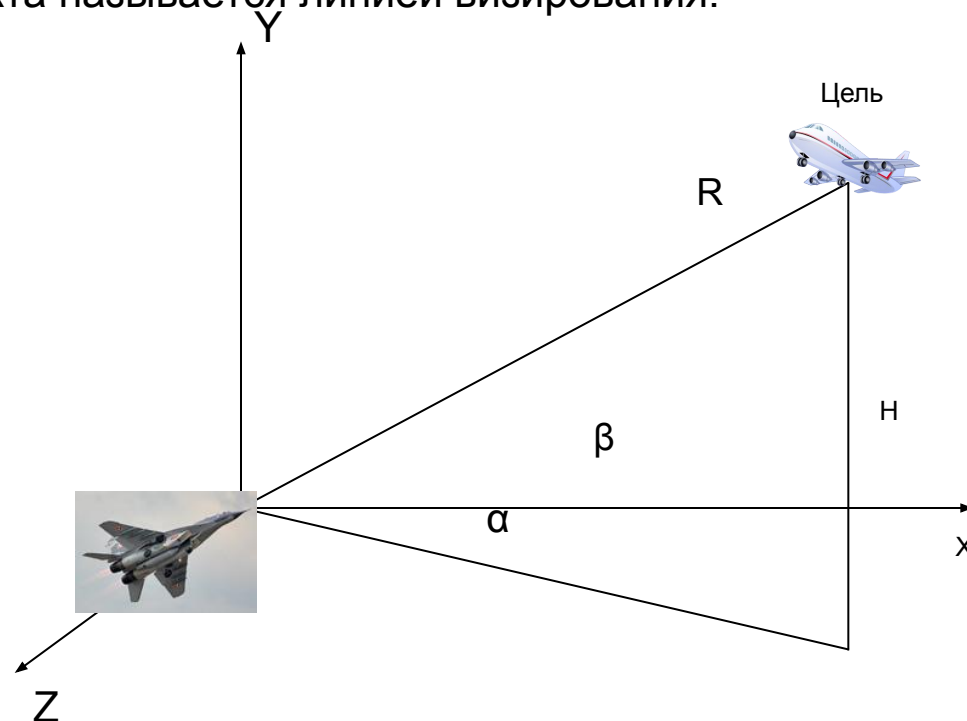
Системы координат. Местоположение объекта определяется положением центра масс в некоторой выбранной заранее системе координат.

**Местная система координат** с началом в т. расположения фазового центра антенны РЛС. Применяется при расстояниях  $R$  несколько сотен км.

На рис. наклонная дальность  $R$  (горизонтальная дальность  $R_r$ , высота  $H$ , азимут  $\alpha$ , угол места  $\beta$ ) образуют сферическую систему координат. Прямая соединяющая фазовый центр антенны с центром масс объекта называется линией визирования.



Наземная РЛС



Бортовая РЛС

Система координат — комплекс определений, реализующий метод координат, то есть способ определять положение и перемещение точки или тела с помощью чисел или других символов. Совокупность чисел, определяющих положение конкретной точки, называется координатами этой точки.

В математике координаты — совокупность чисел, сопоставленных точкам многообразия в некоторой карте определённого атласа.

В элементарной геометрии координаты — величины, определяющие положение точки на плоскости и в пространстве. На плоскости положение точки чаще всего определяется расстояниями от двух прямых (координатных осей), пересекающихся в одной точке (начале координат) под прямым углом; одна из координат называется ординатой, а другая — абсциссой. В пространстве по системе Декарта положение точки определяется расстояниями от трёх плоскостей координат, пересекающихся в одной точке под прямыми углами друг к другу, или сферическими координатами, где начало координат находится в центре сферы.

В географии координаты выбираются как (приблизённо) сферическая система координат — широта, долгота и высота над известным общим уровнем (например, океана).

В астрономии небесные координаты — упорядоченная пара угловых величин (например, прямое восхождение и склонение), с помощью которых определяют положение светил и вспомогательных точек на небесной сфере. В астрономии употребляют различные системы небесных координат, каждая из которых представляет собой сферическую систему координат (без радиальной координаты) с соответствующим образом выбранной фундаментальной плоскостью и началом отсчёта. В зависимости от выбора фундаментальной плоскости система небесных координат называется горизонтальной (относительно плоскости горизонта), экваториальной (плоскость экватора), эклиптической (плоскость эклиптики) или галактической (галактическая плоскость).

Наиболее используемая система координат — прямоугольная система координат (также известная как декартова система координат).

Координаты на плоскости и в пространстве можно вводить бесконечным числом разных способов.

Решая ту или иную математическую или физическую задачу методом координат, можно использовать ~~различные координатные системы, выбирая ту из них, в которой задача решается проще или удобнее~~ в данном конкретном случае. Известным обобщением системы координат являются системы отсчёта и системы референции.

## Сферическая система координат

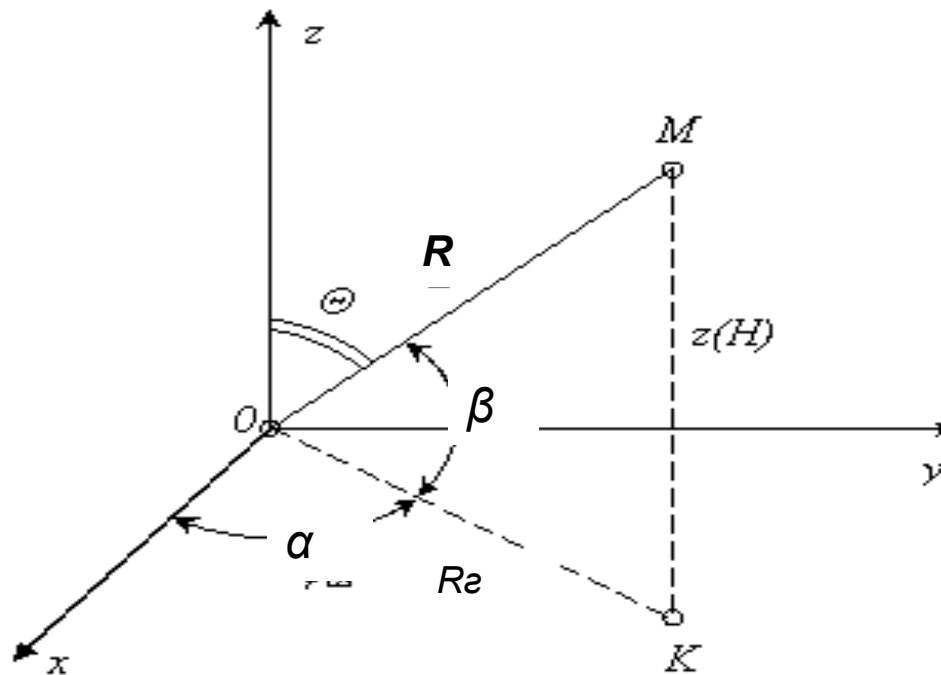
Сферическими координатами объекта наблюдения (объект находится в точке  $M$ ) являются:

$R$  – радиус-вектор (дальность);

$\alpha$  – азимут;

$\beta$  – угол места, дополняющий полярное расстояние  $q$  до  $90^\circ$ .

В цилиндрической системе положение объекта определяется аппликатой  $z$  (или высотой  $H$ ) и полярными координатами  $\alpha$  и  $\beta$  (горизонтальная или наклонная дальность  $R_r$ ) проекции точки  $M$  на плоскость  $xOy$ .



**Глобальные системы координат** (широта и долгота, высота) применяют в глобальных РТС (в частности для спутниковых РНС).

## **РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ**

Они решают часть задачи местоопределения объектов, т.е. определяют наклонную дальность. Вводятся условия прямолинейности и постоянства скорости распространения радиоволн.

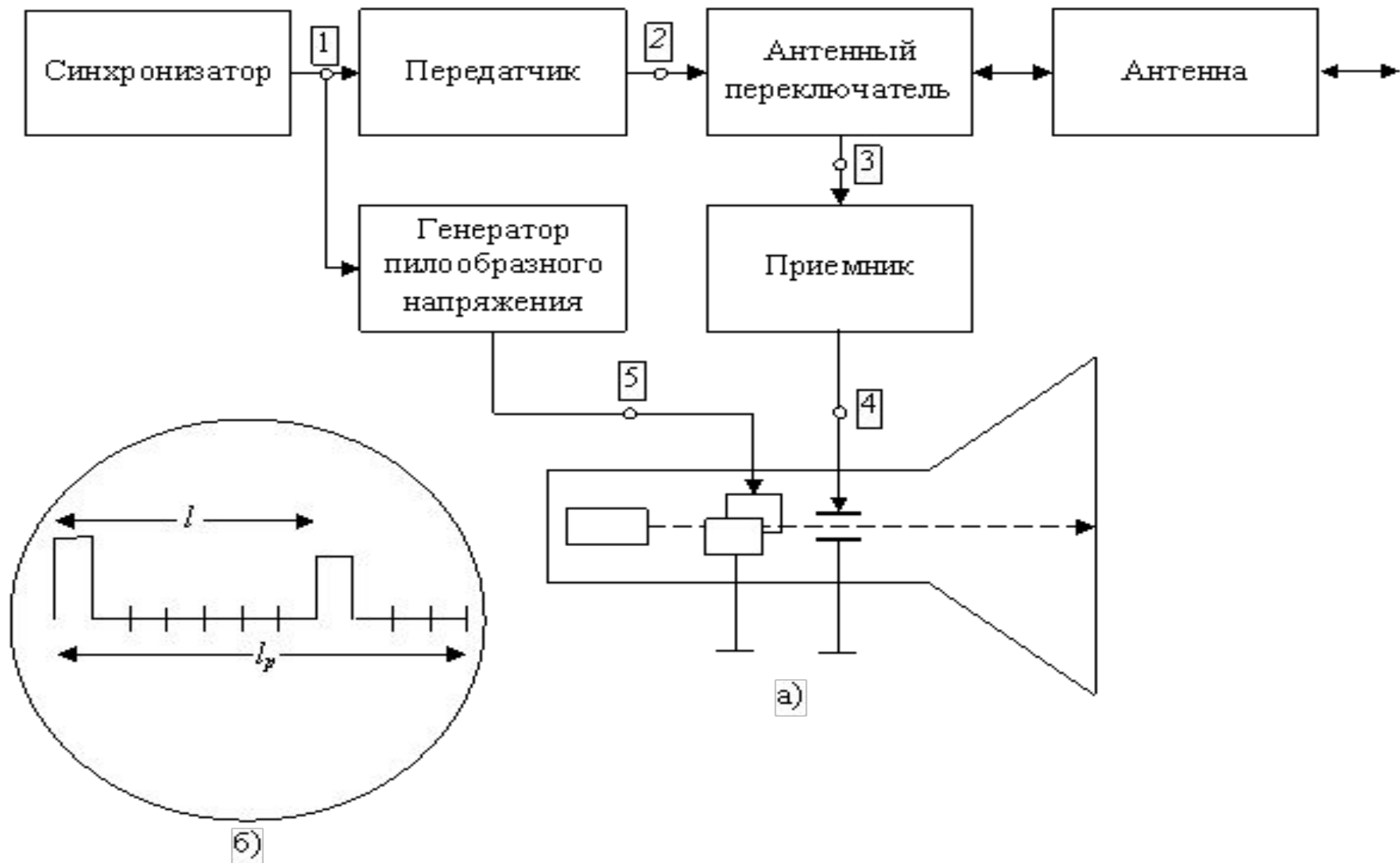
Все основные методы **РАДИОДАЛЬНОМЕТРИИ** основаны на явлении запаздывания электромагнитных волн при их распространении в пространстве и измерении параметра, зависящего от запаздывания. В зависимости от измеряемого параметра различают импульсный, частотный и фазовый методы дальнометрии. Необходимо различать термины энергетическая и однозначно определяемая дальность.

### **Импульсный (амплитудный) метод измерения дальности.**

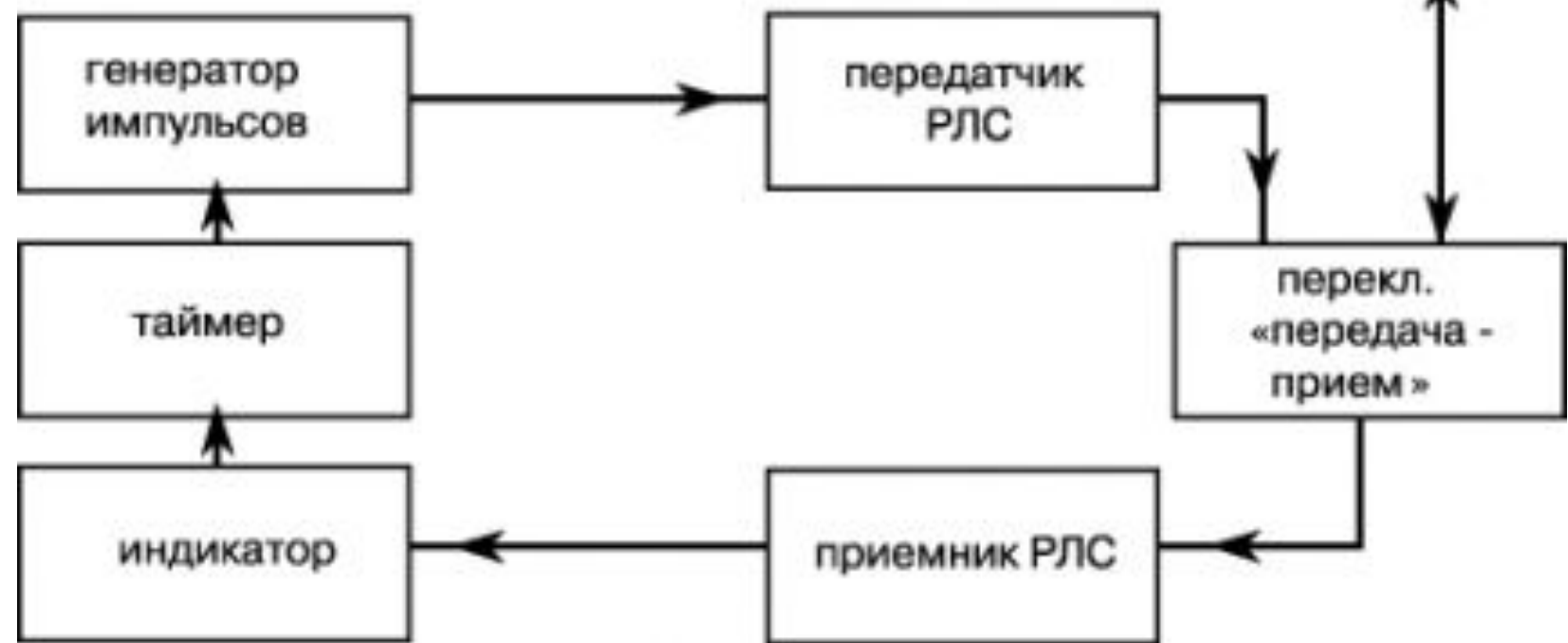
При амплитудном методе измерения определяется время запаздывания характерного изменения амплитуды принимаемого радиолокационного сигнала. Из различных видов модуляции излучаемых колебаний наиболее употребительной является импульсная.

Передатчик станции генерирует радиоимпульсы длительностью  $\tau_u$  с периодом повторения  $T_{\Pi}$ . Антенный переключатель (АП) подсоединяет антенну к передатчику на время генерации импульса и к приёмнику на всё остальное время. Отражённые импульсные сигналы запаздывают на время  $t_3$ ; на вход приёмника поступают и колебания передатчика и отражённые сигналы.

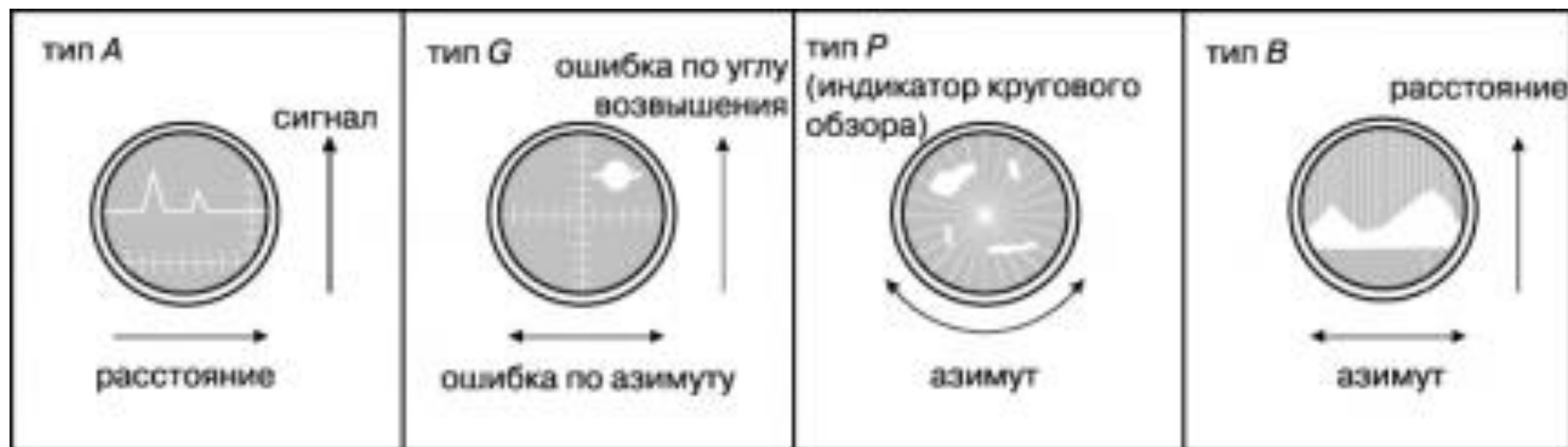
---



Функциональная схема импульсного измерителя дальности





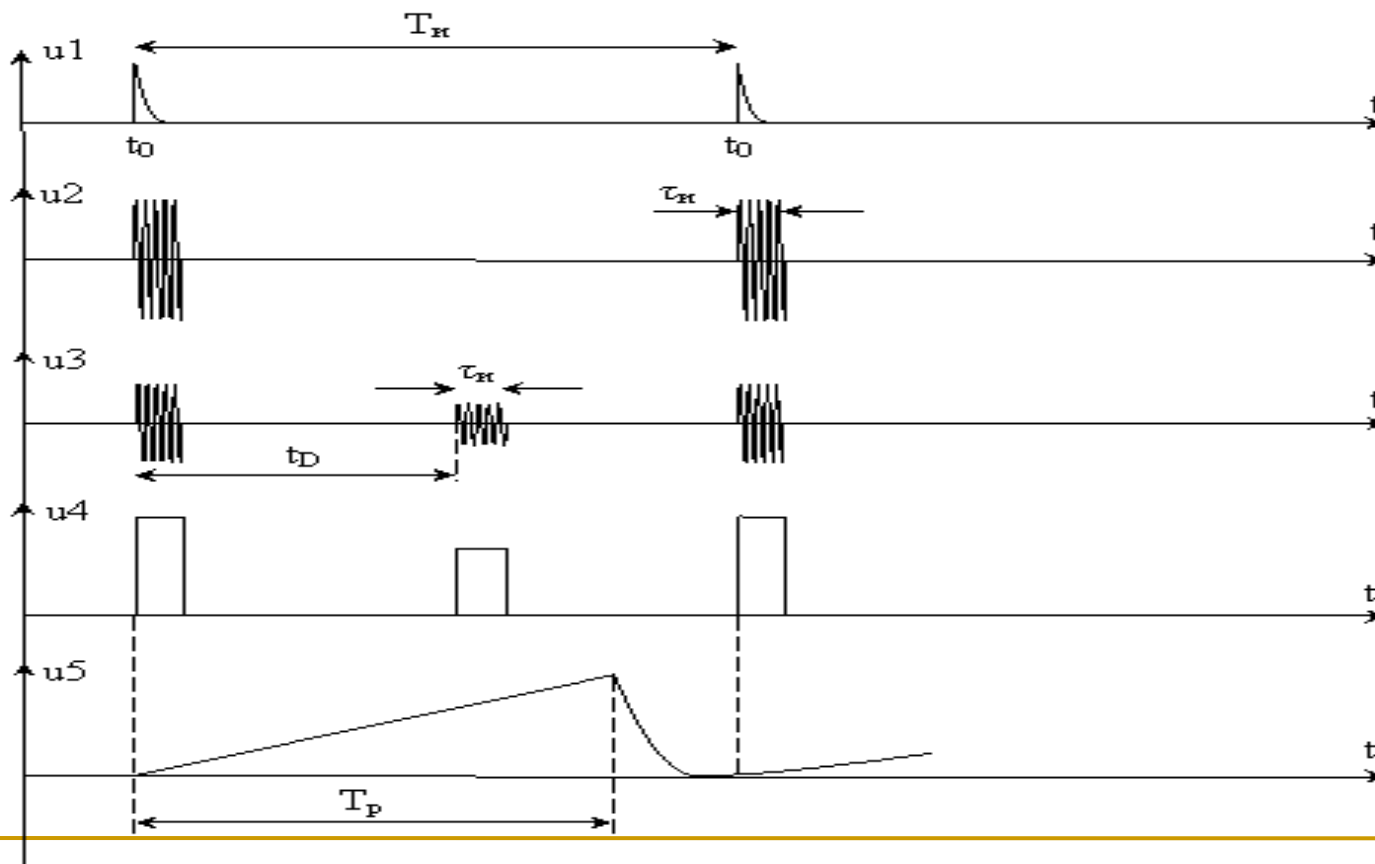


$\tau_u$  - длительность зондирующего импульса,

$T_n$  - период повторения зондирующих импульсов,

$Q = T_n / \tau_u$  - скважность последовательности зондирующих импульсов.

$$t_3 = \frac{2R}{c}; \quad t_3 < T_n; \quad R = \frac{t_3 c}{2}; \quad R_{\max} \leq \frac{T_n c}{2}; \quad R_{\min} = \Delta R = \frac{\tau_u c}{2}.$$



### **Достоинства импульсных дальномеров:**

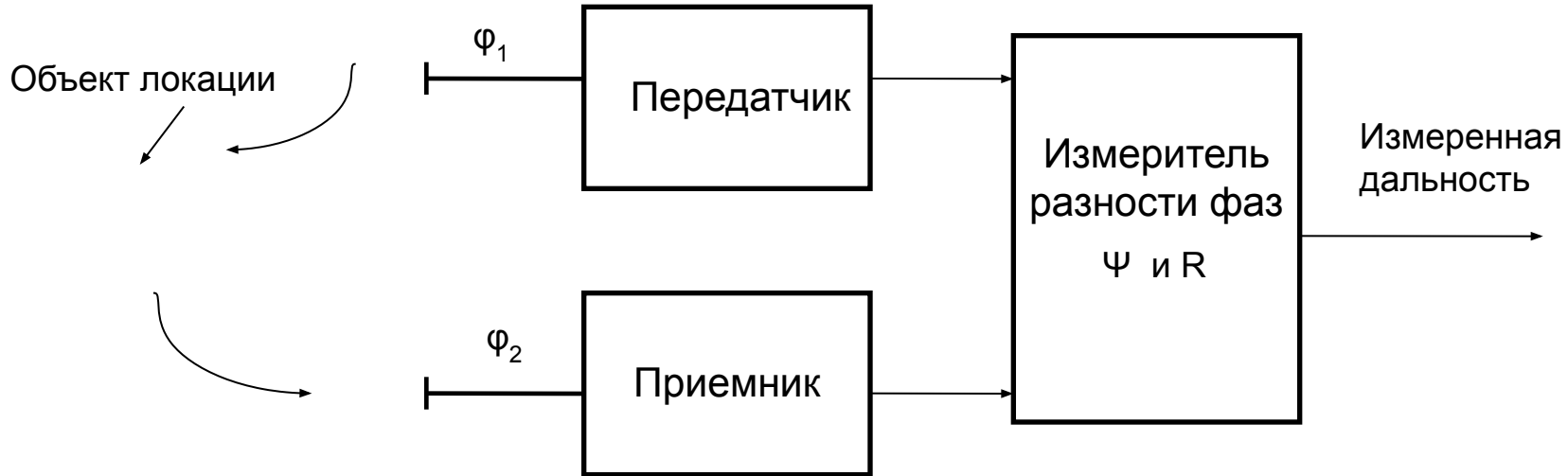
1. возможность построения РЛС с использованием **одной антенны**;
2. простота отсчета дальности;
3. возможность одновременного измерения дальности многих целей (многоканальность по дальности);

### **Недостатки импульсного метода:**

1. необходимость использования передатчиков с большой импульсной мощностью;
  2. наличие «слепой» зоны по дальности (невозможность измерения малых дальностей, связанной с длительностью излучаемых импульсов и временем протекания переходных процессов в антенном переключателе);
  3. Неоднозначность измерения дальностей, превышающих критического значения, связанное с периодом повторения радиоимпульсов.
-

## ФАЗОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ

Фазовые методы основаны на измерении разности фаз излучённых и принятых синусоидальных радиосигналов, вызванной задержкой распространения радиоволн.



Пусть фаза при отражении не меняется, тогда

$$\varphi_1(t) = 2\pi f_0 t + \varphi_0;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_1(t - t_3) = 2\pi f_0 (t - t_3) + \varphi_0 = 2\pi f_0 t - 2\pi f_0 t_3 + \varphi_0.$$

$$\Psi = \varphi_1(t) - \varphi_2(t) = 2\pi f_0 t_3; \quad t_3 = \frac{\Psi}{2\pi f_0} = \frac{\Psi \lambda}{2\pi c}; \quad t_3 = \frac{2R}{c}; \quad R = \frac{\Psi \lambda}{4\pi}.$$

---

**Достоинство фазового метода** состоит в простоте структуры измерительного устройства (но при двух антеннах).

**Недостатки фазового метода:**

1 - отсутствует разрешение по дальности, так как одновременно сигналы двух целей отдельно не наблюдаются, т.к. измерения фазовых сдвигов в фазометрическом устройстве возможно только в пределах  $2\pi$ , в результате диапазон однозначно измеряемой дальности не превышает единиц метров;

2 - необходимы две антенны;

3 - чувствительность приёмника снижается вследствие просачивания излучения передатчика.

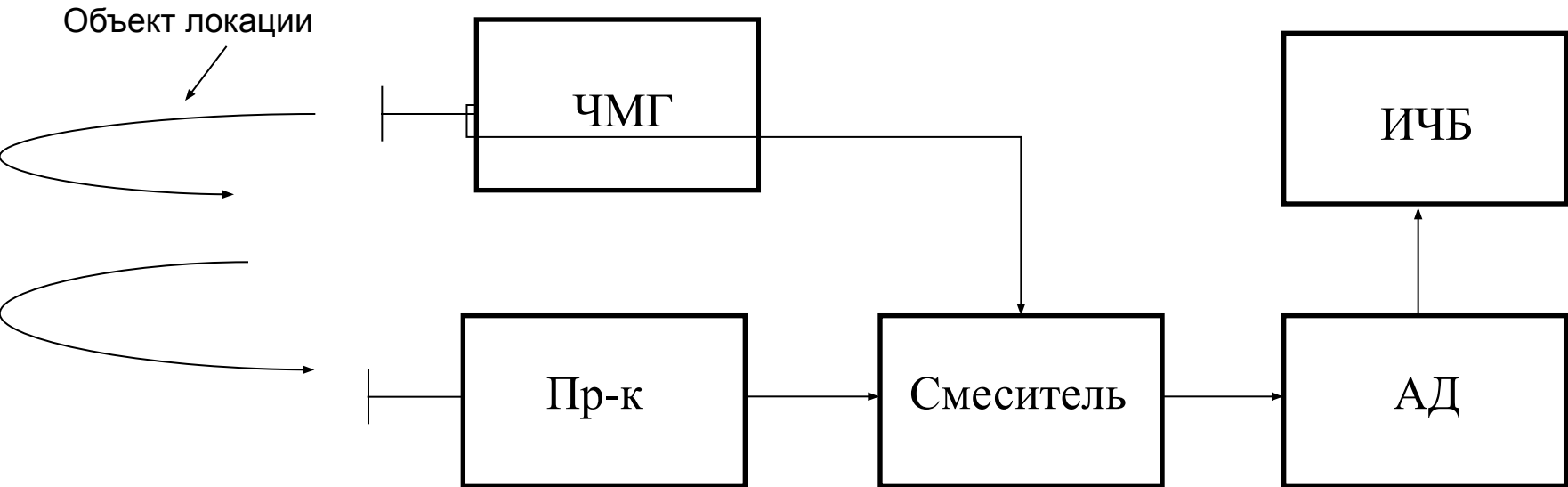
Известен вариант двухчастотного фазового дальномера, решающий задачу неопределенности фазы сигнала при отражении).

Для этого в РЛС включает два генератора высокочастотных колебаний и два приёмника, работающих соответственно на частотах  $f_1$  и  $f_2$ . Колебания этих генераторов подводятся к передающей антенне, а также к первому смесителю; с выхода приёмников два сигнала воздействуют на второй смеситель.

---

## ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ

Основан на измерении разности частот излучённых и принятых частотно-модулированных радиосигналов, вызванной задержкой распространения радиоволн.

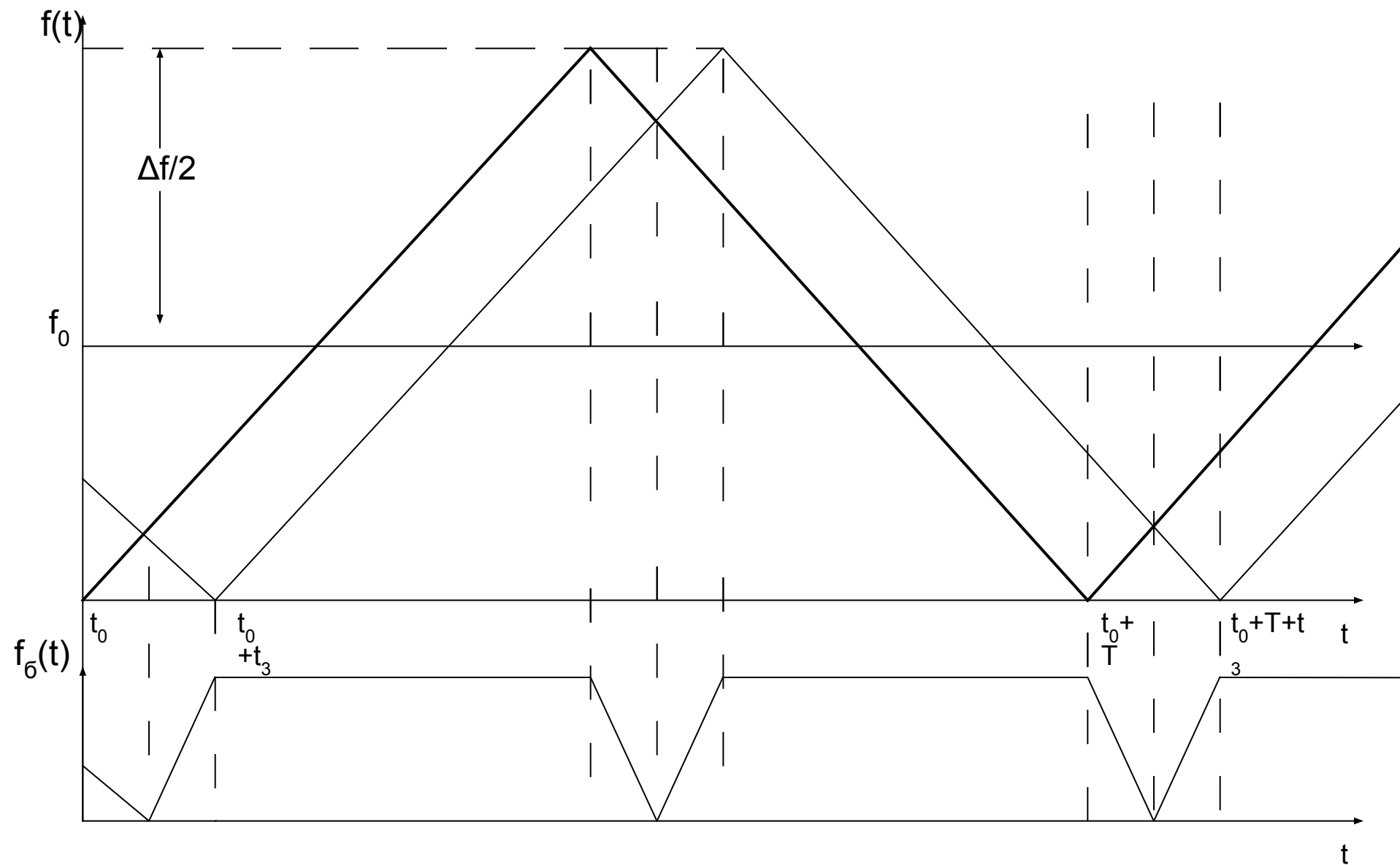


**Закон изменения частоты излучаемого радиосигнала**

$$f_1(t) = f_0 - \Delta f / 2 + 2\Delta f t / T \quad \text{при } 0 < t < T/2,$$

$$f_1(t) = f_0 - \Delta f / 2 - 2\Delta f [(t - T / 2) / T] \quad \text{при } T/2 < t < T,$$

---



Функции изменения частоты излучаемого и принимаемого сигналов и разностной частоты от времени.  
**Изображены не сигналы, а изменение частоты сигналов во времени!**

$$f_2(t) = f_1(t - t_3); \quad t_3 = \frac{2R}{c} \quad f_{\bar{\sigma}}(t) = |f_1(t) - f_2(t)|;$$

$$f_{\bar{\sigma} \max} = \frac{2\Delta f t_3}{T} = \frac{4\Delta f R}{cT}; \quad R = \frac{cf_{\bar{\sigma} \max} T}{4\Delta f};$$

Мгновенное значение частоты биений непостоянно, т.к. период модуляции  $T < \infty$ . Поэтому измеряется средняя частота биений, что неизбежно вносит методическую ошибку в измерения.

$$\bar{f}_{\bar{\sigma}}(t) = \frac{4\Delta f}{cT} \left( \frac{T - t_3}{T} \right); \quad T \gg t_3 \Rightarrow \bar{f}_{\bar{\sigma}}(t) \approx f_{\bar{\sigma} \max};$$

$$R = \frac{cf_{\bar{\sigma}}(t)T}{4\Delta f} \approx \frac{c}{4\Delta f} \frac{f_{\bar{\sigma} \max}}{F}; \quad F = 1/T.$$


---



Измеряя частоту биений определяем дальность до цели (т.е. число биений за период модуляции). Один из способов измерения основан на счете импульсов, число которых за период модуляции  $T$  пропорционально дальности:

$$n_R = f_{\text{бmax}} T = \frac{4\Delta f}{c} R; \quad R = n_R \frac{c}{4\Delta f}. \quad \Delta R \text{ -дискретность отсчета дальности.}$$

$$n_R \pm 1 = \frac{4\Delta f}{c} (R \pm \Delta R); \quad \Delta R = \frac{c}{4\Delta f} = \frac{\lambda_f}{4}; \quad R_{\text{min}} = \frac{c}{4\Delta f}$$

$\lambda_f$  — модуляционная длина волны.

Другим вариантом измерения дальности является использование анализатора спектра частоты биений. Спектроанализатор параллельного типа эквивалентен гребенке узкополосных фильтров, перекрывающих диапазон изменения частоты биений (диапазон дальностей). Количество фильтров  $m$  определяется как

$$m = \frac{R_{\text{max}} - R_{\text{min}}}{\Delta R}.$$


---

Спектр частоты биений дискретный и по этой причине и отсчеты частоты носят дискретный характер.

Частотный метод обладает разрешением по дальности, которое определяется девиацией частоты, т.е. шириной спектра излучаемого сигнала.

Достоинства частотного метода:

- позволяет измерять очень малые дальности;
- обладает разрешением по дальности;
- используется маломощный передатчик.

Недостатки частотного метода:

- необходимо использование двух антенн;
- ухудшение чувствительности приёмника вследствие просачивания через антенну в приемный тракт излучения передатчика;
- высокие требования к линейности изменения частоты.

Более сложной является задача измерения дальности до движущихся целей, т.к. при этом к частоте биений добавляется дополнительное смещение частоты Доплера. Эти частоты необходимо и возможно при некоторых условиях разделить.

---

# Методы измерения угловых координат

**Пеленгация** (peling-угол) - определение направления на объект (определение угловых координат), отсчитываемое от плоскостей горизонта и меридиана, или от плоскостей, ориентированных в пространстве определенным образом. Для определения угловых координат целей используются угломерные, или пеленгационные радиолокационные устройства. **Радиопеленгация** — определение направления на источник радиоизлучения. Радиопеленгацию осуществляют при помощи радиопеленгаторов, включающих антенную систему, приёмник для обработки принятых радиолокационных сигналов и измерительное устройство. Основная характеристика угломерного устройства - ***пеленгационная характеристика***, представляющая собой зависимость выходного напряжения приёмника от направления прихода радиоволны. В зависимости от измеряемого параметра сигнала, формирующего пеленгационную характеристику, методы измерения угловых координат подразделяют на амплитудные, частотные, фазовые и доплеровские. Практически применяются амплитудные, фазовые и доплеровский методы (используется в спутниковой радионавигации и при пеленгации аварийных радиобуев системы спасания Коспас-Сарсат).

По способу извлечения информации пеленгаторы бывают: одноканальные (последовательного типа) и многоканальные (моноимпульсные).

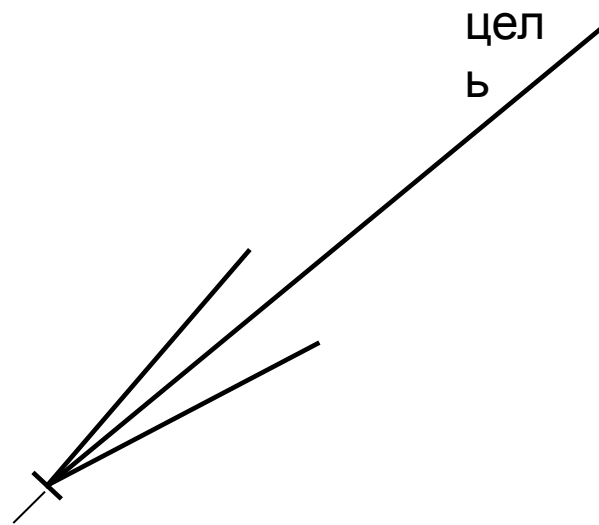
---

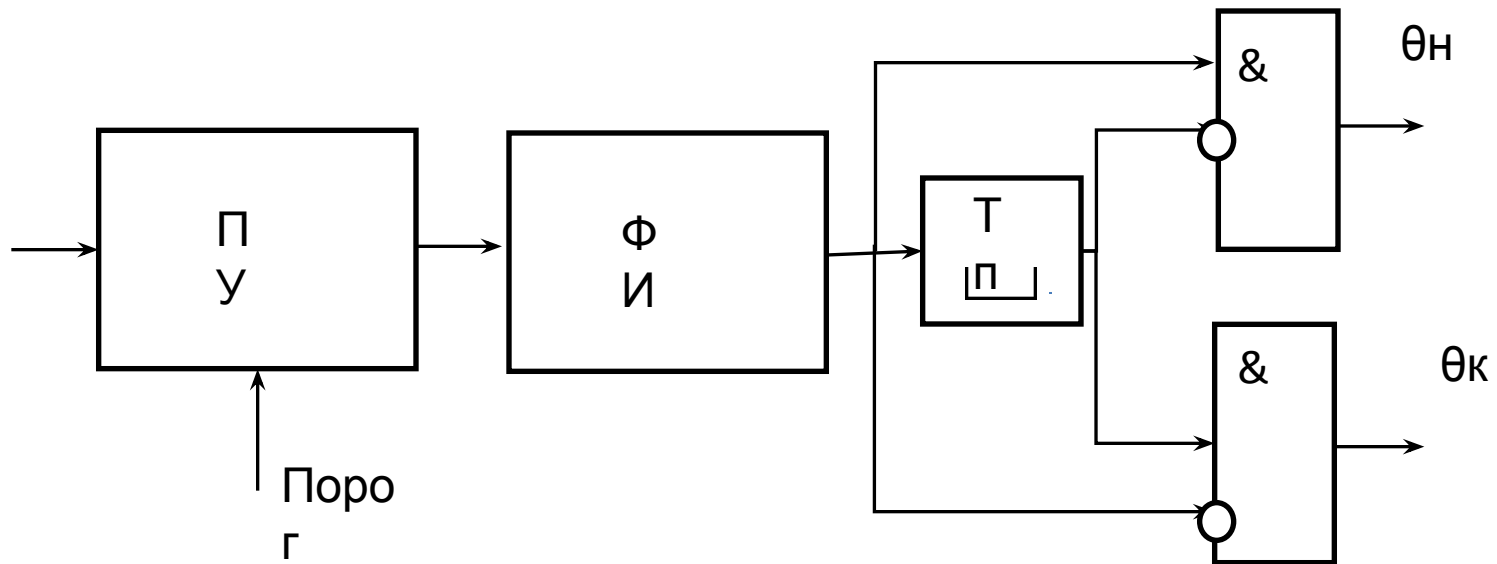
В радиомаяках используется импульсный (временной) метод.

## Амплитудные методы используют направленные свойства антенн

Применяются методы: максимума; минимума; сравнения; равносигнальный. При пеленгации по методу максимума изменяется угловое положение антенны (сканирование); отсчёт угловой координаты цели производится в момент, когда амплитуда сигнала в приёмнике достигает максимума. Чаще используется измерение «на проходе» по началу и окончанию отраженной пачки импульсов.

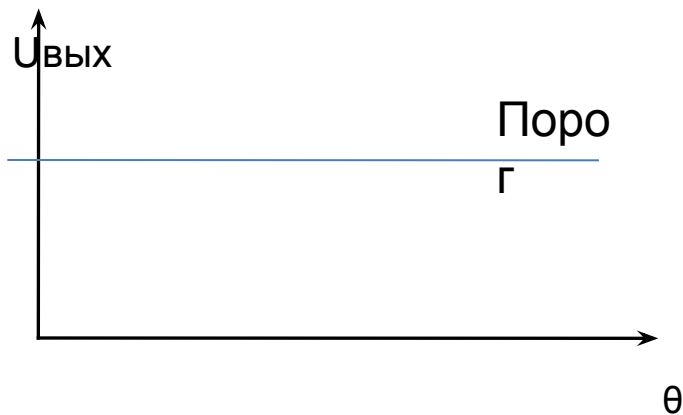
$$\theta_0 = 0,5(\theta_n + \theta_k - \Omega_{ск} T_n)$$





Амплитуда сигналов при сканировании зависит от углового положения антенны по отношению к цели. При вращении антенны выходное напряжение приёмника  $U_{\text{ВЫХ}}$  повторяет форму диаграммы направленности антенны. Когда ось антенны совпадает с направлением на цель, выходное напряжение приёмника достигнет максимума; в этот момент указатель поворота антенны соответствует пеленгу цели  $\theta_{\text{ц}}$ .

Пеленгационная характеристика угломерного устройства  $U_{\text{ВЫХ}}(\theta) = k F(\theta)$ ,  $k$  – коэффициент пропорциональности.



Достоинствами метода являются простота технической реализации и получение наибольшего значения сигнал-шум в момент пеленгации. Недостаток - низкая точность измерения, т.к. низка крутизна пеленгационной характеристики в направлении на цель.

## Пеленгация с использованием оценки производной огибающей пачки отраженных импульсов

Момент совпадения максимума пачки отраженных импульсов с направлением на цель можно определить по переходу производной огибающей через нуль.

$$\left. \frac{dU}{d\theta} \right|_{\theta=\theta_0} = 0$$

---

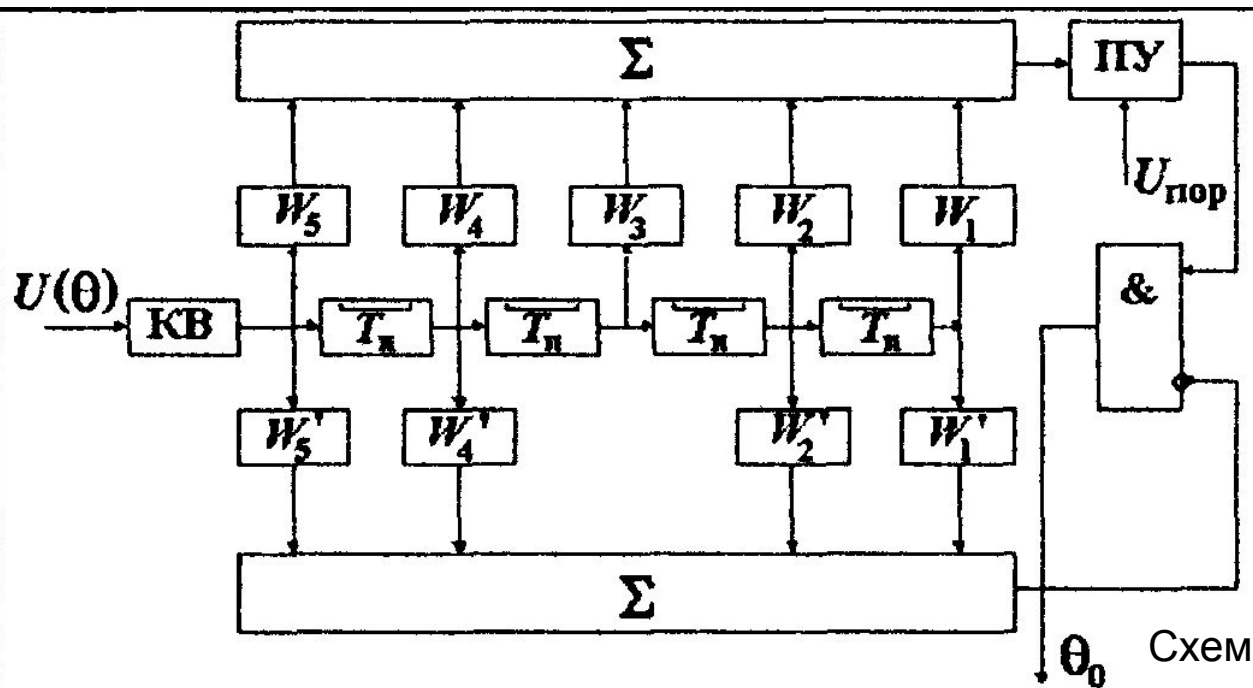
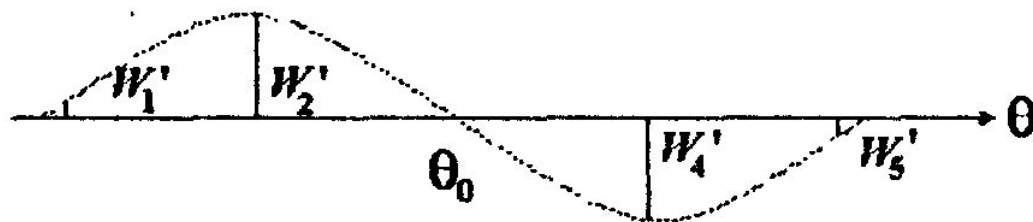
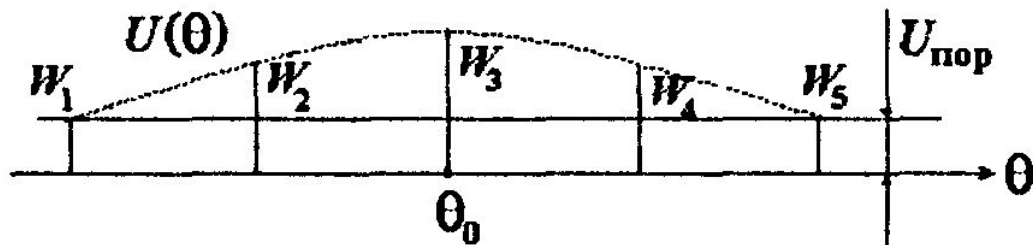


Схема пеленгатора по методу максимума с использованием производной огибающей пачки

а)



б)

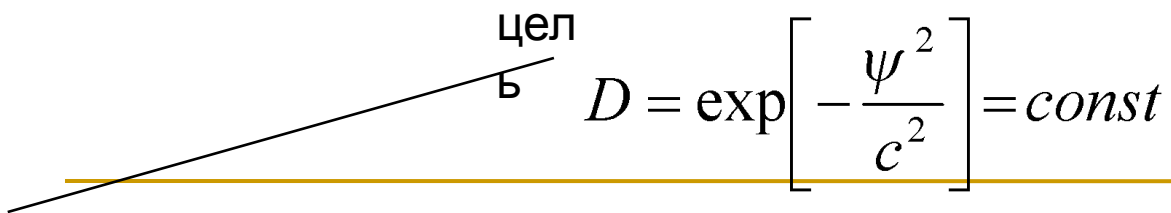


## Метод минимума

*Метод пеленгации по минимуму* отличается тем, что отсчёт угловой координаты производится в момент уменьшения до минимума выходного напряжения приёмника. Диаграмма направленности антенны пеленгатора должна иметь в средней части провал. Этого можно добиться, например, если использовать две антенны, повёрнутые в пространстве одна относительно другой на угол, равный ширине диаграммы направленности. При пеленгации по минимуму может быть получена высокая точность измерения угловой координаты, так как пеленгационная чувствительность велика. Но отношение сигнал-шум вблизи направления пеленга мало. Поэтому по методу минимума можно пеленговать только источники мощного собственного излучения, например в радионавигации. В радиолокации метод реже используется.

*Метод сравнения* характеризуется тем, что пеленг цели определяется по соотношению амплитуд сигналов, принятых одновременно двумя антеннами или последовательно одной антенной.

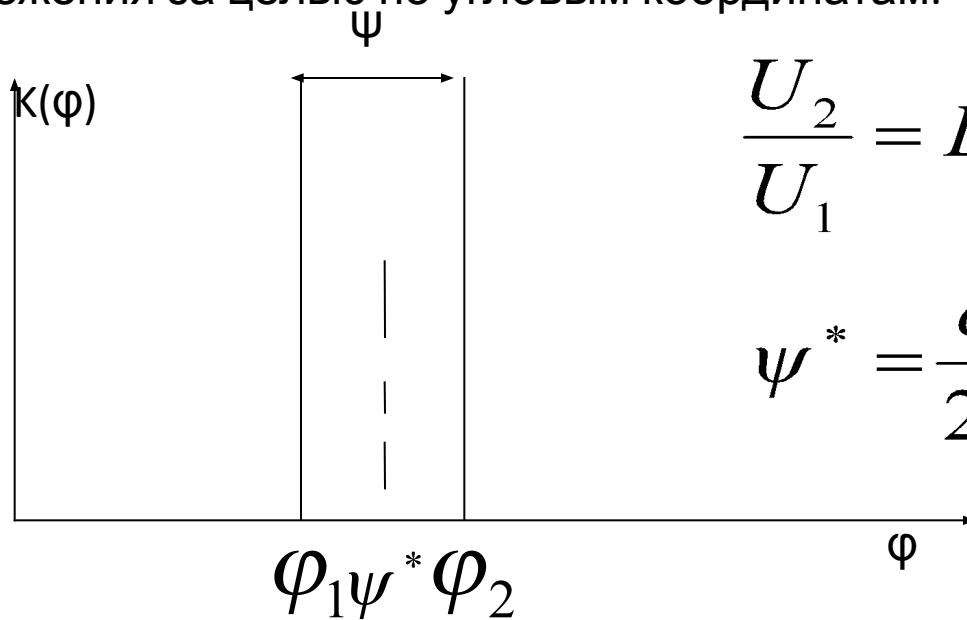
$$K(\varphi) = \exp\left[-\frac{\varphi - \varphi_1}{c}\right]^2 = DK_1(\varphi) \exp\left[\frac{2\psi}{c^2}\right](\varphi - \varphi_1),$$



$D = \exp\left[-\frac{\psi^2}{c^2}\right] = const$

Вариантом метода сравнения является *равносигнальный метод* пеленгации. Он также основан на сравнении амплитуд сигналов, принимаемых двумя антеннами, но для отсчёта углового положения добиваются равенства сигналов. При пеленгации цели по равносигнальному методу антенное устройство поворачивают до тех пор, пока выходное напряжение не окажется равным нулю и угловое положение антенны принимается за угловую координату цели.

Равносигнальный метод характеризуется высокой точностью, так как при измерении используется диаграмм направленности (вблизи равносигнального направления) с большой крутизной. Этот метод используют для автоматического слежения за целью по угловым координатам.



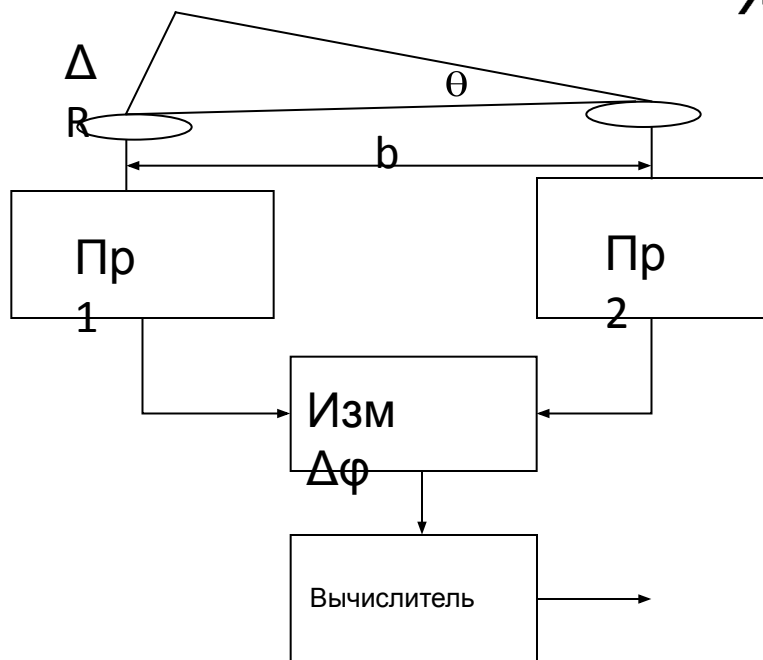
$$\frac{U_2}{U_1} = D \exp\left[-\frac{2\psi}{c^2}\right] (\psi^* - \varphi_1);$$

$$\psi^* = \frac{c^2}{2\psi} \ln \frac{U_2}{U_1} + \frac{\psi}{2} + \varphi_1$$

## Фазовый метод

Фазовые методы основаны на измерении разности фаз электромагнитных колебаний, принимаемых различными антеннами. Метод характеризуется относительно высокой точностью измерения; может использоваться для автоматического слежения за целями по угловым координатам. Недостатками фазового метода являются использование двух разнесенных антенн, неоднозначность отсчёта и отсутствие разрешения нескольких целей.

$$\Delta R = b \sin \theta; \Delta \zeta = 2\pi \frac{\Delta R}{\lambda} = 2\pi \frac{b}{\lambda} \sin \theta; \theta = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi b} \Delta \zeta\right)$$



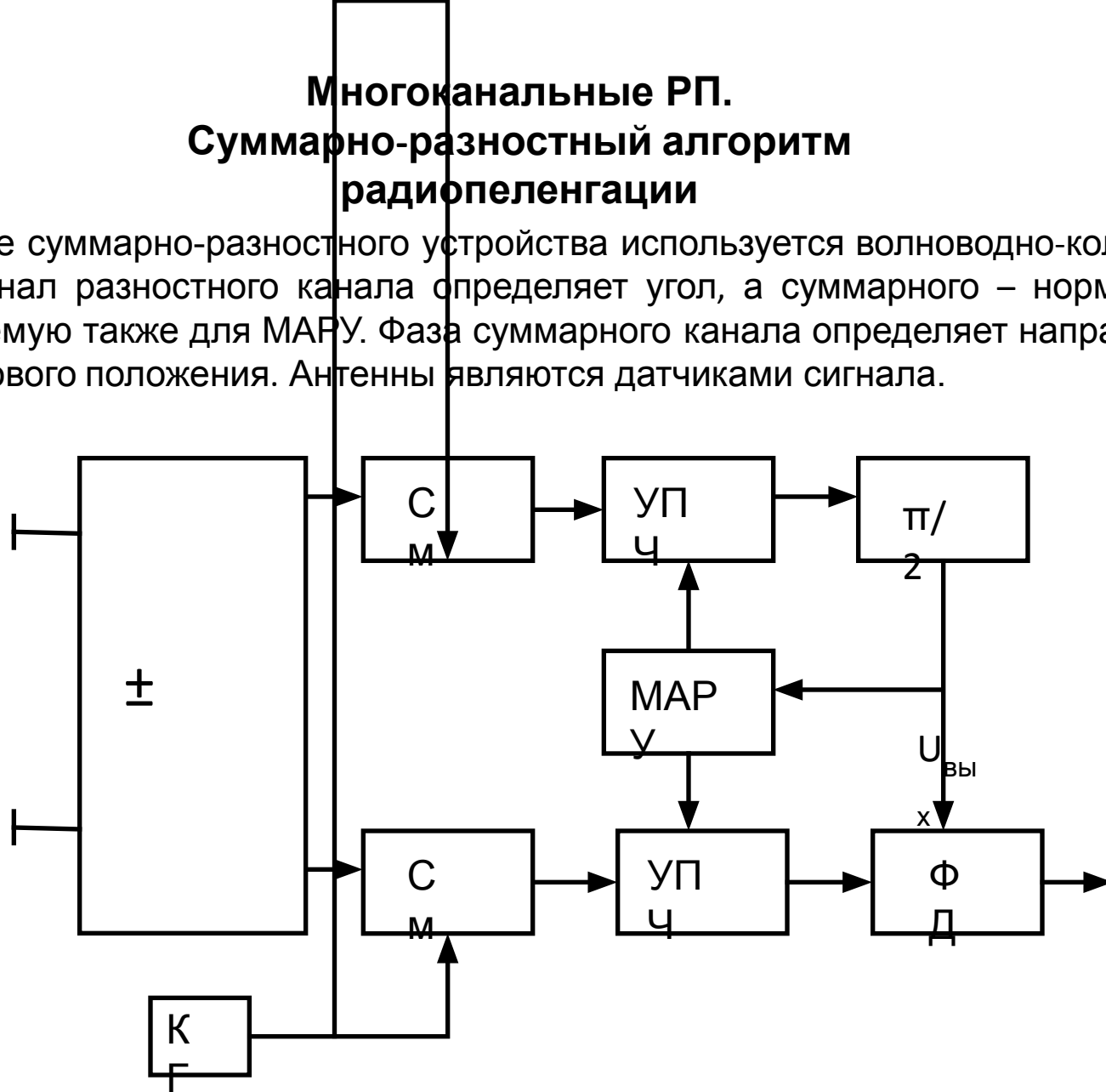
Ошибка (СКО) определения фазы

$$\delta_{\phi} = \frac{\lambda \delta_{\zeta}}{2\pi b \sqrt{1 - \frac{\lambda}{2\pi b} \Delta \zeta}}$$

где  $\zeta$  – разность фаз

## Многоканальные РП. Суммарно-разностный алгоритм радиопеленгации

В качестве суммарно-разностного устройства используется волноводно-кольцевой мост. Сигнал разностного канала определяет угол, а суммарного – нормировку, используемую также для МАРУ. Фаза суммарного канала определяет направление (знак) углового положения. Антенны являются датчиками сигнала.



На большом расстоянии разность фаз

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \alpha$$

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{ФД}} \frac{U_{-}(\theta)}{U_{+}(\theta)} \cos(\varphi_{-} - \varphi_{+})$$

Удобно использование ФАР. Точность различных методов А-А; А-Ф; Ф-Ф примерно одинакова. Недостатки: неидентичность каналов снижает точность, а использование коммутации одного канала (что в принципе обеспечивает идентичность каналов) создает возможность применения помех на частоте коммутации, т.е. РЭП каналов пеленгации. Помехи каналам углового сопровождения должны быть ориентированы на конкретный вид канала УС. Так АМ-помехи неэффективны против моноимпульсного метода, т.к. он нечувствителен к ним (за исключением случая коммутации каналов). При этом нужно знать частоту переключения каналов.

Точность РП зависит от способа измерения и идентичности каналов.

$$\sigma_{\theta} / \varphi_{\alpha} = k / \sqrt{q}$$

Большая точность достигается при выборе базы равной половине ширины ДНА. Для повышения точности используют следящие радиопеленгаторы.

# УРАВНЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОБНАРУЖЕНИЯ

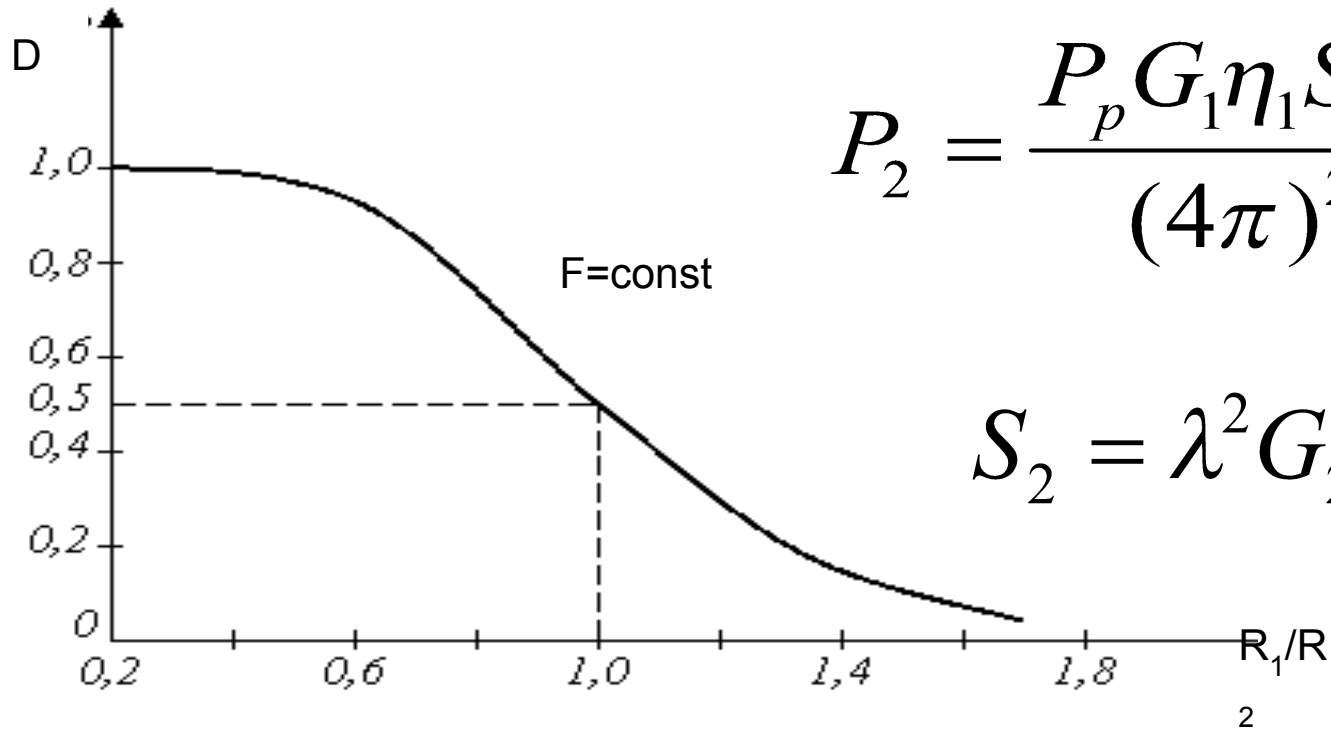
## Дальность действия РЛС в свободном пространстве

*Дальностью действия* радиолокационной станции называется наибольшее расстояние между РЛС и целью, на котором ее обнаружение производится с заданными вероятностями правильного обнаружения и ложной тревоги.

Дальность действия зависит от различных факторов: технических параметров станции, характеристик цели, условий распространения радиоволн, наличия и уровня различного рода помех и ряда других факторов, большинство из которых изменяется во времени случайным образом. График иллюстрирует характер зависимости относительного изменения дальности обнаружения от значения вероятности правильного обнаружения  $D$  при заданной ложной тревоге  $F$ .

Вначале рассмотрим дальность действия РЛС без учёта влияния земной поверхности и атмосферы на распространение радиоволн, т.е. РЛС и цель находятся в «свободном» пространстве.

---



$$P_2 = \frac{P_p G_1 \eta_1 S_2 \eta_2 S_0}{(4\pi)^2 R^4}$$

$$S_2 = \lambda^2 G_2 / 4\pi$$

2

На входе приемника активной РЛС пороговая мощность сигнала при обнаружении:

$$P_{\text{пор}} = \frac{P_p G_1 G_2 \lambda^2 S_c}{(4\pi)^3 R_{\text{max}}^4} \quad \frac{P_c}{P_{\text{ш}} k_r} > q_c k_p'$$

$S_a = S_2$  – активная площадь антенны,  $S_c = S_0$  – ЭПР цели.

Для РЛС с пассивным ответом

$$R_{\max 0} = \sqrt[4]{\frac{P_p G_1 G_2 \lambda^2 S_c}{(4\pi)^3 P_{\text{пор}}}} \quad R_{\max 0} = \sqrt[4]{\frac{P_p S_{a1} S_{a2} S_c}{4\pi \lambda^2 P_{\text{пор}}}}$$

Для РЛС с активным ответом

$$R_{\max 0} = \sqrt{\frac{P_p G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi)^3 P_{\text{пор}}}} \quad R_{\max 0} = \sqrt{\frac{P_p S_{a1} S_{a2}}{4\pi \lambda^2 P_{\text{пор}}}}$$

Если РЛС использует импульсный сигнал и имеет одну антенну (на передачу – прием), то УДРО упрощается:

$$R_{\max 0} = \sqrt[4]{\frac{P_p G^2 \lambda^2 S_c}{(4\pi)^3 P_{\text{пор}}}} \quad R_{\max 0} = \sqrt[4]{\frac{P_p S_a^2 S_c}{4\pi \lambda^2 P_{\text{пор}}}}$$

---