

# РАДИОМЕТРЫ

Радиометрическом приемнике сигнал имеет *шумовой характер*.

**Использование:** радиоастрономия, пассивная локация, радиовидение, зондирование природной среды, медицина и другие области науки и техники.

## Собственное и отраженное излучение тел

Общее излучение тела состоит из *собственного* и *отражаемого*.

### **Собственное излучение тел.**

Радиотепловое излучение подчиняется закону Планка.

$$P_{\text{изл}} = kT\Pi_{\text{э}} p(f, T) \qquad p(f, T) = \frac{hf}{kT \left[ \exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1 \right]} \longrightarrow \text{«1»}$$

В радиодиапазоне действует приближение Релея-Джинса :

$$P_{\text{изл}} = kT\Pi_{\text{э}},$$

Более точно множитель  $p(f, T)$  :

$$p(f, T) = \frac{hf}{kT \left[ \exp\left(\frac{hf}{kT}\right) - 1 \right] + \frac{hf}{2}}$$

С повышением частоты приближение не выполняется:  $hf > kT$ ,  
 $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град.

В ММ диапазоне наблюдается увеличение множителя:  $p(f, T) > 1$ .

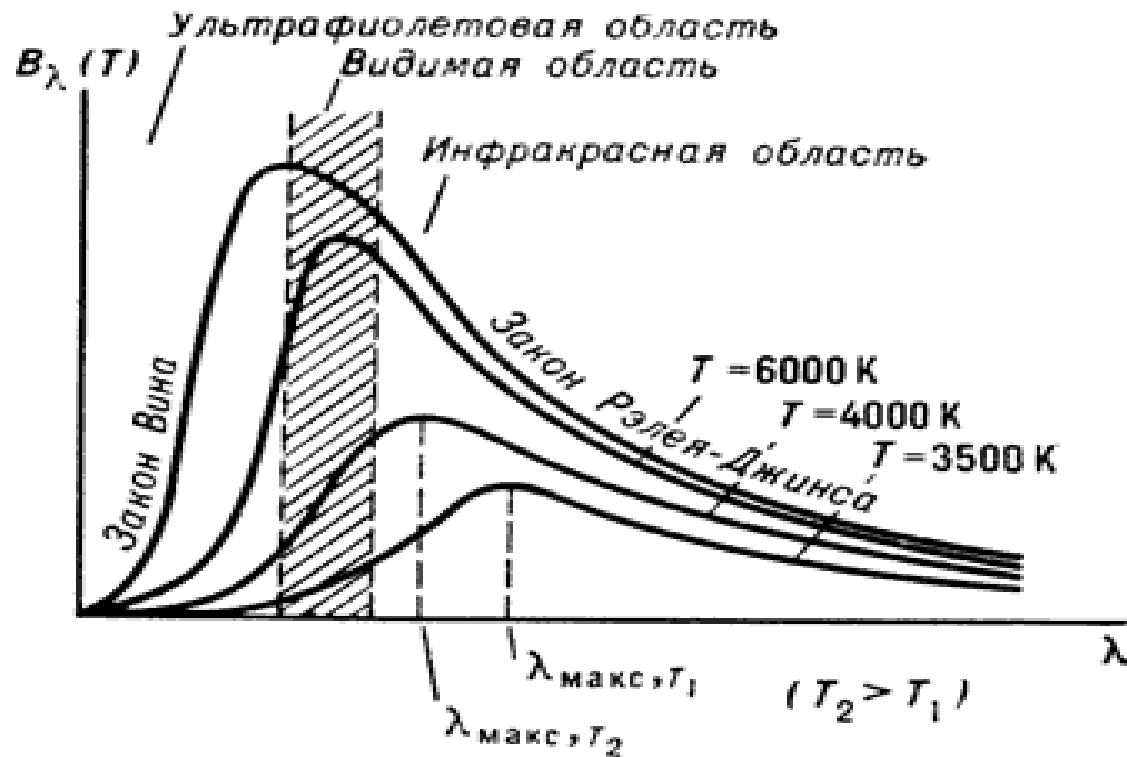
В ИК диапазоне  $p(f, T)$  имеет максимальное значение.

При той же  $T_{\text{физ}}$  температуре тела выделяемая мощность больше.

В ОД множитель уменьшается, т.к. экспонента в знаменателе растет быстрее и мощность излучения  $P_{\text{изл}}$  - падает.

Увеличить излучаемую мощность в ОД можно только при повышении  $T$ .

Т.е. - в ОД излучают только сильно нагретые тела.



$B_\lambda$  -интенсивности излучения АЧТ

С увеличением  $T_{\text{физ}}$  максимум интенсивности смещается в сторону коротких волн.

## Отраженное («кажущееся») излучение тел.

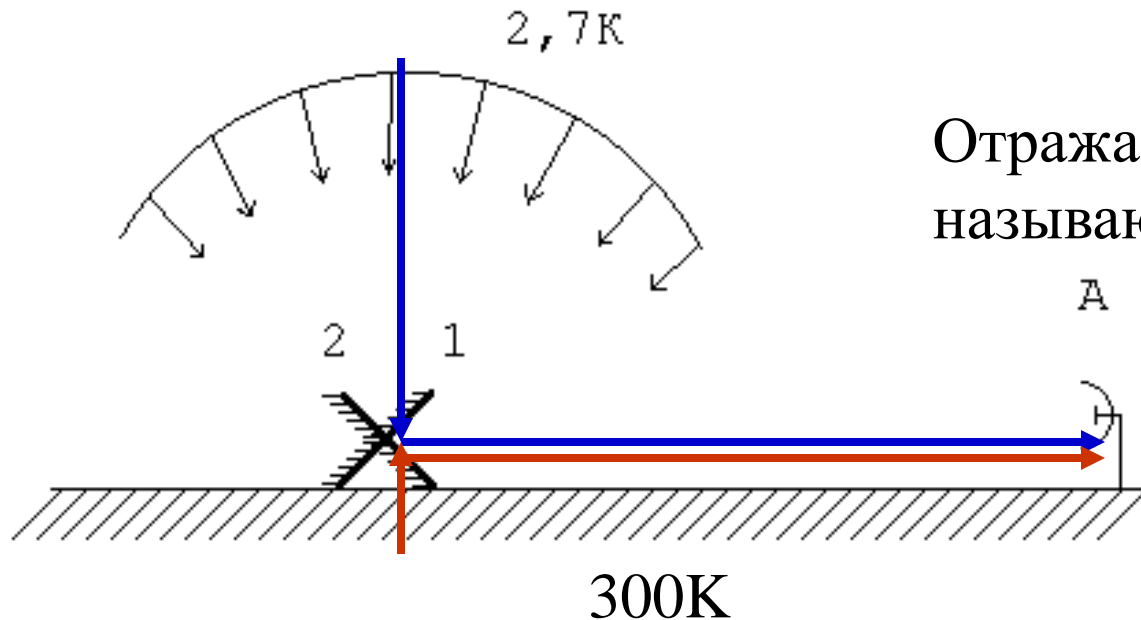
Отражение зависит от шероховатости поверхности.

Для ОД диапазона все тела шероховатые  $\lambda \ll \delta_{\text{поверх}}$ .

Следовательно, преобладает собственное излучение.

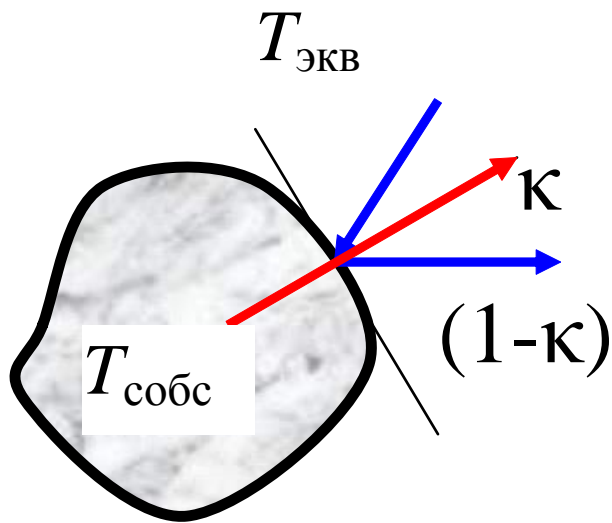
Для РД все тела блестящие  $\lambda \gg \delta_{\text{поверх}}$ .

Следовательно преобладает отраженное излучение.



Отражаемую температуру  
называют  $T_{\text{ЭКВ}}$ .

Суммарная температура  $T_{\text{объекта}}$  зависит от  $T_{\text{собс}}$  и  $T_{\text{экв}}$  излучения объекта, с учетом его отражательной способности



$\kappa$  - коэффициент поглощения  
поверхностью объекта,  
 $(1-\kappa)$  - коэффициент отражения от  
поверхности объекта.

$R$  - коэффициент отражения от  
поверхности объекта,  
 $(1-R)$  - коэффициент поглощения  
поверхностью объекта.

$$T_{\text{объекта}} = T_{\text{собс}} \cdot \kappa + T_{\text{экв}}(1-\kappa).$$

$$T_{\text{объекта}} = T_{\text{собс}} \cdot (1-R) + T_{\text{экв}}(R).$$

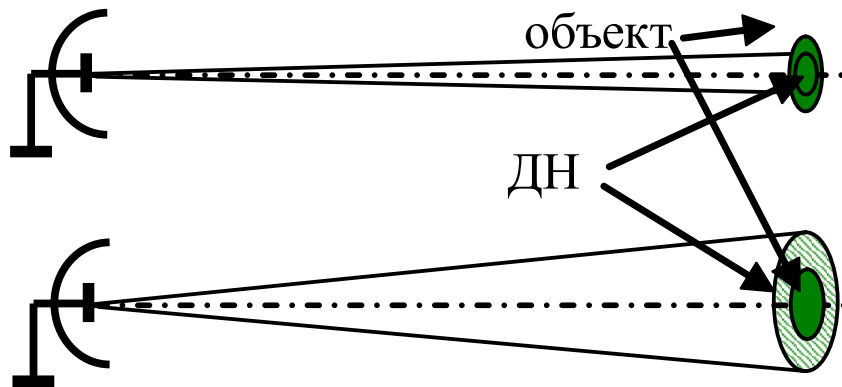
$T_{\text{собс}}$  – собственное излучение определяется его физической температурой.

$T_{\text{экв}}$  - температура зависит от свойств окружающей среды, погоды, состояния атмосферы и пр.

## Система «объект-антенна».

Тя – температура в элементе телесного угла  $d\Omega$  (ДН антенны) в направлении  $(\theta, \varphi)$  – определяется как температура черного тела, перекрывающего элемент  $d\Omega$ , при которой его яркость совпадает с наблюдаемой яркостью этого элемента.

Определим прирост антенной температуры от прироста  $T_{об}$ .



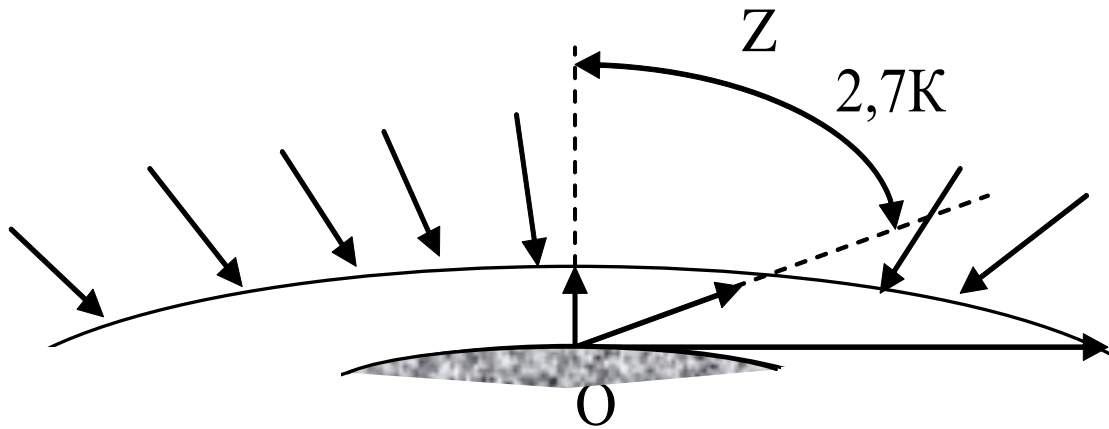
Прирост антенной температуры  
 $\Delta T_A$

1.  $S_{об} > S_{гл}$   $\Delta T_A = \Delta T_{об} / \sigma_{тр}$

2.  $S_{об} < S_{гл}$   $\Delta T_A = \Delta T_{об} (S_{об} / S_{гл}) (1 / \sigma_{тр})$ .

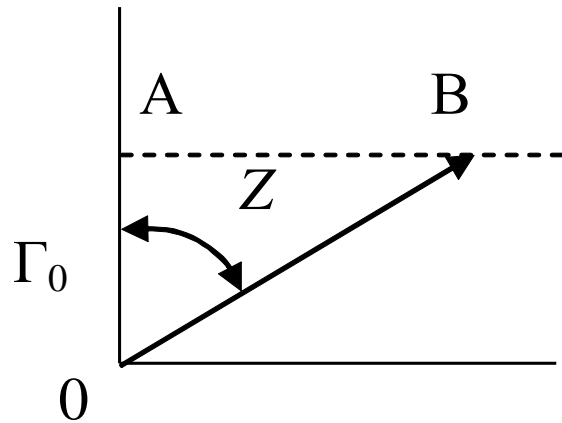
## Модель плоско-слоистой атмосферы.

Для наблюдателя из-за различной толщины атмосферы температура небесной сферы будет различной и ее величина зависит от угла зенит-горизонт  $Z$ .



Объект на поверхности земли подсвечивается холодным небом, но из разных точек небесной сферы по-разному.

Если воспользоваться логарифмической шкалой и обозначить вертикальное поглощение в атмосфере через  $\Gamma_0$  [неп], то поглощение  $\Gamma_z$  под углом  $Z$  возрастет в  $OB/OA$  раз.



$$\Gamma_z = \Gamma_0 \sec Z, [\text{Неп}]$$

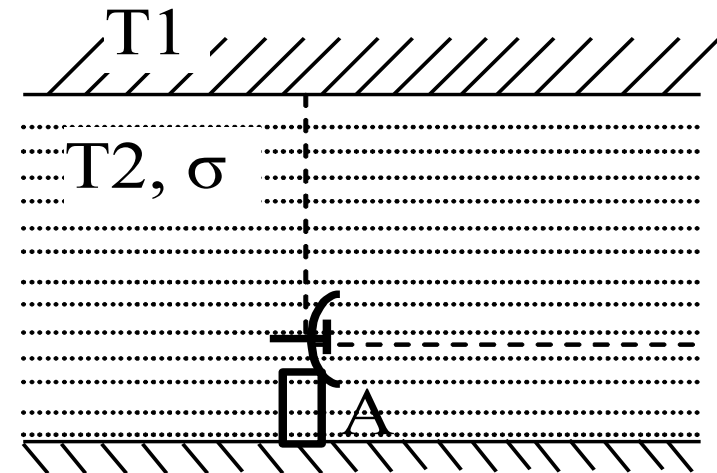
$$\sigma = \exp(\Gamma_0 \sec Z) [\text{раз}],$$

$$\sigma_0 = \exp(\Gamma_0) [\text{раз}],$$

$$T_A = \frac{T_1}{\sigma} + \left(1 - \frac{1}{\sigma}\right) T_2.$$

$T_1 = T_{\text{р.ф}} = 2,7 \text{ K}$  - температура космоса,

$T_2 = T_{\text{атм}} = 300 \text{ K}$  атмосферы у поверхности земли, или 0,94-0,95 от температуры земли.





$$T_A = T_{\text{р.ф.}} / \exp(\Gamma_0 \sec Z) + T_{\text{атм}} [1 - 1/\exp(\Gamma_0 \sec Z)].$$

Рассмотрим два случая, учитывая, что  $\sec 0^\circ = 1$ ,  $\sec 90^\circ = \infty$  :

1) Зенит, чистое безоблачное небо.  $Z=0^\circ$  ( $\sec Z = 1$ ), потери малы.

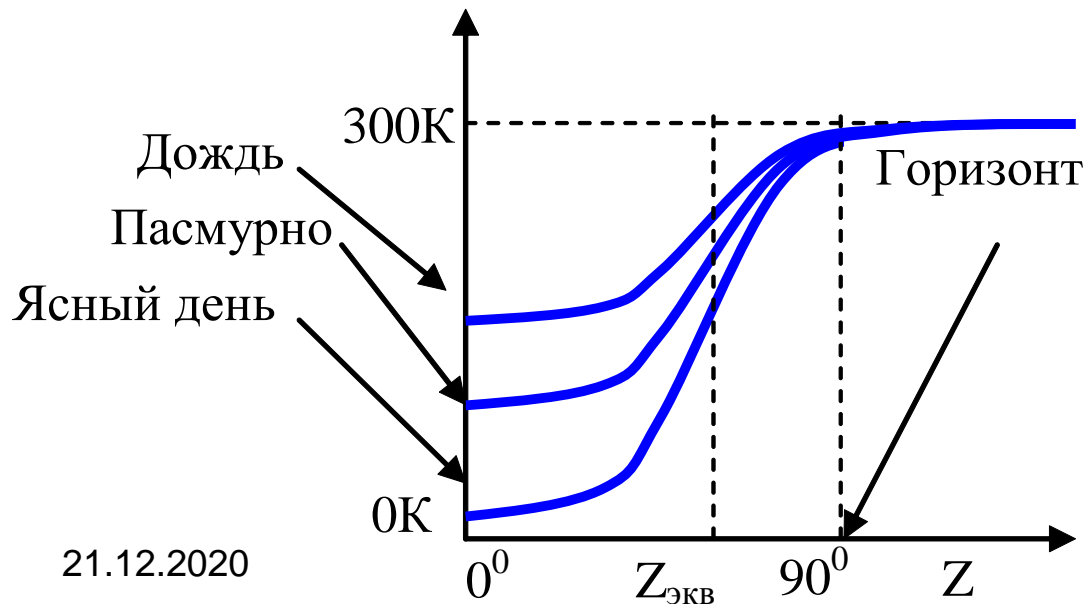
$$\sigma = \exp(\Gamma_0 \sec Z) = \exp(\Gamma_0) = \sigma_0, \text{ и при } \Gamma_0 \rightarrow 0 \sigma_0 \rightarrow 1$$

$$T_A = T_{\text{р.ф.}} / \sigma_0 + T_{\text{атм}} (1 - 1/\sigma_0) \approx T_{\text{р.ф.}} / \sigma_0, \quad T_A \rightarrow T_{\text{р.ф.}}$$

2) Вблизи горизонта  $Z=90^\circ$  и при сильной облачности  $\sec Z = \infty$

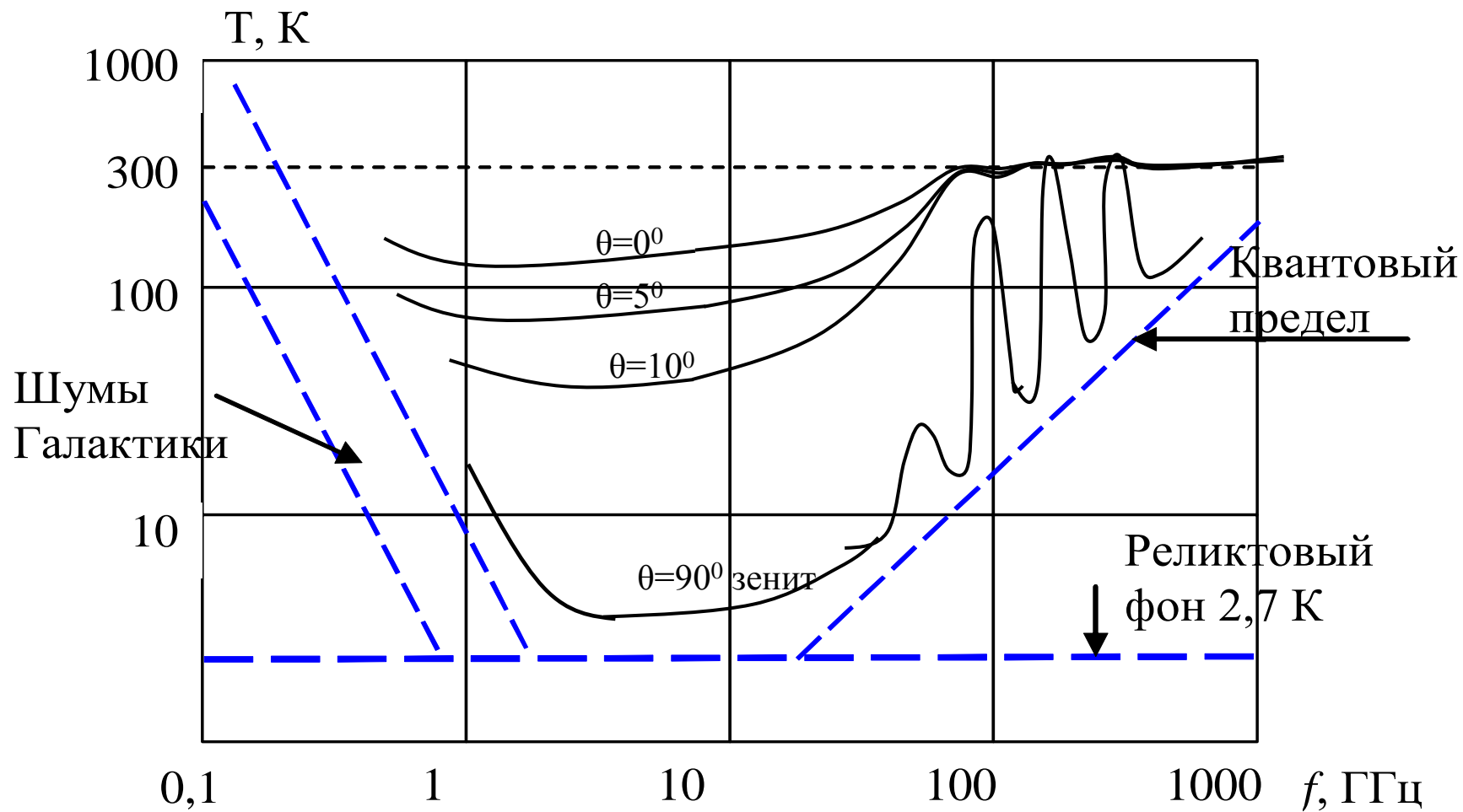
потери велики  $\sigma = \exp(\Gamma_0 \sec Z) \rightarrow \infty$ .

$$T_A \cong T_{\text{атм}} \rightarrow 300\text{K}$$



Разрез атмосферы

$$Z_{\text{ЭКВ}} = 60^\circ.$$



Зависимость  $T_A$  от частоты

# ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОМЕТРОВ

Радиометры разрабатываются для приема различных вариаций сигналов: амплитудных, частотных и временных.

Самый распространенный тип радиометра - амплитудный.

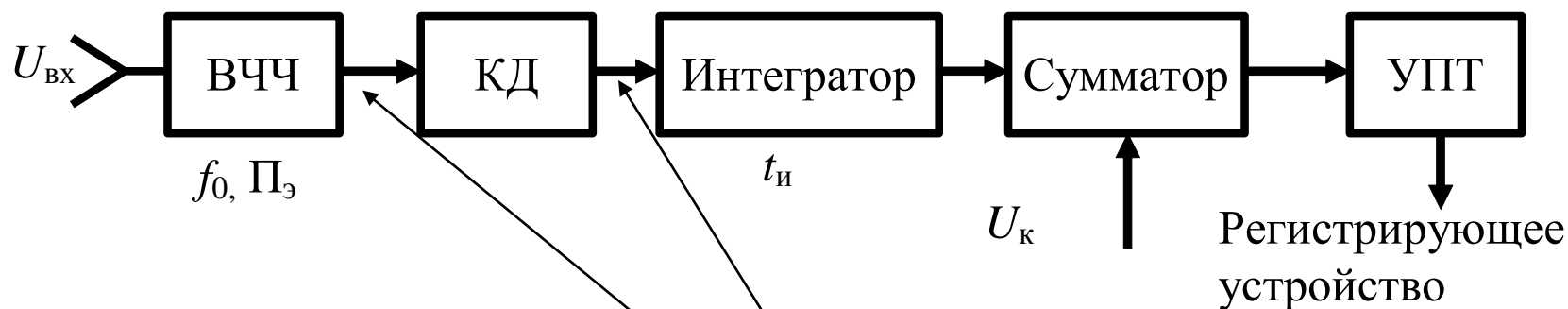
- 1) Высокая чувствительность ( $10^{-15} \dots 10^{-20}$  Вт).
- 2) Широкая полоса приема.
- 3) Выходной фильтр с очень узкой полосой (от 1 сек до часов).

## **Основные типы приемников:**

- 1) Детекторный приемник
- 2) Приемники супергетеродинного типа.
  - а) со смесителем на входе (ММ диапазон)
  - в) с УВЧ на входе (СМ и ДМ диапазоны)
- 3) Приемники прямого усиления.

# Флуктуационная чувствительность (вывод формулы) идеального компенсационного радиометра (КР) .

Регистрация сигналов малой мощности может быть реализована компенсационным радиометром со структурной схемой

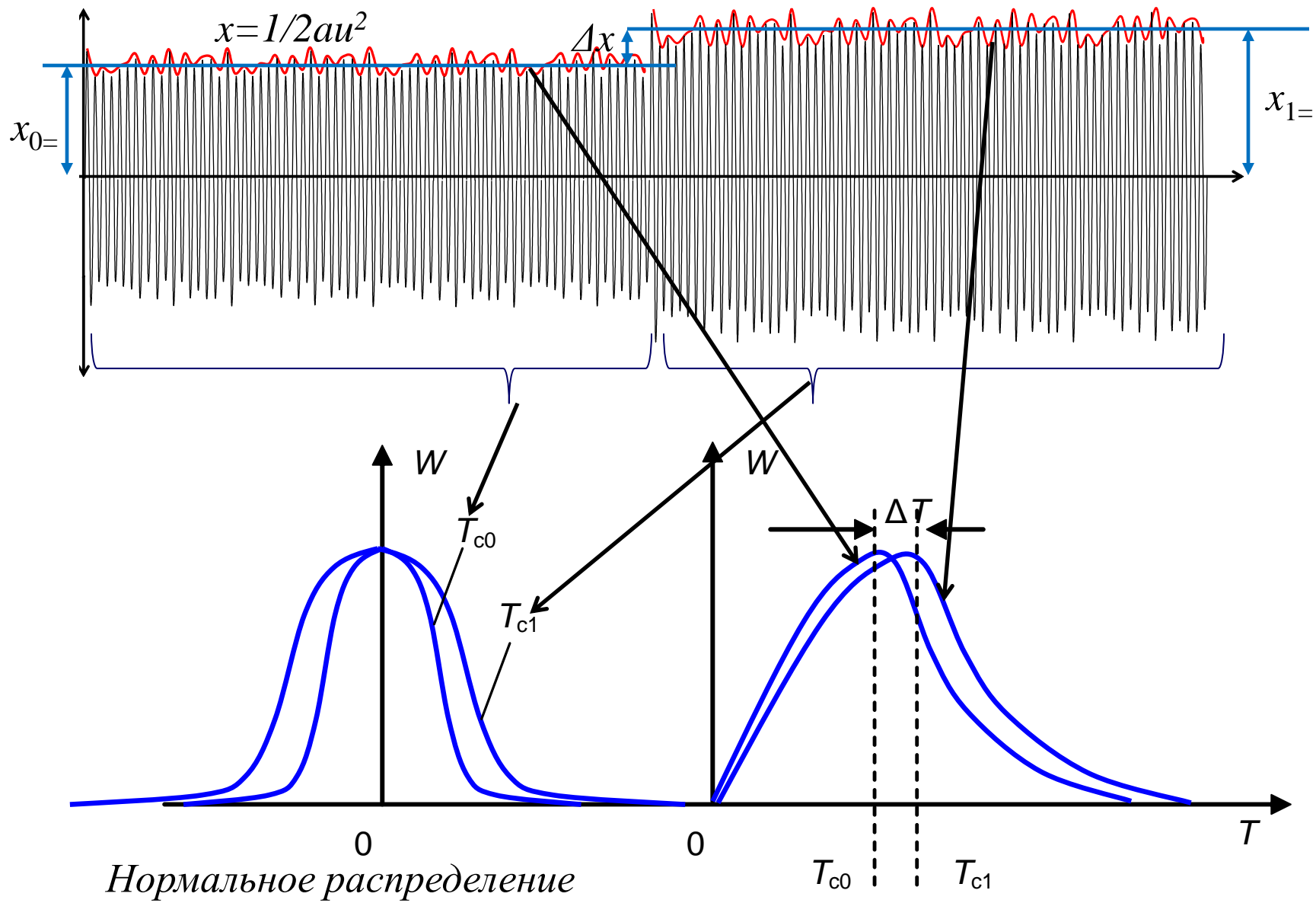


На выходе ВЧ  $u(t)$  имеет нормальное распределение с плотностью вероятности

$$W(u) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$\text{где } \sigma^2 = kT_c \Pi_\varepsilon K_p$$

Огибающая на выходе КД  $U(t)$  имеет распределение по закону Релея.



Обозначим выход квадратичного детектора

$$x = \frac{1}{2} a u^2, \quad a = 2$$

Сигнал на выходе квадратичного детектора будет иметь экспоненциальное распределение с плотностью вероятности :

$$W(x) = \frac{1}{\beta} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right), \quad \beta = a\sigma^2$$

$ml = l!\beta^l$  - общая формула для моментов характеризующих поведение случайной величины.

**1-й момент** (постоянная составляющая напряжения  $x(t)$ ).

$$- m1x = \beta = a\sigma^2$$

**2-й момент** (среднеквадратическое значение напряжения  $x(t)$ )

$$- m2x = 2!\beta^2 = 2(a\sigma^2)^2$$

Мощность постоянной составляющей на выходе детектора:  
 $(m1x)^2 = (a \sigma^2)^2$ .

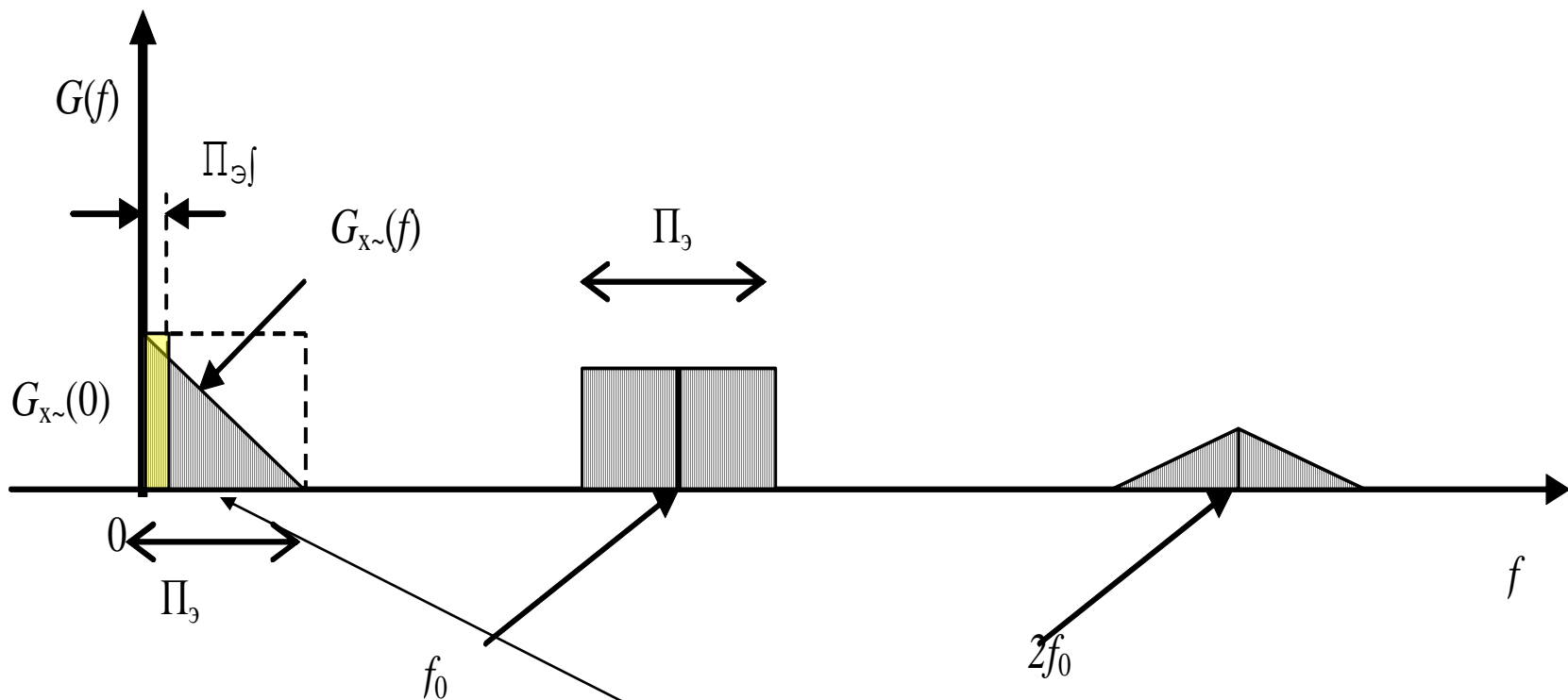
Мощность (интенсивность) шума на выходе квадратичного детектора есть дисперсия

$$Dx = m2x - (m1x)^2 = 2(a \sigma^2)^2 - (a \sigma^2)^2 = (a \sigma^2)^2,$$

при  $a=2$   $Dx = 4 \sigma^4$ .

$$\sigma^2 = kT_c \Pi_{\Sigma} K_p \quad Dx = 4 \sigma^4 = 4 (kT_c \Pi_{\Sigma} K_p)^2$$

Рассмотрим  $P_c$  на выходе КД анализируя его спектр и найдем мощность (интенсивность) шума на выходе интегратора.



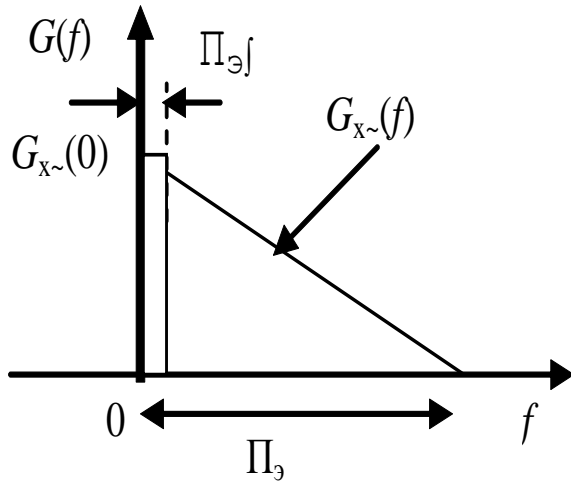
Энергетический спектр  $G_{x\sim}(f)$  выходного сигнала  $x(t)$  после квадратичного детектора имеет треугольную форму, с  $\delta$ -функцией на нулевой частоте, представляющей интенсивность постоянной составляющей  $P_{x=}$ .



Интенсивность (мощность) от переменных составляющих шума на выходе КД с учетом формулы площади треугольника

$$P_{x\sim} = \int_0^{\Pi} G_{x\sim}(f) df = \frac{G_{x\sim}(0) \Pi_{\text{э}}}{2} = Dx = 4\sigma^4$$

Подставляя  $\sigma^2 = kT_c \Pi_{\text{э}} K_p$ , находим  $G_{\sim}(0) = 8k^2 T_c^2 \Pi_{\text{э}} K_p^2$ .



Если полоса интегратора  $\Pi_{\text{э}f}$ , и  $G_{\sim}(0)$  сохраняет свое значение в пределах полосы, то мощность (интенсивность) на выходе интегратора (накопителя) от переменных составляющих шума :

$$P_{x\sim f} = G_{\sim}(0) \Pi_{\text{э}f} = 8k^2 T_c^2 \Pi_{\text{э}} \Pi_{\text{э}f} K_p^2.$$

## Компенсация постоянной составляющей от $T_{c0}$ .

в случае  $T_c = T_{c0}$  постоянная составляющая на выходе интегратора:

$$x_{0=} = a\sigma^2 = 2kT_{c0}\Pi_9 K_p \quad (a=2),$$

в случае  $T_c = T_{c1}$  постоянная составляющая на выходе интегратора:

$$x_{1=} = a\sigma_1^2 = 2k(T_{c0} + \Delta T)\Pi_9 K_p \quad (a=2).$$

Если значение компенсирующего напряжения  $x_k = x_{0=} = 2kT_{c0}\Pi_9 K$ ,

то значение постоянной составляющей от приращения:

$$\Delta x_{=} = x_{1=} - x_k = 2k\Delta T\Pi_9 K_p$$

Мощность (интенсивность) постоянной составляющей от прироста  $\Delta x_{=}$

$$P_{=\Delta T} = (\overline{\Delta x_{=}})^2 = 4(k\Delta T\Pi_9 K_p)^2.$$

$\Delta T_{\min}$  – флуктуационная чувствительность, т.е.  
минимальный различимый контраст на выходе радиометра.

*Определим флуктуационную чувствительность компенсационного радиометра как  $\Delta T_{\min}$ , при котором интенсивность  $(\overline{\Delta x_-})^2$  постоянной составляющей равна интенсивности выходного шума интегратора от переменных составляющих.*

$$P_{=\Delta T} = P_{x \sim \int},$$

$$4(k\Delta T_{\min} \Pi_{\vartheta} K_p)^2 = 8k^2 T_c^2 \Pi_{\vartheta} \Pi_{\vartheta \int} K_p^2$$

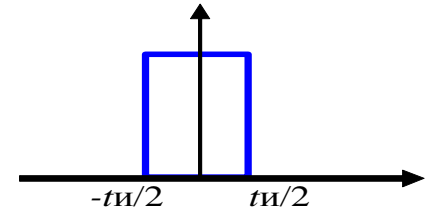
$$\Delta T_{\min} = T_c \sqrt{\frac{2\Pi_{\vartheta \int}}{\Pi_{\vartheta}}}$$

*Отношение  $\Pi_{\vartheta}/\Pi_{\vartheta \int}$  - радиометрический выигрыш.*

Выразим  $\Pi_{\text{эф}}$  через время интегрирования  $t_{\text{и}}$ .

Для идеального интегратора с временем интегрирования  $t_{\text{и}}$  импульсная переходная характеристика :

$$h(t) = \begin{cases} 1/t_{\text{и}}, & 0 < t \leq t_{\text{и}}; \\ 0, & t > t_{\text{и}}. \end{cases}$$



Из теории цепей известно, что импульсная переходная и передаточная характеристики связаны преобразованием Фурье.

Передаточная функция такого звена (по мощности) равна:

$$K_p(f) = \frac{\sin^2(\pi f t_{\text{иэ}})}{(\pi f t_{\text{иэ}})^2}$$

$$K_p(\omega) = \frac{\sin^2\left(\frac{\omega t_u}{2}\right)}{\left(\frac{\omega t_u}{2}\right)^2}$$

Эквивалентная шумовая полоса по определению:

$$\Pi_{\text{эф}} = \frac{\int_0^{\infty} K_p(f) df}{K_{p0}}$$

Для нормированного коэффициента передачи  $K_p(0)=1$ , и табличного

$$\int_0^{\infty} \frac{\sin^2(x)}{x^2} = \frac{\pi}{2}$$

и с учетом коэффициента  $\pi t_u$  при переменной  $f$  ( $x=\pi t_u f$ )

$$\Pi_{\text{эф}} = \int_0^{\infty} \frac{\sin^2(\pi f t_u)}{(\pi f t_u)^2} = \frac{\pi}{2\pi t_u} = \frac{1}{2t_u}$$

$$2\Pi_{\text{эф}} = \frac{1}{t_u}$$

$$\Delta T_{\min} = \frac{T_{c0}}{\sqrt{t_u \Pi_{\text{эф}}}}$$

$$\Delta T_{\min} = T_{c0} \sqrt{\frac{2\Pi_{\text{эф}}}{\Pi_{\text{э}}}}$$

Для RC-фильтра  $\Pi_{\text{эф}} = \frac{1}{4RC} = \frac{1}{4\tau}$

$$t_u = 2RC = 2\tau.$$

$$\Delta T_{\min} = \frac{T_{c0}}{\sqrt{2\tau \Pi_{\text{э}}}}$$

# Реальная чувствительность КР

Полный прием затруднен из-за нестабильностей  $K_p$ ,  $T_{c0}$  и  $\Pi_{\varepsilon}$ .  
На выходе КР нельзя различить приращений  $\Delta T$  - сигнала от  $\Delta T_{np}$  - вносимых самим приемником.

$$\Delta T_{\min} = T_{c0} \sqrt{\frac{1}{\Pi_{\varepsilon} t_u} + \left( \frac{\Delta K_p}{K_p} \right)^2}$$

На практике:  $\Delta K_p / K_p = 1 \dots 10\%$   $\Delta K_p / K_p = 0,1\%$   $(\Delta K_p / K_p)_{\min} = 10^{-3}$

Для радиометров миллиметрового диапазона обычно полагают:

$\Pi_{\varepsilon} = 100 \dots 500$  МГц,

Время стандартное  $t_u = 1$  с:

$$\frac{1}{\Pi_{\varepsilon} t_u} \approx 10^{-8 \dots -9} \quad \frac{1}{\Pi_{\varepsilon} t_u} \ll \left( \frac{\Delta K_p}{K_p} \right)^2 \quad \Delta T_{\min} = T_{c0} \sqrt{\cancel{\frac{1}{\Pi_{\varepsilon} t_u}} + \left( \frac{\Delta K_p}{K_p} \right)^2}$$

$$\Delta T_{\min} = \frac{\Delta K_p}{K_p} T_{c0}$$

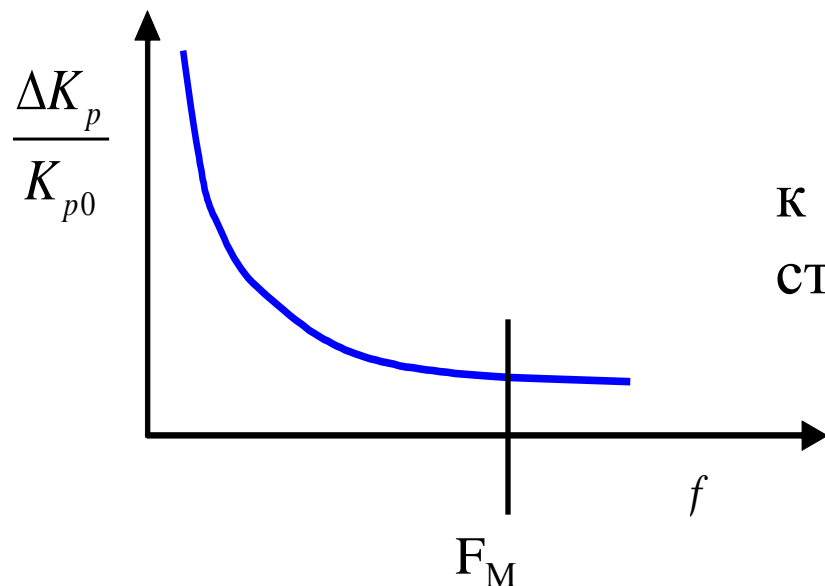
21.12.2020

Реальная  
чувствительность КР:

# МОДУЛЯЦИОННЫЕ РАДИОМЕТРЫ.

## Модуляционный радиометр Дикке

Интенсивность флуктуаций  $K_p$ :  $G(f) = \Delta K_p / K_p = \kappa f^\alpha$ ,

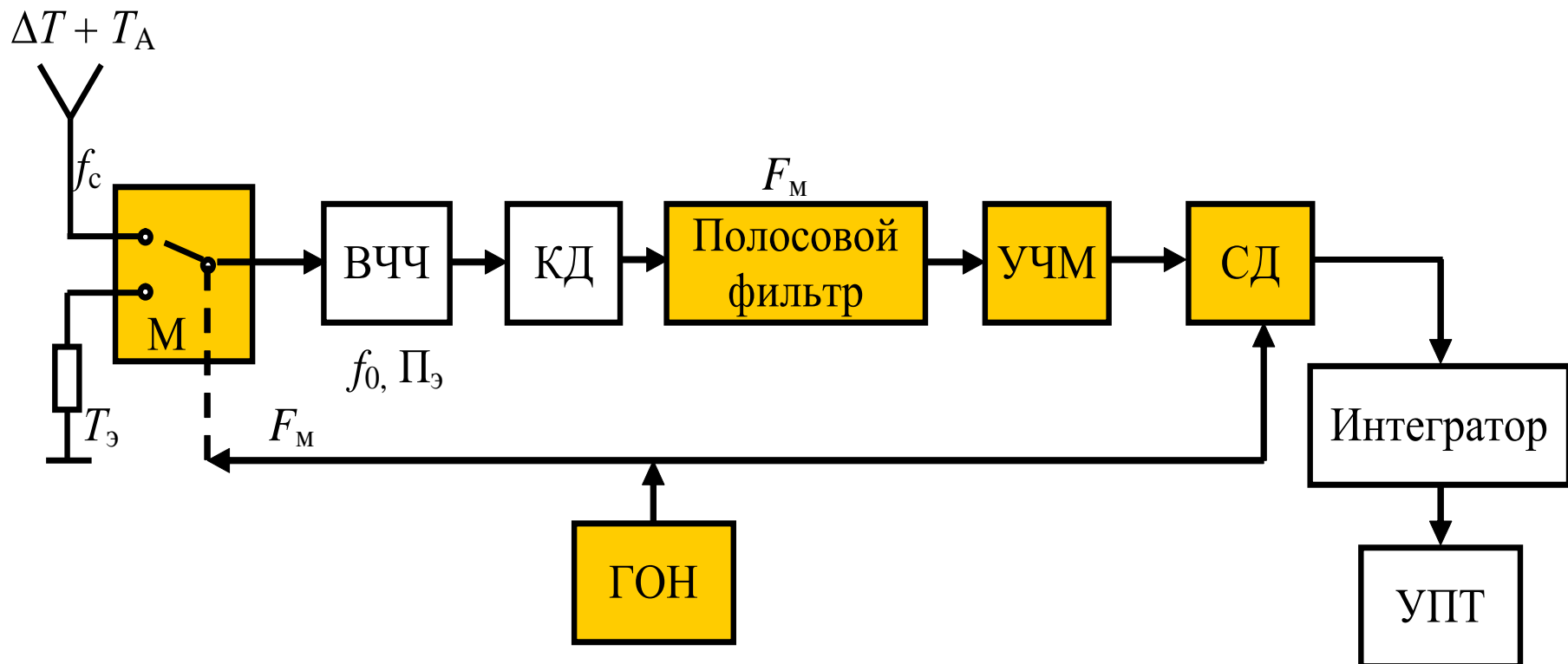


$\kappa$  - коэффициент определяющий стабильность напряжения питания,

$\alpha$  - в пределах от 2...2,5.

Компенсацию надо делать быстро, пока не изменился  $K_p$

$F_M$  обычно в радиометрах 50...1000 Гц.



ВЧЧ - высокочастотная часть

КД - квадратичный детектор

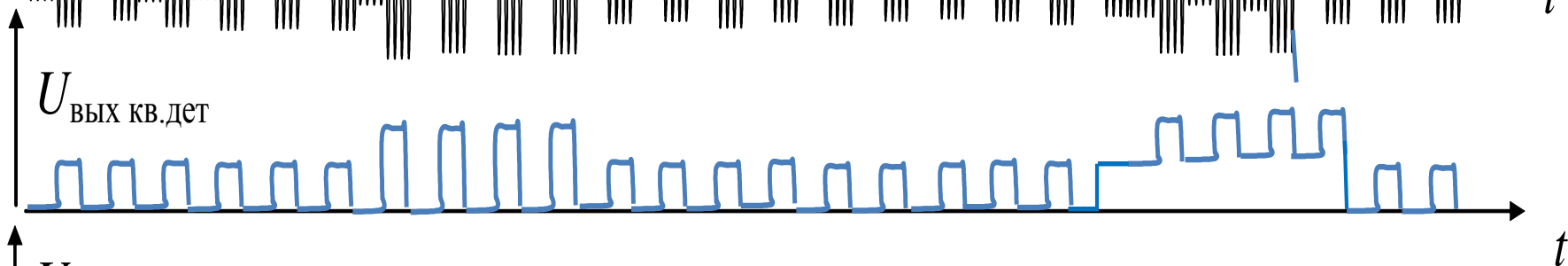
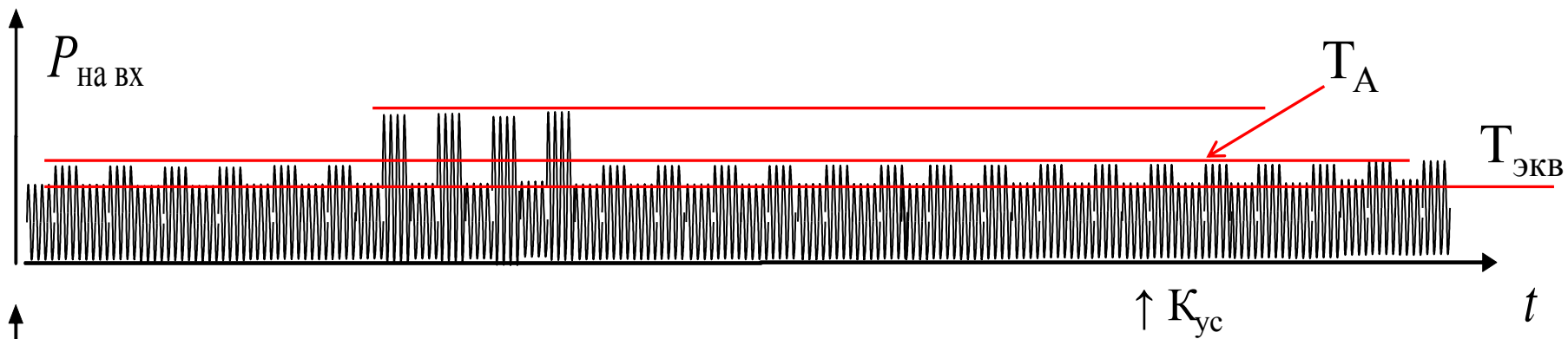
ПФ – на частоте  $F_M = 50 \dots 1000$  Гц

ГОН – генератор опорного напряжения

УЧМ – усилитель частоты модуляции

СД - синхронный детектор





21.12.2020

44  $t$

## Реальная чувствительность МР.

- Время наблюдения меньше в 2 раза.
- Калибровка шумами радиометра  $\Delta T_{\min \text{ мод}} = 2\Delta T_{\min \text{ комп}}$  .
- Наличие избирательного фильтра - в  $4/\pi$  (1,27) раз,
- Потери в модуляторе и синхронном детекторе -  $4/\pi$  (1,27) раз.

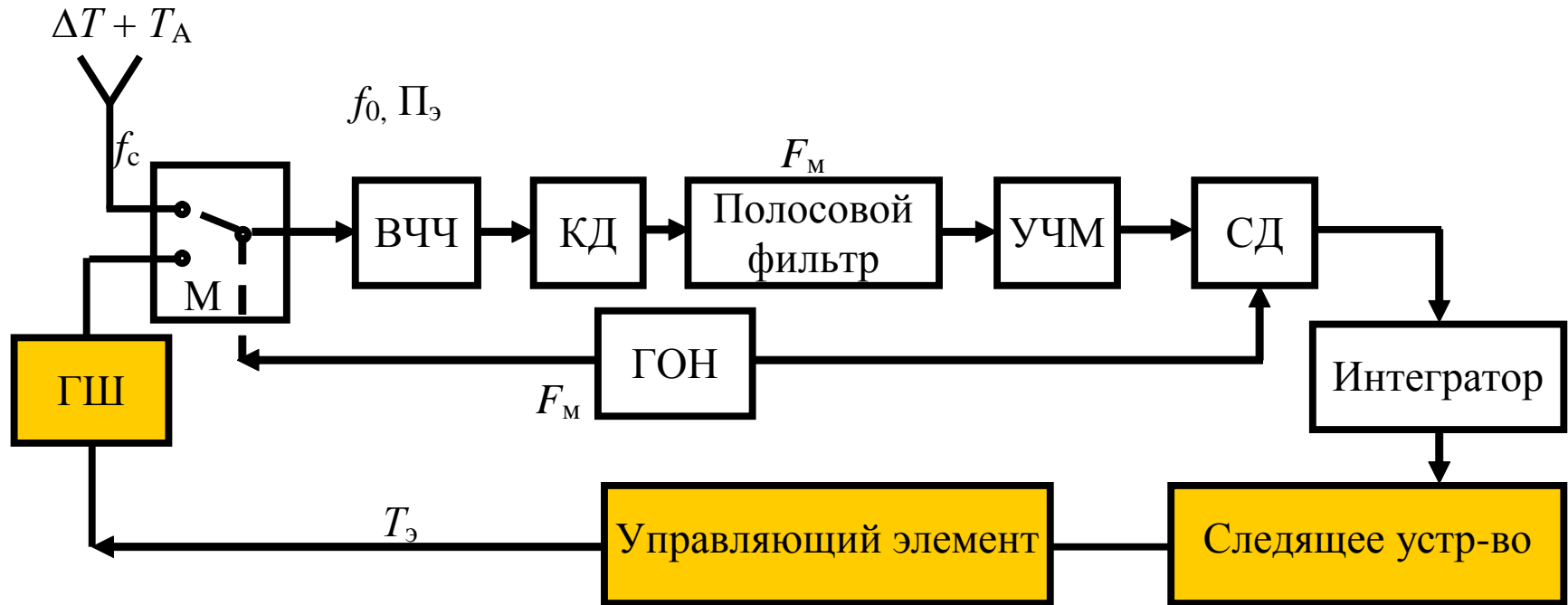
В результате чувствительность МР:

$$\Delta T_{\min \text{ мод}} = \gamma \frac{T_{c0}}{\sqrt{\Pi_{\vartheta} t_u}} \quad \gamma - \text{методический коэффициент} = 2...3$$

При  $T_a \neq T_{\vartheta}$  проявляется неустойчивость.

$$\Delta T_{\min} = \gamma T_{c0} \sqrt{\frac{1}{\Pi_{\vartheta} t_u} + \left( \frac{T_A - T_{\vartheta}}{T_c} \right)^2 \left( \frac{\Delta K_p}{K_p} \right)^2}$$

# Нулевой модуляционный радиометр

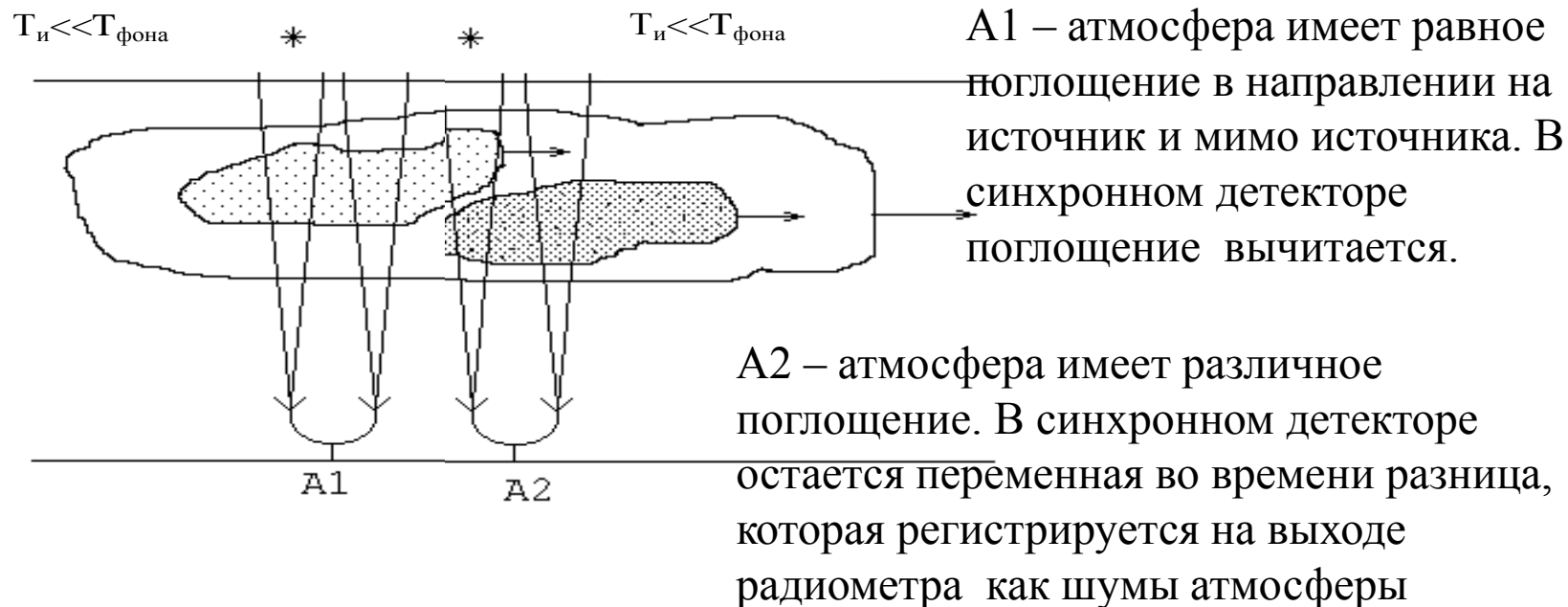


Выходная мощность ГШ регулируется так, чтобы выход приемника равнялся бы нулю.

Реагирует только на изменение входного сигнала.

# Радиометры с диаграммной модуляцией (РДМ)

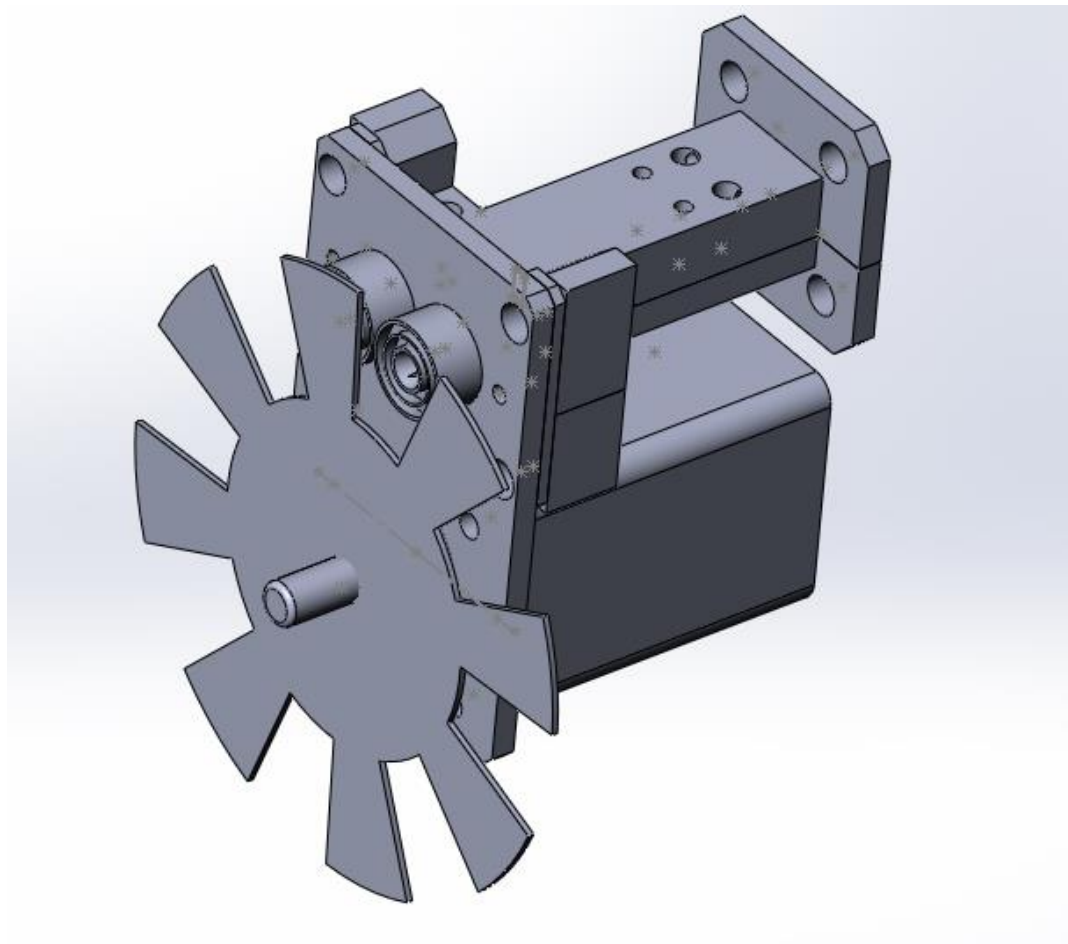
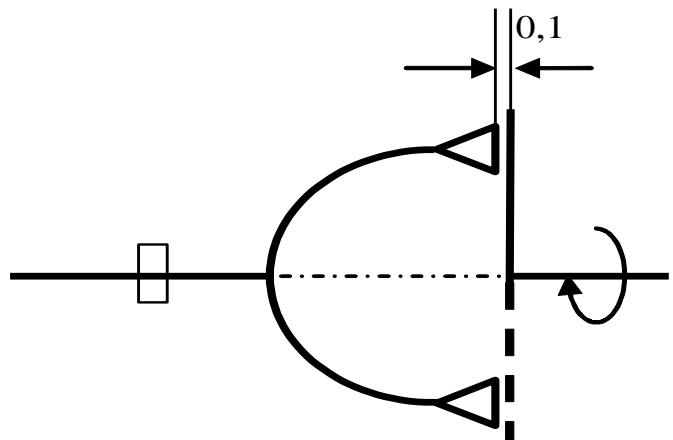
Используются для уменьшения шумов атмосферы.



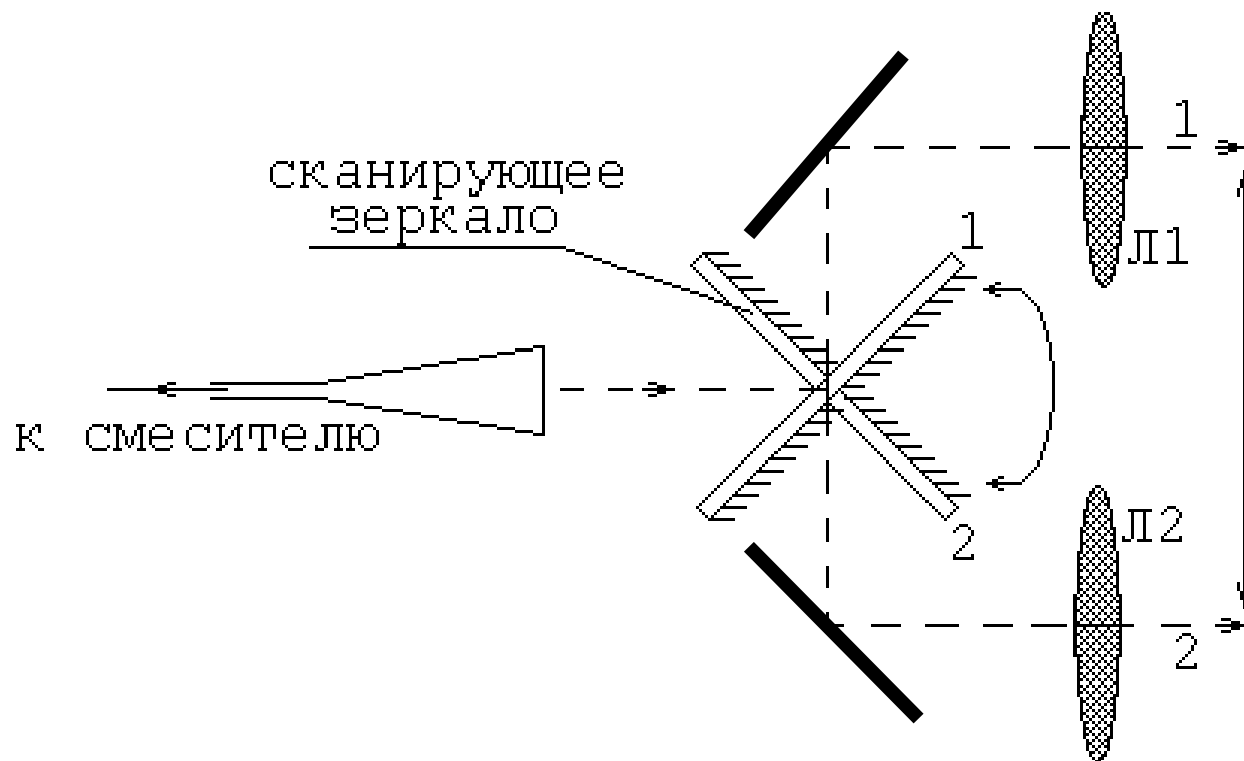
Вместо переключения “антенна-нагрузка” на входе приемника производится качание ДН с частотой  $F_m$  между двумя направлениями, одно из которых соответствует направлению на источник, а второе – мимо источника. Разнос диаграмм направленности должен быть меньше неоднородностей атмосферы.

Используется при наблюдениях за точечными источниками малой величины при наличии изменяющегося фона.

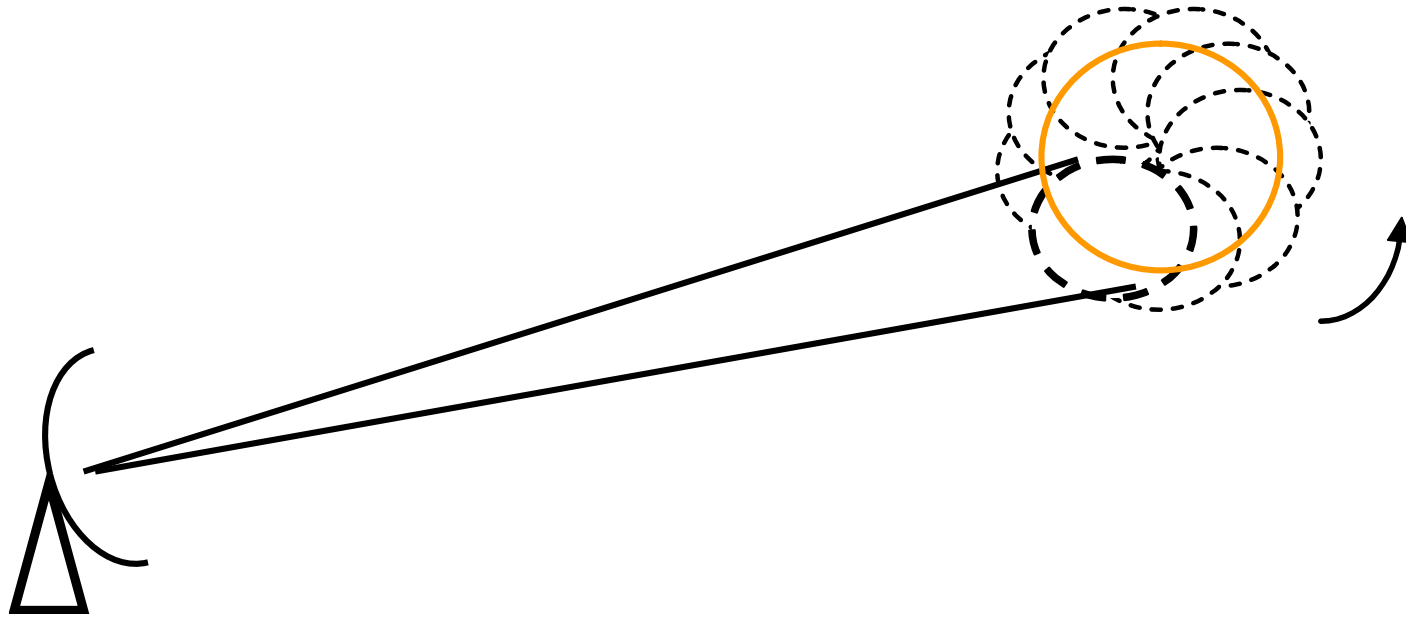
# Волноводный диаграммный модулятор для установки в первичном фокусе



Квазиоптический диаграммный модулятор разработан для установки во вторичный фокус.



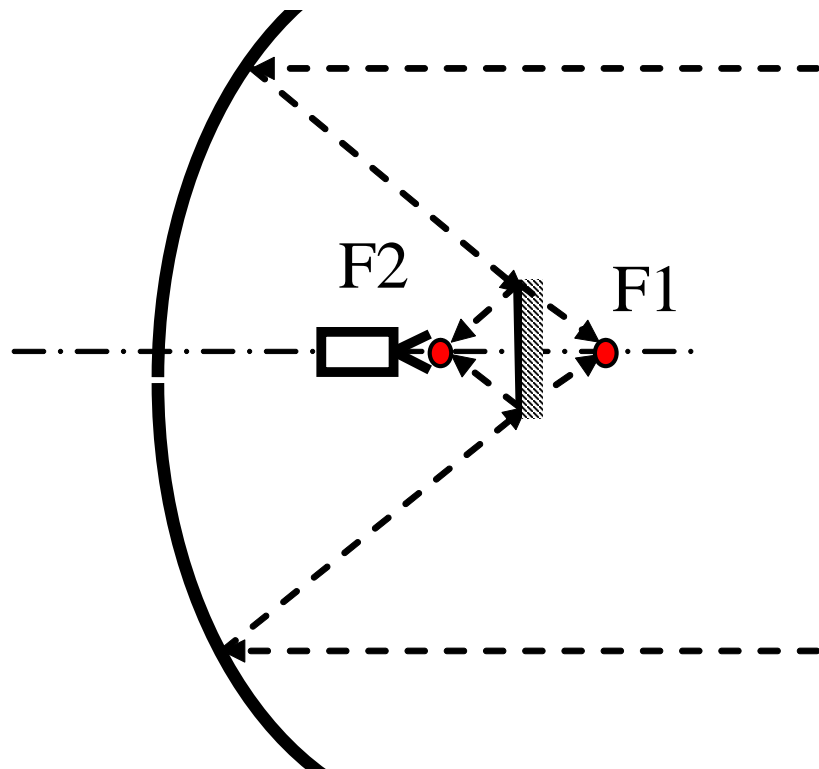
# Коническое сканирование



Используется при:

- атмосферных исследованиях,
- наблюдениях протяженных объектов (Солнца) малыми антеннами,
- зондировании природной среды и др.

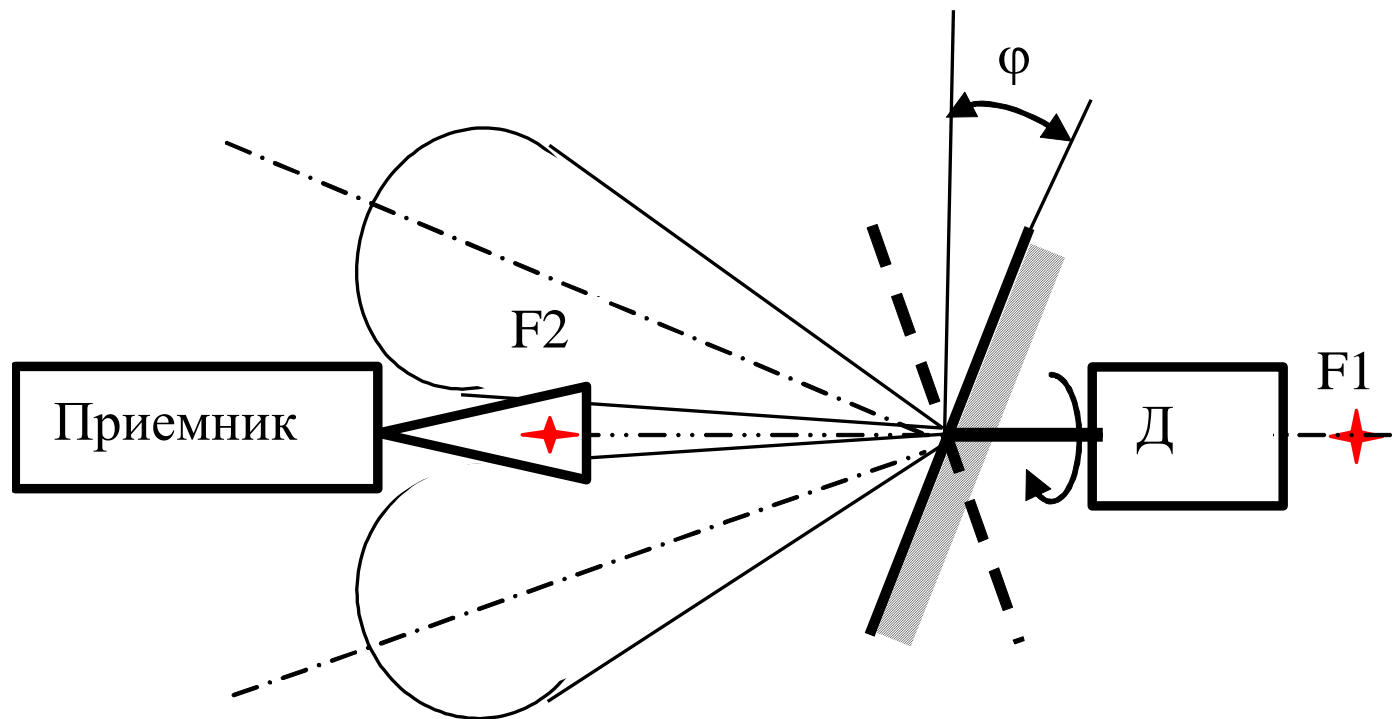
21.12.2020



Принцип: вблизи первичного фокуса F1 установлено прямое вращающееся зеркало отражающее приходящее излучение в фокус F2, где установлен облучатель приемника. Ось вращения зеркала не перпендикулярна к его отражающей поверхности.

Угол наклона зеркала выбирается из условий задач исследования, конструктивных соображений и места установки радиометра.





## Обзорные радиометры

В обзорных радиометрах высокой производительности можно сделать время наблюдения больше времени калибровки.

Т.е. между двумя калибровками может наблюдаться несколько элементов углового разрешения  $r$  за время  $t_0$ .

Если  $q$  – относительное время наблюдения от общего  $rt_0$ , то продолжительность калибровки  $t_k = rt_0 (1-q)$ .

Относительное время калибровки:  $\tau_k = \frac{t_k}{t_0} = r(1-q)$

При малости динамической ошибки методический коэфф.  $\gamma$ , зависит от  $q$  и  $\tau_k$ :

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{q} + \frac{1}{r(1-q)}}$$

Существует оптимальное распределение времени между наблюдением сигнала и калибровкой. Из условия  $d\gamma/dq=0$

$$q_{\text{опт}} = \frac{\sqrt{r}}{1 + \sqrt{r}}$$

При  $q=q_{\text{опт}}$  коэффициент  $\gamma$  – минимален:

$$\gamma_{\text{мин}} = \frac{1 + \sqrt{r}}{\sqrt{r}}$$

Если  $r=1$ ,  $q_{\text{опт}}=0,5$  и  $\gamma_{\text{мин}}=2$ .

Если  $r \rightarrow \infty$ , и  $\gamma_{\text{мин}} \rightarrow 1$ .

Если справедливы выше принятые предположение о малости динамической ошибки, то не зависит как распределено время на интервале  $rt_0$ .

Опорный уровень может быть получен при единственной калибровке протяженностью  $t_k = rt_0 (1-q)$ , или усреднением нескольких калибровок той же суммарной длительности.

Однако предпочтительно многократно быстро просматривать контролируемую область с накоплением результатов отдельных сканов по сравнению с однократным медленным обзором.

# Корреляционные радиометры

Для уменьшения  $P_{\text{собс.ш}}$ , организуют два независимых канала приема.

$U_{\text{Вых}}$  приемников перемножаются и результат интегрируется, что соответствует вычислению корреляционной функции.

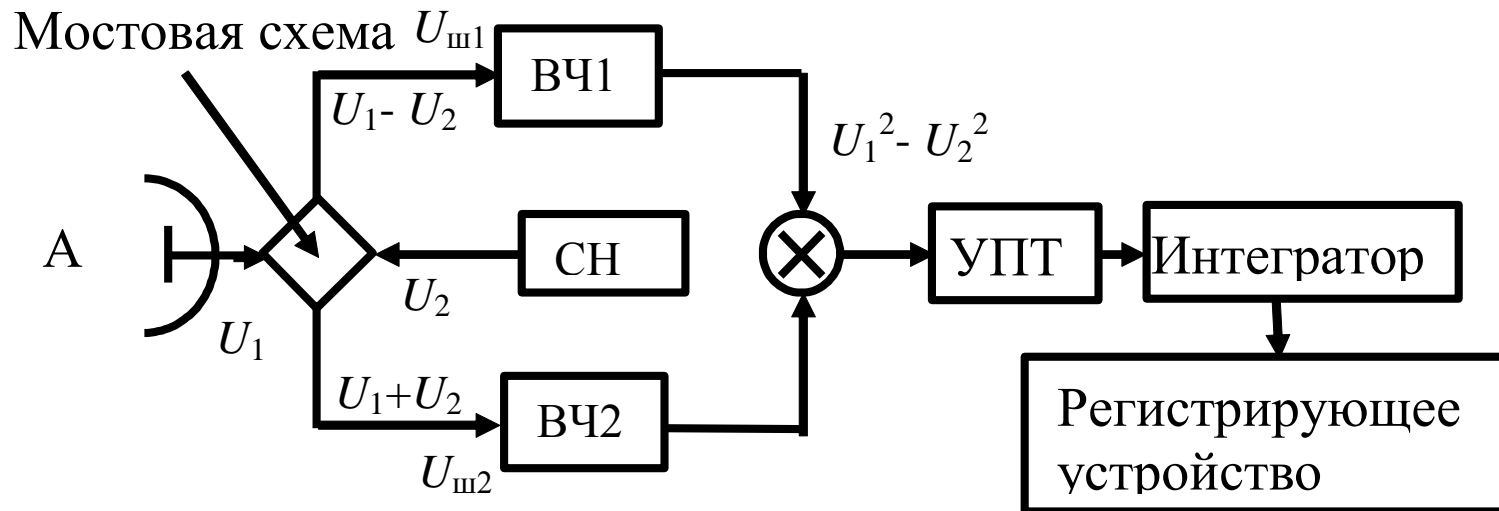
$$\Delta T_{\min} = \frac{T_{\text{сум}}}{\sqrt{P_{\text{э}} t_u} \sqrt{2}}.$$

В этом выражении  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{2}}$  меньше, чем в радиометре с полным приемом

Это следствие усреднения в корреляционном радиометре удвоенного числа независимых отсчетов

Тот же результат получается при суммировании сигналов двух радиометров с полным приемом

# Одноантенный корреляционный радиометр



$U_{ш1,2}$  - внутренние шумы приемников приведенные ко входу

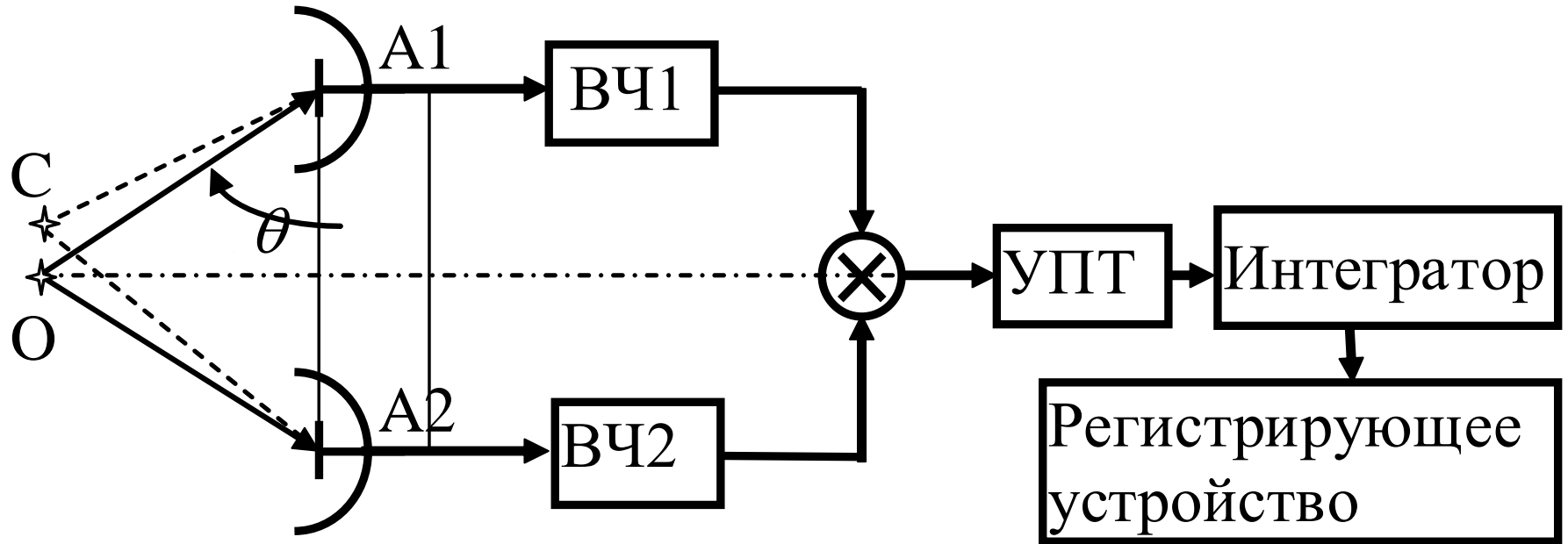
$$(U_1 - U_2 + U_{ш1}) * (U_1 + U_2 + U_{ш2}) = U_1^2 - \cancel{U_2 U_1} + \overset{0}{U_{ш1} U_1} + \cancel{U_2 U_1} - U_2^2 +$$

$$\overset{0}{U_{ш1} U_2} + \overset{0}{U_1 U_{ш2}} - \overset{0}{U_2 U_{ш2}} + \overset{0}{U_{ш2} U_{ш1}}$$

$U_1^2 - U_2^2 \cong T_A - T_H$

- Трудно перемножить без фазовых искажений,
- Трудно реализовать такую мостовую схему без потерь на входе.

# Двухантенный корреляционный радиометр (двухантенный интерферометр ДИ)

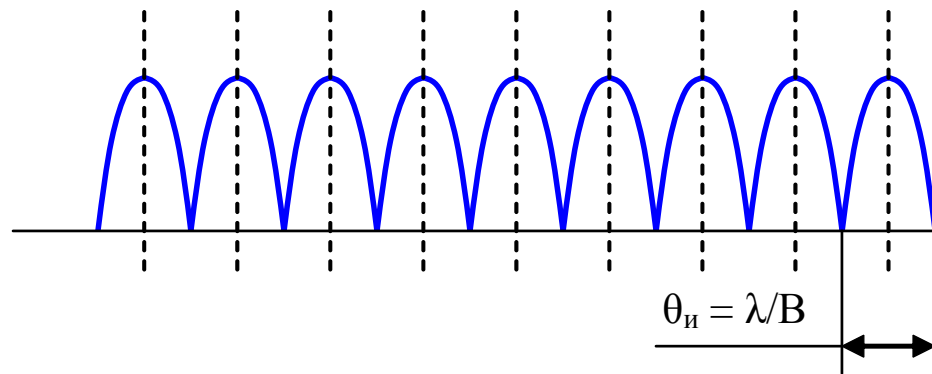


$OA1-OA2 = \lambda$ , на приемнике максимум сигнала.

$CA2-CA1 = \lambda/2$ , на приемнике минимум сигнала.

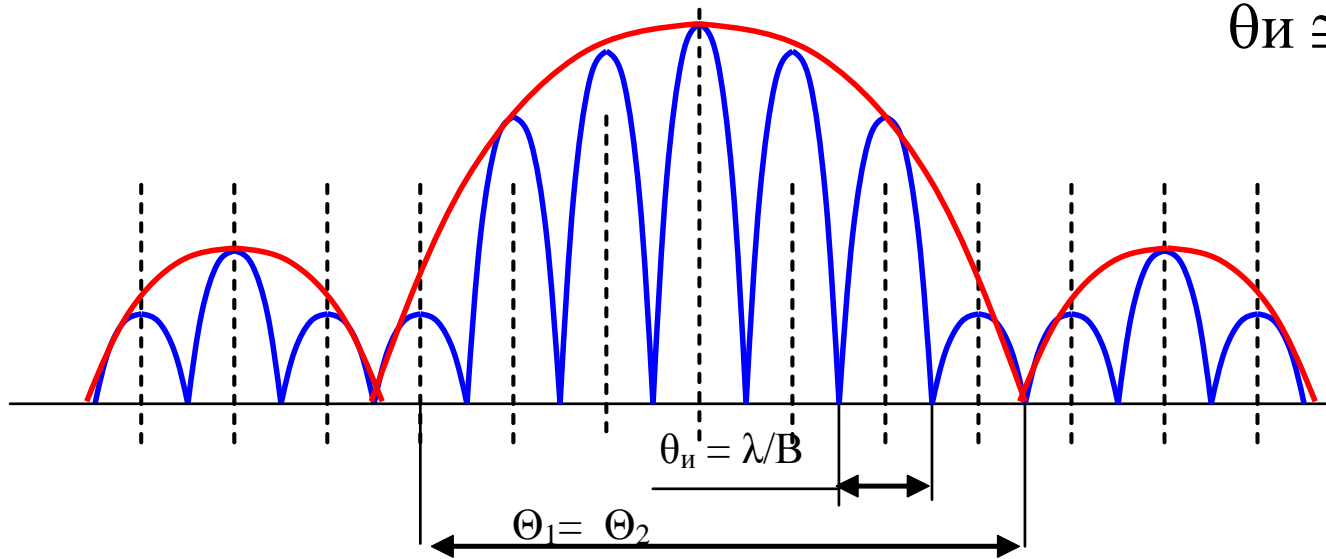
$\theta$  - угол между направлением на источник и осью интерферометра

$$\Delta T_{\min} = \frac{T_{\text{сист}}}{\sqrt{P_{\text{э}}} \tau \sqrt{2} \cos \varphi}, \quad \varphi = \frac{2\pi B \vartheta}{\lambda}$$



Суммарная ДН, при  
ненаправленных антеннах

$$\theta_{и} \cong \lambda/B.$$



Суммарная ДН, при направленных антеннах

Точечный источник моделируется  $\delta(\theta)$  функцией, его спектр пространственных частот бесконечно широк. ДИ называют «фильтр пространственных частот» с  $f=B/\lambda$ .

Для сигнала необходимо отсутствие набега фаз в ВЧ частях радиометров (оба радиометра должны быть идентичными и когерентными). Набег фазы приводит к разрушению периодически изменяющегося сигнала.

ДИ дает большое пространственное разрешение на ММ волнах.

При  $B = 250$  м и  $\lambda = 3$  мм  $\theta_{\text{и}} \cong \lambda/B < 1$  угл.с.

**Интерферометр с большой базой** ( $B = D_{\text{земли}}$ ) на  $\lambda = 1$  см

$\theta_{\text{и}} \cong 10^{-3} \dots 10^{-4}$  угл.с.

Трудности ИСДБ (интерферометров сверх длинной базой):

- 1) высокая симфазность регистрируемых сигналов, для чего необходимо иметь водородный синхронизатор частот  $\alpha = 10^{-20}$ ,
- 2) для обработки больших объемов информации необходимы вычислительные машины большой производительности.

Программа «Радиоастрон» -интерферометра с базой  $D_{\text{земли}}$ .



# Антенны и приемники радиотелескопов

Радиотелескопом называют комплекс аппаратуры:

- антенну или несколько антенн с линиями связи между ними,
- приемную аппаратуру с аналоговой и цифровой обработкой сигнала,
- аппаратуру управления.

Задача радиотелескопа — формирование качественного, с высоким разрешением изображения небесного объекта.

Чувствительность РТ зависит от :

- площади антенного устройства, которая определяет  $G$  ( $K_{\text{исп.А}}$ ) ,
- разрешающей способности, которая зависит от его размера.

Радиотелескопы различают с заполненной и незаполненной апертурой антенны.

Первый в мире радиотелескоп построен в 1938 году Гротом Роббером и имел антенну в виде параболического зеркала.

# Параболические полноповоротные с заполненной апертурой (СМ и ММ)

Разрешение пропорционально отношению  $\lambda/D$ .

Физические размеры - 50-100 м (ограничение текучесть металлоконструкций)

## Антенна

**Радиотелескоп  
Национальной  
радиоастрономической  
обсерватории (Япония)**

**Диаметр зеркала – 45 м**

Диапазон – 20...150 ГГц  
(15...2,0 мм)

КИП – 29% на  $f=115$  ГГц  
ДН –  $\sim 25''$ (угл.с) на  $\lambda=2,6$  мм

Точность слежения –  $\sim 3...6''$

Оптическая система  
Кассегрена-Несмита  
Контррефлектор  
гиперболическое  
зеркало  $D=4$  м



«Земляные чаши» отражающая поверхность связана с землей.

Недостаток - ограничен обзор пространства.

В длинноволновых диапазонах СВЧ хорошее разрешение получить невозможно.

РАТАН600

ЗЧ



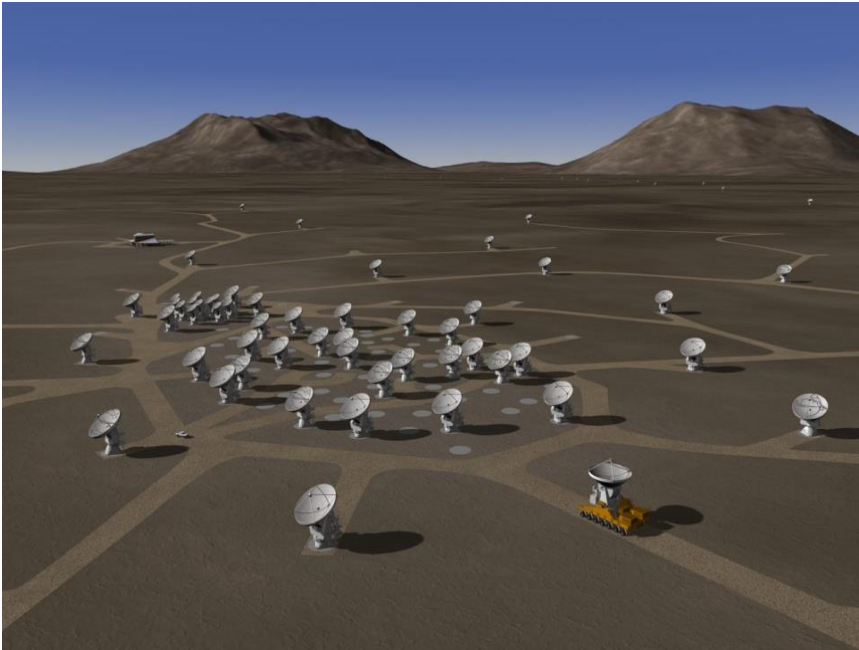
# **Антенны с незаполненной апертурой.**

Пример: способ формирования изображения двухантенным интерферометром.

Принцип: перераспределяют в пространстве доступную собирающую поверхность радиотелескопа.

**Системы параллельного синтеза** – крестообразные, кольцевые радиотелескопы, различные решетки.

ALMA фото



**Системы последовательного синтеза** – фазочувствительные интерферометры с переменной базой и другие системы

В Чили достроен самый большой и самый дорогой в мире РТ.

**ALMA - Atacama Large Millimeter Array**. Стоимость 1,5 миллиарда долларов. Последняя антенна доставлена 13 июня 2014 года.

Система состоит из 66 антенн. 54 — с диаметром «тарелки» 12 метров, и 12 — 7 метров. Антенны размещены на плато Чахнантор в пустыне Атакама, Чили, на высоте — 5 тысяч метров над уровнем моря.

Проект, реализовывался силами сразу нескольких организаций, из разных регионов, включая Европу, Северную Америку, Восточную азию. Европейская южная обсерватория, Национальная радиоастрономическая обсерватория, Национальный научно-исследовательский совет Канады, Национальная астрономическая обсерватория Японии, Институт астрономии и астрофизики Академии Синика (ASIAA) и республика Чили.

ALMA воспринимает спектр излучения с длиной волны миллиметр и меньше. Ранее радиотелескопы не отслеживали (за редкими исключениями) этот диапазон, но теперь ученые получили новый, мощный инструмент, способный, по выражению одного из участников проекта «прорубить окно во Вселенную».

Сигнал, поступающий с антенн, обрабатывается отрядом китайцев суперкомпьютером производительностью в 17 квадриллионов операций в секунду.

21.12.2020

# **Основные характеристики радиотелескопов.**

## **Технические характеристики:**

- $S_{\text{эфф}}$  – эффективная площадь РТ или собирающая поверхность,
- $\Omega_a$  – эффективный телесный угол диаграммы ДН,
- $T_{\text{ш}}$ , [К]- шумовая температура антенны (или всей системы с приемным устройством),
- $T_{Amin} = \Delta T_A$  [К]- чувствительность радиотелескопа по приросту антенной температуры.

## **Радиоастрономические параметры определяют наблюдательные возможности радиотелескопа.:**

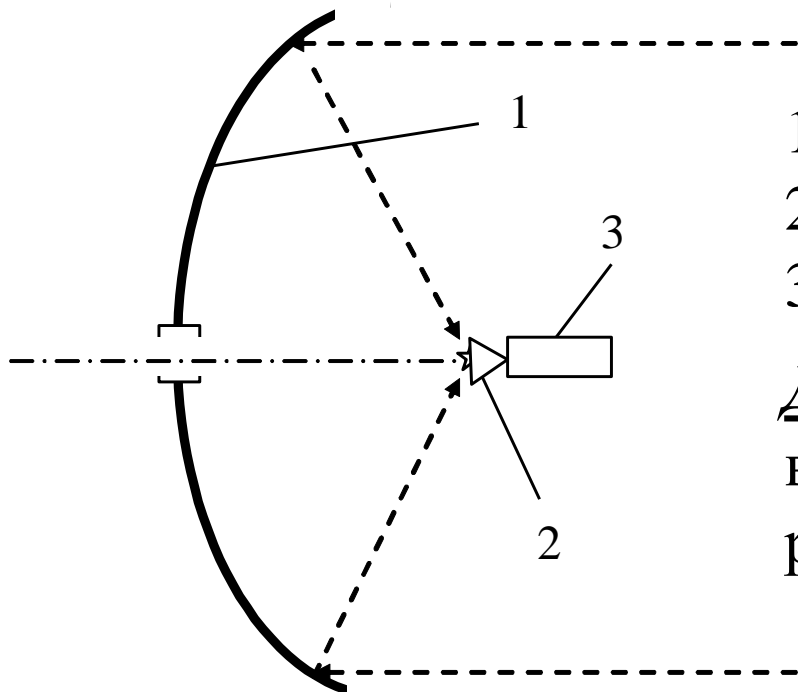
- $P_{min}$  [Вт/м<sup>2</sup>]- чувствительность по плотности потока радиоизлучения,
- $T_{\text{яmin}}$  [К]– чувствительность по яркостной температуре.



# Системы облучения антенн миллиметровых РТ.

При облучении из первичного фокуса -  $\vartheta_{\text{обл}} \cong 120^\circ$ .

Облучатель - пирамидальный рупор малых размеров.



1 – основное зеркало (антенна),  
2 – рупорный облучатель  $\vartheta_{\text{обл}} \cong 120^\circ$ ,  
3 – приемник

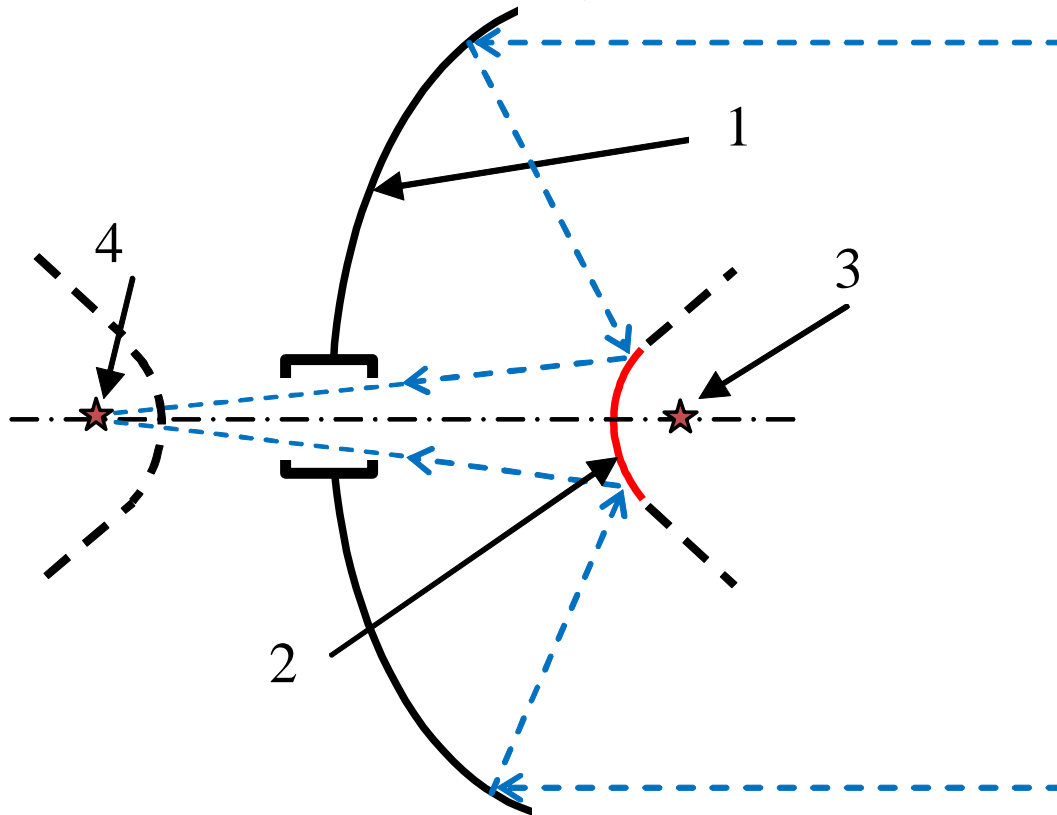
**Достоинство** – простота и  
возможность получения предельного  
разрешения.

## **Недостатки:**

- невозможность размещения более одного приемника в фокусе,
- трудность обслуживания (для антенн большого диаметра),
- большая затененность антенны приемником (для антенн малого диаметра) и др.

При облучении из вторичного фокуса -  $\vartheta_{\text{обл}} \cong 10^0$ .

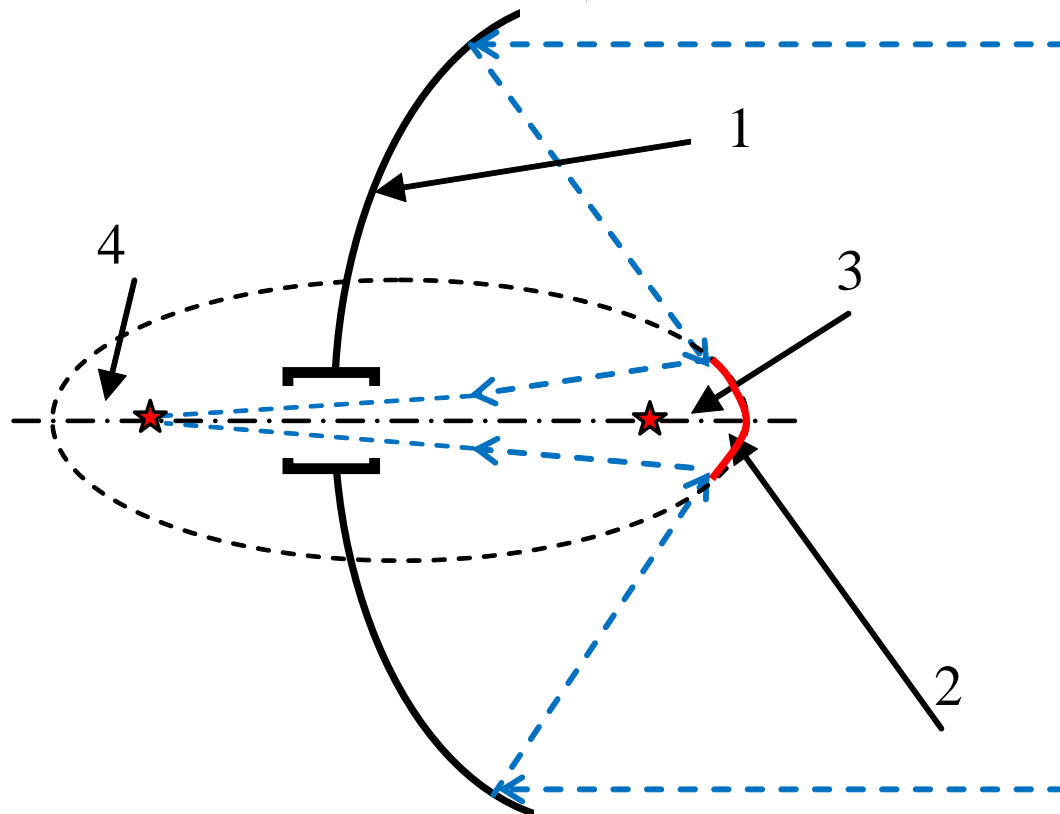
### Система облучения Кассеграна



1 – основное зеркало (парабола), 2 – вспомогательное (гипербола), 3 – первичный фокус, 4 – вторичный фокус.



## Система облучения Григори



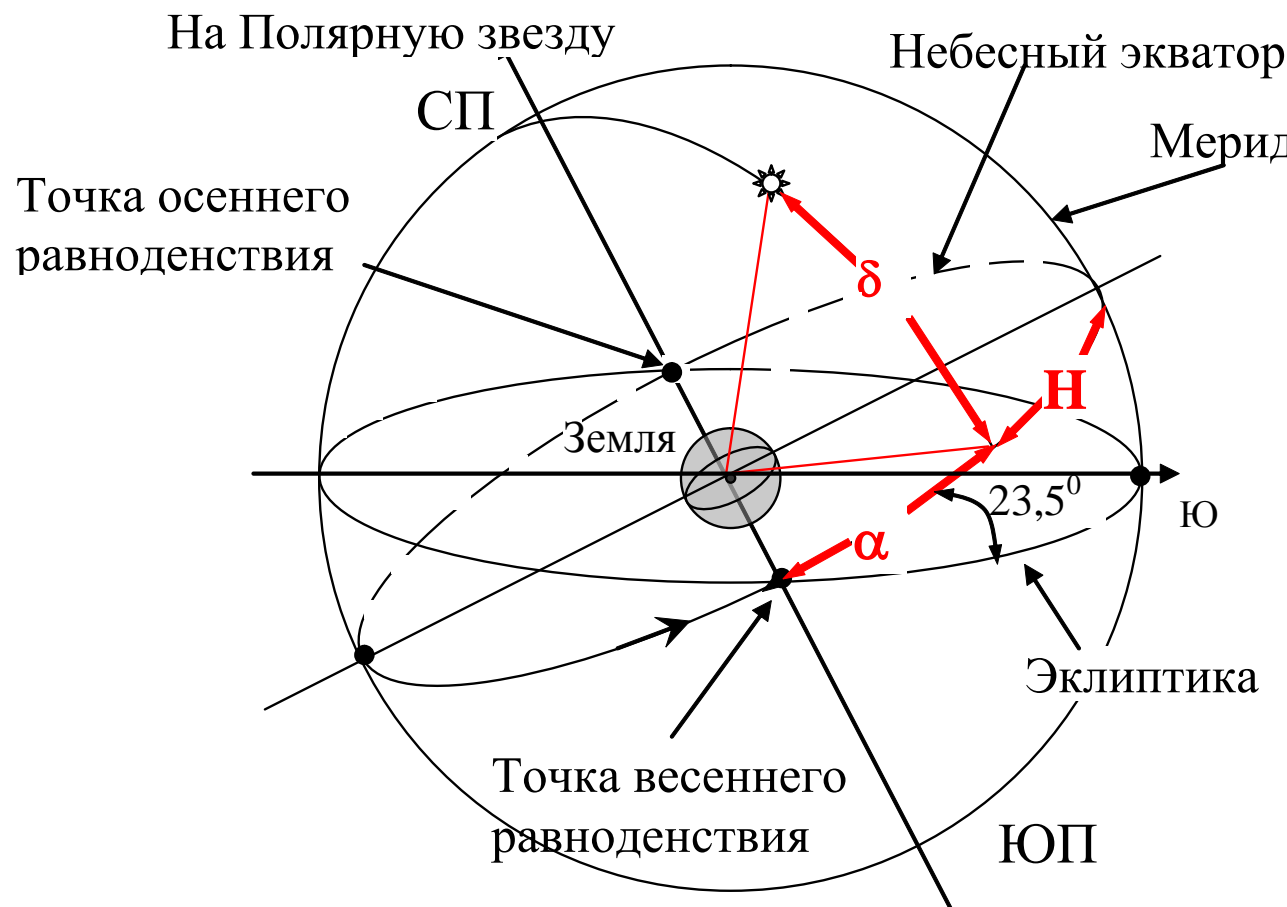
1 – основное зеркало  
(парабола),  
2 – вспомогательное  
(эллипс),  
3 – первичный фокус,  
4 – вторичный фокус.

Диаметр вспомогательного зеркала  $d=0,1D$ , что составляет 1% затенения площади поверхности основного зеркала.

Недостаток: большой размер рупорного облучателя.

# Системы наведение антенн радиотелескопов

Азимутально-зенитная (A, Z) и экваториальная ( $\alpha$ ,  $\delta$ ) монтировки  
Положение АИ задают в системе экваториальных координат (ЭК).



1-ая система:  
склонением  $\delta$  и  
прямым  
восхождением  $\alpha$ ;

2-ая система:  
склонением  $\delta$  и  
часовым углом  $H$

# Антенны Радиотелескопа МГТУ

## Восточная и западная антенны РТ-7,5

- наблюдений естественных КИ радиоизлучения,
- картографированию Солнца,
- наблюдений искусственных КИ (спутников),
- исследования контрастов наземных объектов,
- атмосферных исследований.

Антенны имеют азимутально-зенитную (АЗ) монтировку.

- Азимутальный угол ( $A$ ) отсчитывается от направления на юг, в градусах.
- Зенитный угол  $Z$  также измеряется в градусной мере от зенита ( $0 \leq Z \leq 90^\circ$ ).
- При пересчете ЭК астрономических объектов в АЗ систему необходимо знание точных географических координат места установки Радиотелескопа.

**Западная антенна РТ-7,5**



**Восточная антенна РТ-7,5**



**Рабочий диапазон:** от 1 см до 1 мм.

$$G = \frac{4\pi S_{\text{эфф}}}{\lambda^2}.$$

Нижняя граница ограничена размерами зеркала. На  $\lambda > 1$  см коэффициент усиления становится низким.

Верхняя  $\lambda < 1$  мм ограничивается точностью изготовления поверхности зеркала.

**Крупномасштабные ошибки:**

отклонение формы зеркала от параболы и различные деформации (тепловые, весовые и т.п.) ведут к искажению ДН: расширению, несимметричности, возрастанию боковых лепестков, и как следствие - уменьшение коэффициента усиления  $G$ .

$$G = \frac{4\pi}{\Omega_a}.$$

**Мелкомасштабные ошибки** (отклонение от зеркальности) приводит к уменьшению коэффициента использования поверхности КИП антенны, т.е.  $S_{эфф}$ .

$$G_0 = \frac{4\pi S_{эфф}}{\lambda^2}. \quad G = G_0 \exp \left[ - \left( 4\pi \frac{\xi_{ср.кв}}{\lambda} \right)^2 \right]$$

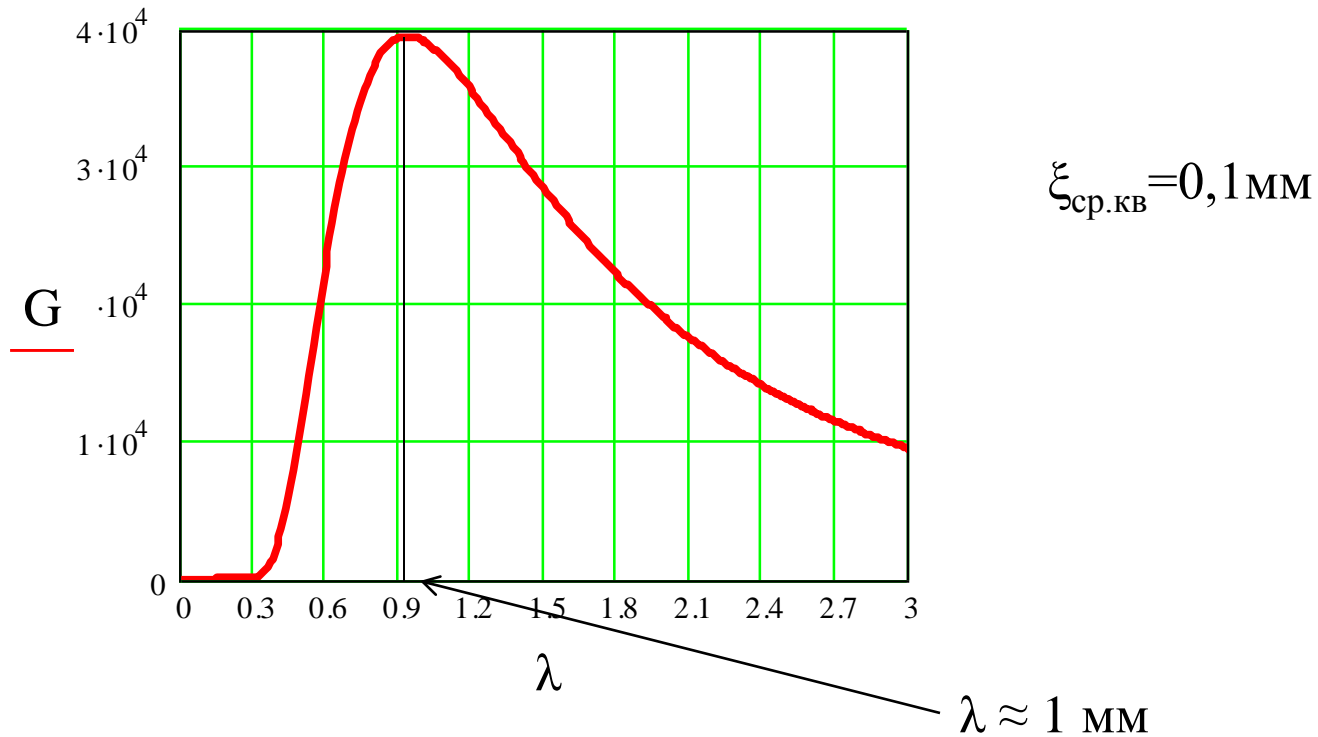
$G$  – коэффициент усиления на  $\lambda$  при  $\xi_{ср.кв}$ .

$G_0$  – коэффициент усиления при отсутствии ошибок  $\xi_{ср.кв}=0$ .

При  $\xi_{ср.кв}=\lambda/25$ ,  $G = 0,8 G_0$  (от максимального).

С уменьшением  $\lambda$  коэффициент усиления  $G$  растет как  $\lambda^2$ , следовательно для антенны с  $\xi_{ср.кв}$  существует  $\lambda$ , на которой усиление максимально:

$$\lambda = 4\pi \xi_{ср.кв}$$



При заданном коэффициенте использования поверхности КИП и заданной  $\lambda$  максимально можно получить усиление:

$$G_{\max} = \frac{K_{ип}}{43} \left( D / \xi_{cp.kv} \right)^2$$

**Антенна, РТ-0,6** предназначенная для солнечных наблюдений.

Система наведения выполнена с экваториальной монтировкой, т.е. ось вращения антенны совпадает с полярной осью.

Для слежения за объектом М на небесной сфере достаточно обеспечить равномерное вращение антенны синхронно с суточным вращением небесной сферы.

Для наведения по координате  $\delta$  достаточно изменять угол наклона зеркала относительно полярной оси.

**Антенна, РТ-2** полноповоротная, предназначенная для спутниковых наблюдений.

Система наведения - азимутальная.

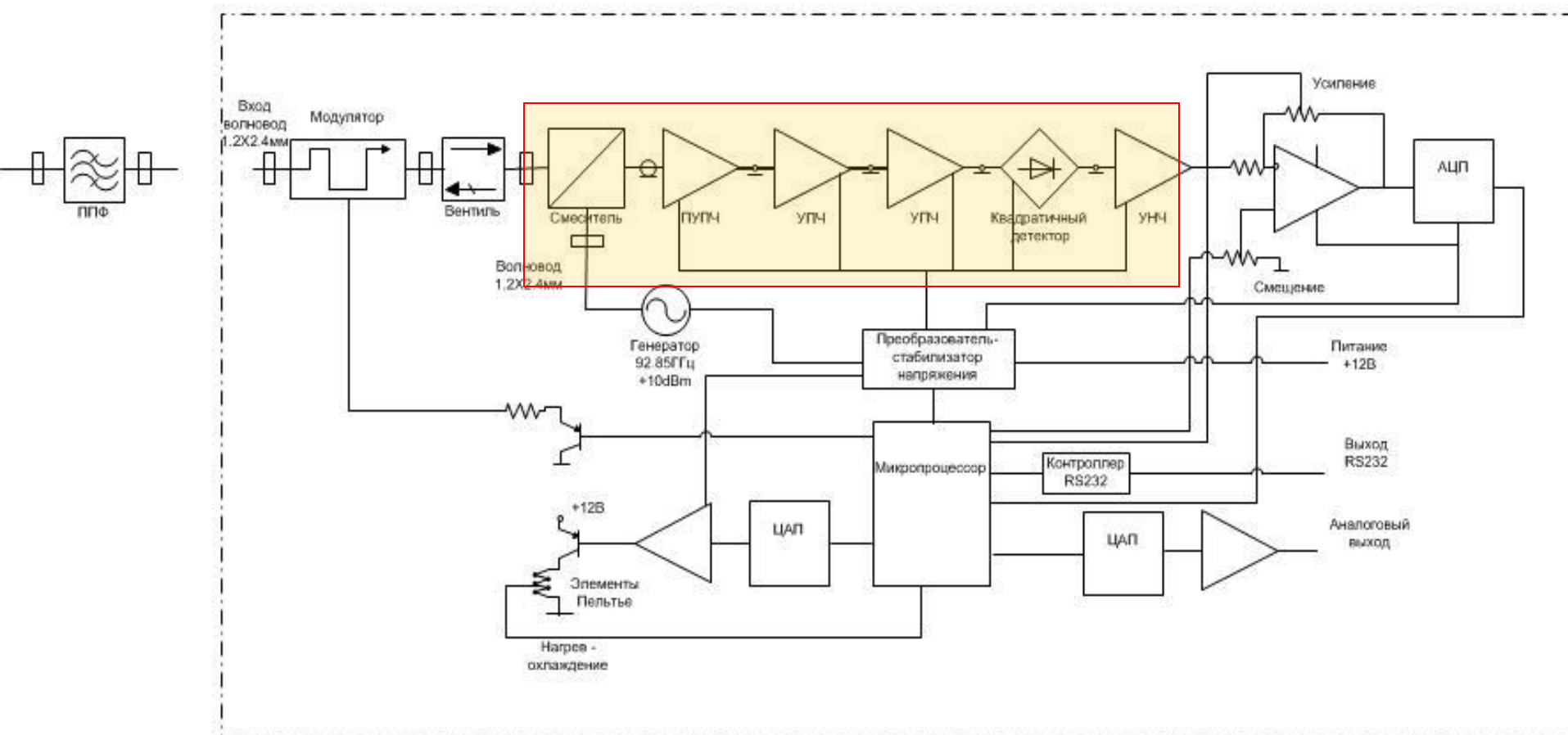
Скорость движения достаточна для слежения спутниками.

Управление программное. Используется для исследований , связанный с навигационными системами.



# Приемники на 3,2 и 2.2 мм, установленные на антенне РТ-7,5 МГТУ

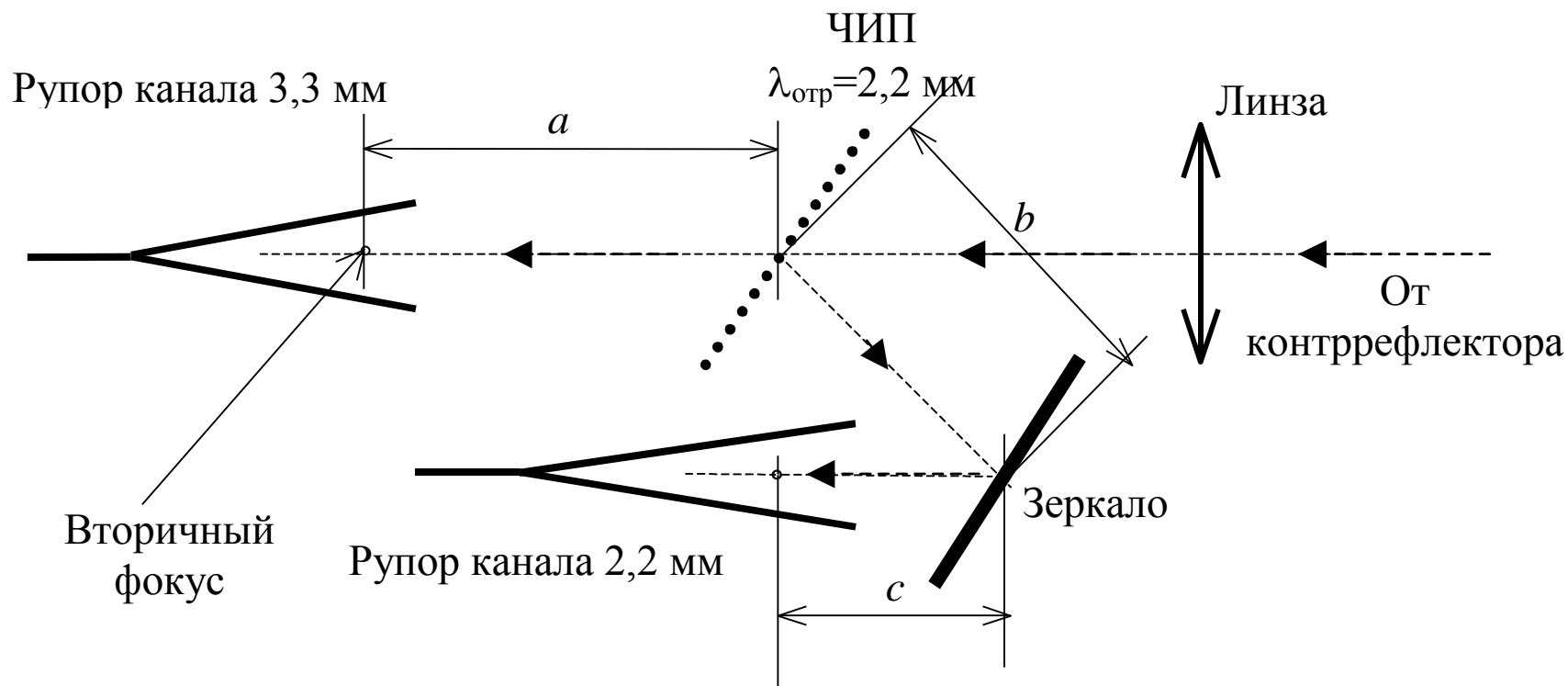
Структурная схема радиометра  
3-мм диапазона



**Двухдиапазонный приемник.** Приемник состоит из двух идентичных супергетеродинных каналов 94 и 140 ГГц.

Приемник устанавливается во вторичном фокусе антенны.

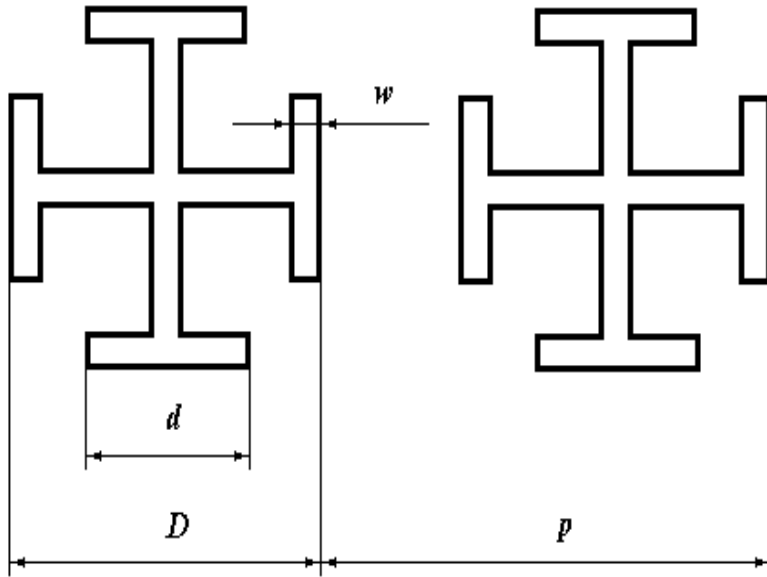
Квазиоптическая схема разделения каналов.



## ЧИП -частотно-избирательные поверхности

Распространенные формы рассеивающих элементов: «кольцо», «квадратная рамка», «иерусалимский крест».

Для иерусалимского креста размерами  $d/D = 0,54...0,06$  и  $w/D = 0,12$  хорошее совпадение резонансных частот и формы частотных характеристик.



Рассчитаны и изготовлены методом фотолитографии ЧИП

$p = 1,07$  мм,  $D = 0,6$  мм,  $d = 0,35$  мм,  $w = 0,07$  мм.

Толщина полиимидной подложки 50 мкм, толщина металлизации 10 мкм.

# Измерение эквивалентной шумовой температуры радиометра $T_{c0}$

$$T_{c0} = \frac{\Delta T_{\min} \sqrt{P_{\text{э}} t_u}}{\gamma}$$

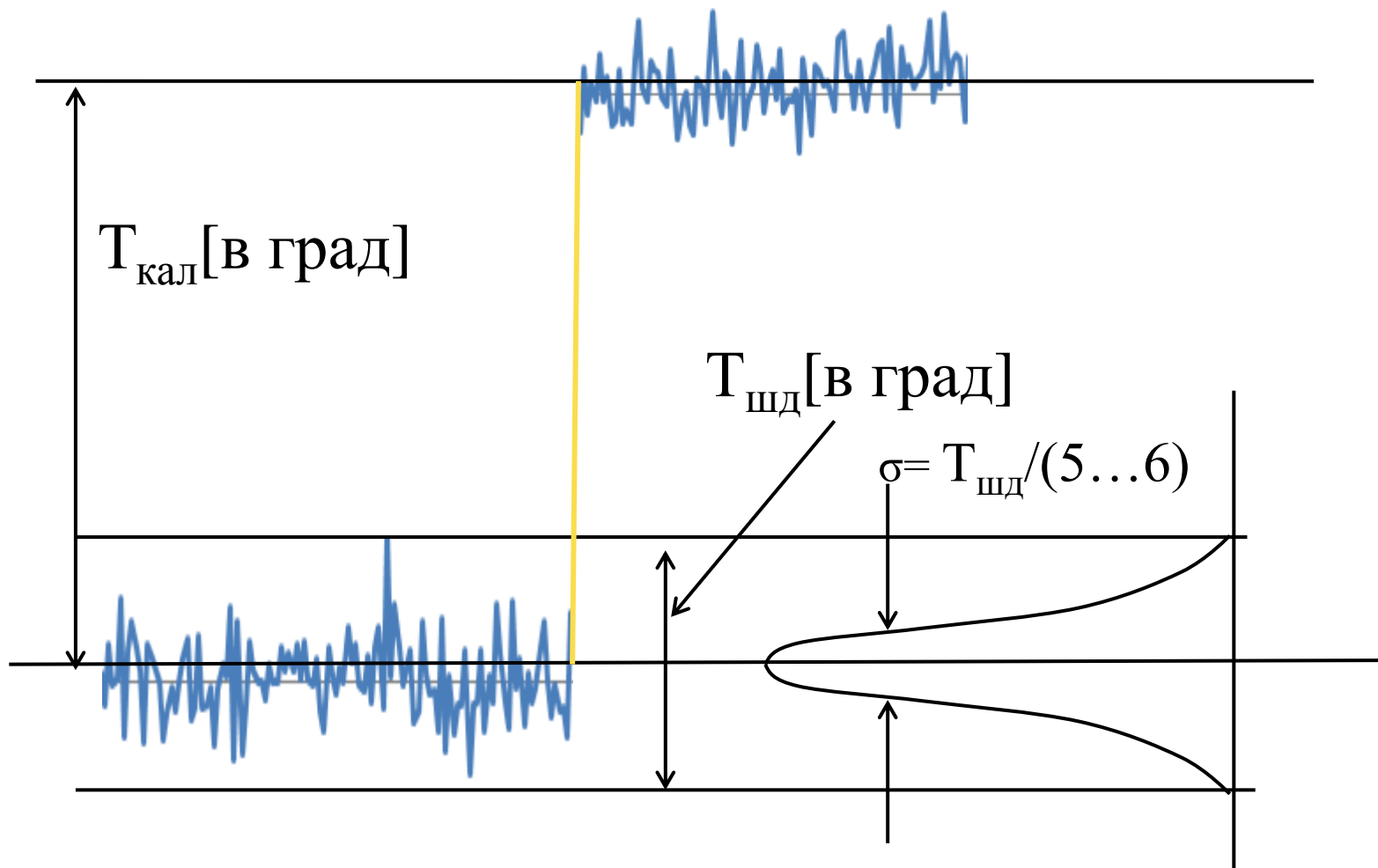
$$\gamma = 2 \dots 3$$

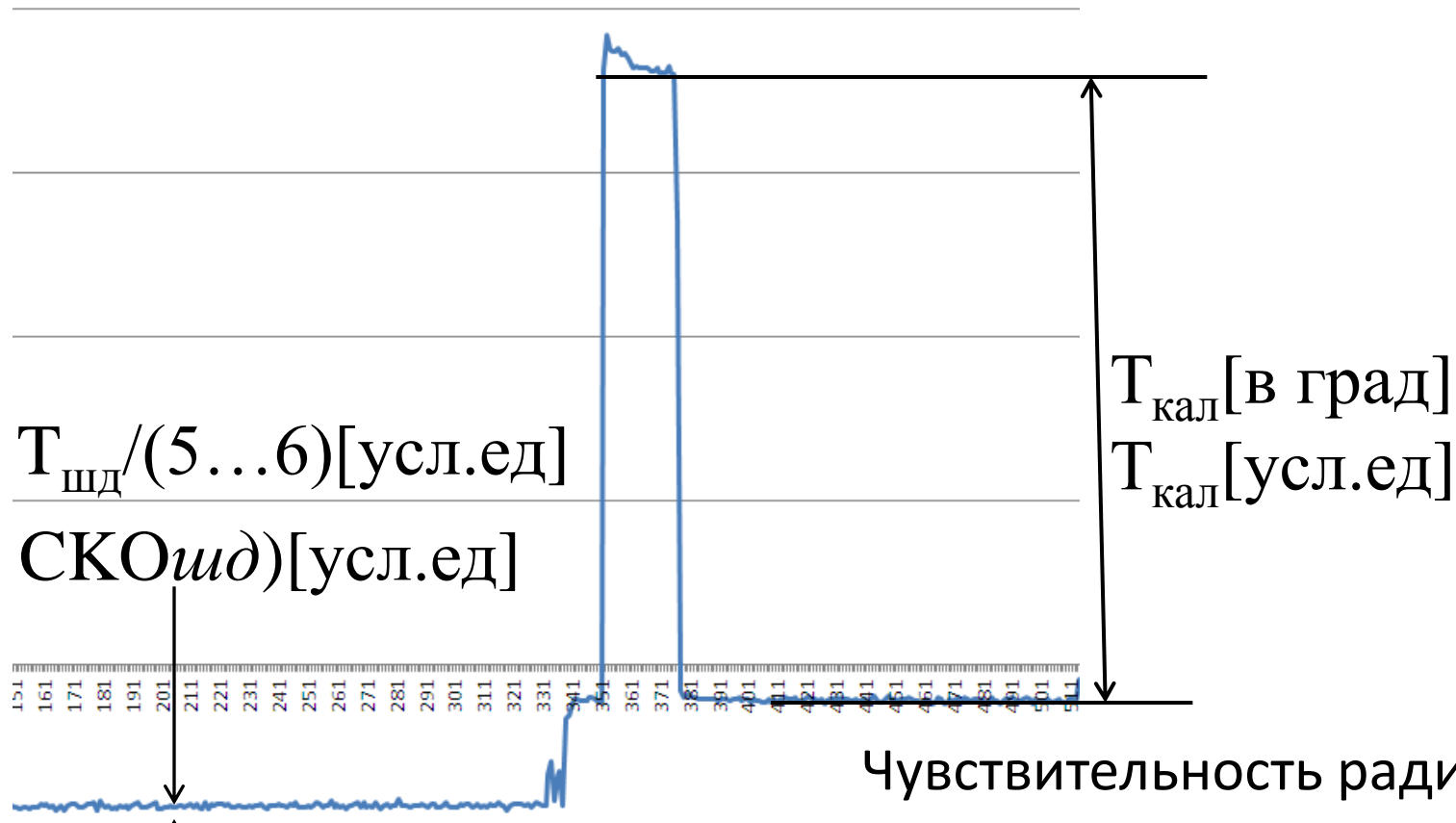
$$P_{\text{э}} \quad ?$$

$$t_u \quad ?$$

$$\Delta T_{\min} \quad ?$$

*Флуктуационная чувствительность соответствует такому приращению антенной температуры  $\Delta T_{\min}$ , которое вызывает на выходе накопителя сигнала квадратичного детектора приращение постоянной составляющей, равное его среднеквадратическому отклонению (СКО).*





$$\Delta T_{\min} [K] = \frac{T_{\text{кал}} [K] \cdot T_{\text{шд}} [\text{усл.ед}]}{T_{\text{кал}} [\text{усл.ед}] \cdot (5 \dots 6)}$$

$$\Delta T_{\min} [K] = \frac{T_{\text{кал}} [K] \cdot \text{СКОшд} [\text{усл.ед}]}{T_{\text{кал}} [\text{усл.ед}]}$$