

Тема 5 (2)

МИКРОВОЛНОВЫЕ РАДИОМЕТРЫ

Схема радиометрического приёмного комплекса



Свойства радиотеплового комплекса:

1. принимать шумовое электромагнитное излучение в $\Delta f, r, \Delta \Omega$;
2. обладать высокой чувствительностью
3. обеспечить возможность однозначной привязки измеряемого потока излучения к (x, y, z) .

Составляющие

радиотеплового комплекса:

1. антенная система;
2. радиотепловой приёмник;
3. устройство предварительной обработки (управление антенной, сбор информации, калибровка, обработка);
4. устройство передачи и обработки информации для наземного комплекса.

МИКРОВОЛНОВЫЕ РАДИОМЕТРЫ

Схема радиометрического приёмного комплекса

Антенная система и приемное устройство:



Антенная система:

1. преобразование э.м. волны (свободное пространство – направляющие структуры);
2. согласование волнового сопротивления (своб. простр. – направл. структуры);
3. пространственно-угловая селекция сигнала для формирования полосы обзора;
4. однородные частотные свойства характеристик в рабочей полосе частот.

Радиометрическое

приёмное устройство:

1. РЧ усилитель - усиление сигнала в нужной полосе частот для КД;
2. квадратичный детектор;
3. ФНЧ.

Помехи:

1. АШ - $\text{Ш} \neq f(C) \rightarrow I_{\text{ш}} + I_{\text{с}}$;
2. МШ - $\text{Ш} = f(C) \rightarrow I_{\text{ш}} * I_{\text{с}}$.

МИКРОВОЛНОВЫЕ РАДИОМЕТРЫ

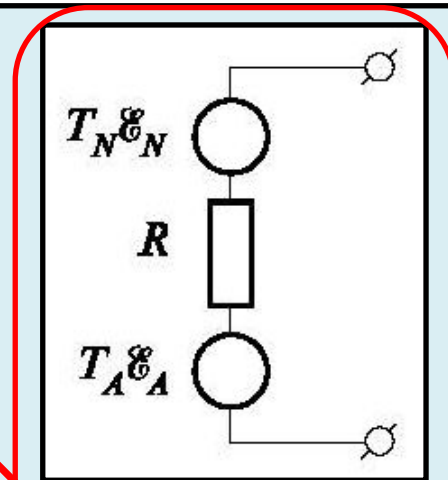
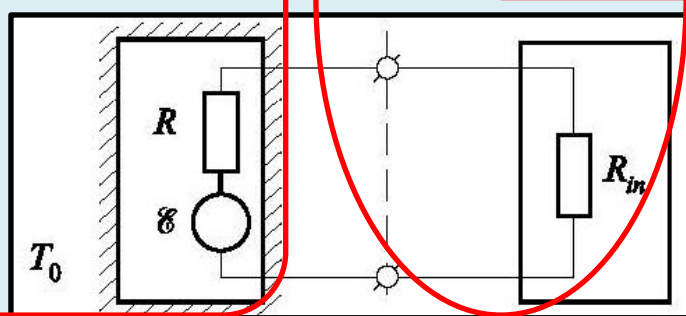
ЯЗЫК ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СХЕМ

Антенной температурой T_A называют термодинамическую температуру воображаемой согласованной нагрузки, подключенной ко входу приемника вместо антенны, которая создает такую же мощность тепловых шумов, что и рассматриваемая совокупность внешних источников.

Источн



шумканал



$$R_{in} = R \Rightarrow P_{\max} = \frac{E^2}{4R} \text{ условие согласования}$$

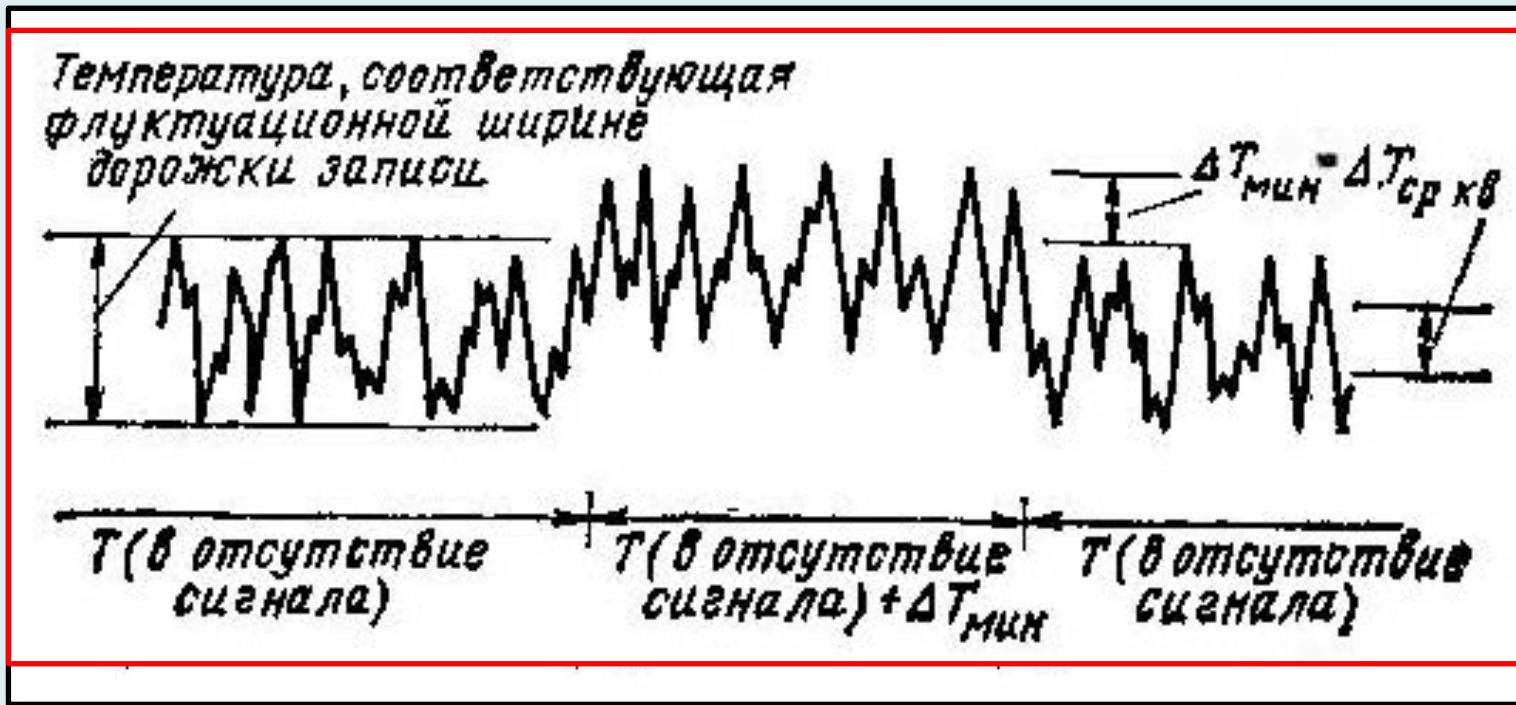
$$P = G^+(f) \Delta f = k T_A(f) \Delta f \rightarrow T_A(f) = \frac{G^+(f)}{k}$$

$$T_N = T_{N1} + T_{N2} + \dots T_{NM}$$

$T_A + T_N$
шумовая температура приемника

МИКРОВОЛНОВЫЕ РАДИОМЕТРЫ

Флуктуационный порог чувствительности радиометров



Порог чувствительности системы

$$\Delta T = \sigma_F = \sqrt{2} T_N \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} = \frac{T_N}{\sqrt{2 \Delta f \tau}}$$

$$T_N = 300 \text{ K}, \Delta f = 10^9, \tau = 1$$

↓

$$\Delta T_{\text{ir}} = 6.7 \times 10^{-3} \text{ K}$$

$$(N/S = \sqrt{2 \Delta F / \Delta f} = 10^{-4} - 10^{-5})$$

минимальное приращение антенной температуры радиометра, соответствующее среднеквадратичному отклонению флуктуаций его собственных шумов

МИКРОВОЛНОВЫЕ РАДИОМЕТРЫ

Флуктуационный порог чувствительности радиометров

Флуктуации мультипликативного типа

$$\overline{V_S} = \beta \sigma_N^2 = k_1 G_A(f) T_S(t) k \Delta f \Rightarrow G_A(f) \boxtimes \leftrightarrow T_S(t) \boxtimes ?$$

$V_S \boxtimes G_A(f)$

физические свойства приборов
усилительной системы (электронные
приборы, твёрдотельные приборы) \rightarrow $\begin{cases} G_{FN} = \frac{A}{f^\alpha}, & \alpha \approx 1, 0.6 \div 2 \\ A = const \text{ тип усилителя} \end{cases}$



Фликкер шум (фликкер-эффект)

Цветаые" шумы

$$\bar{P} = \sigma^2 = \int_0^\infty G(\omega) d\omega \rightarrow \infty \text{ расходится при } \omega \rightarrow \infty \Rightarrow$$

$$\tau \uparrow \Rightarrow NF \uparrow$$

МИКРОВОЛНОВЫЕ РАДИОМЕТРЫ.

Флуктуационный порог чувствительности радиометров

компонента шумового сигнала после КП

Фликкер шум

$$\sigma_{FN}^2 = \int_F^{F_0} G_{FN}(f) df \text{ дисперсия фликкер-шума}$$

$\Delta t = \tau =$ время накопления сигнала,

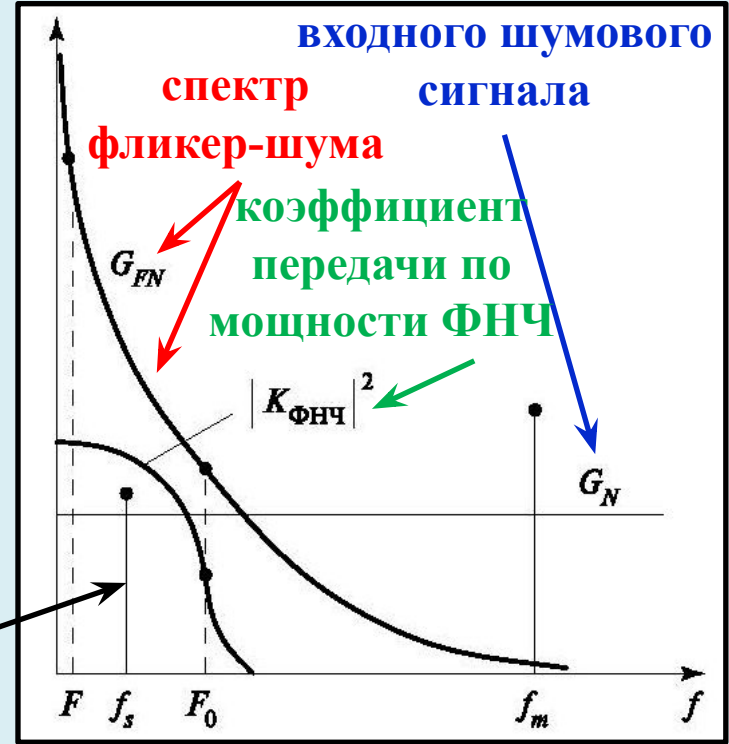
$F_{ниж}$ нижняя и верхняя граница ФНЧ,

$$S(f), FN(f) \in [F_0, F]$$

Порог чувствительности фликкер-шума

$$\Delta T_{FN} = T_N \frac{\sigma_{FN}}{G_A}$$

спектральная компонента
изучаемого сигнала



Чувствительность компенсационного радиометра
линейный коэффициент усиления мощности $= |K|^2$

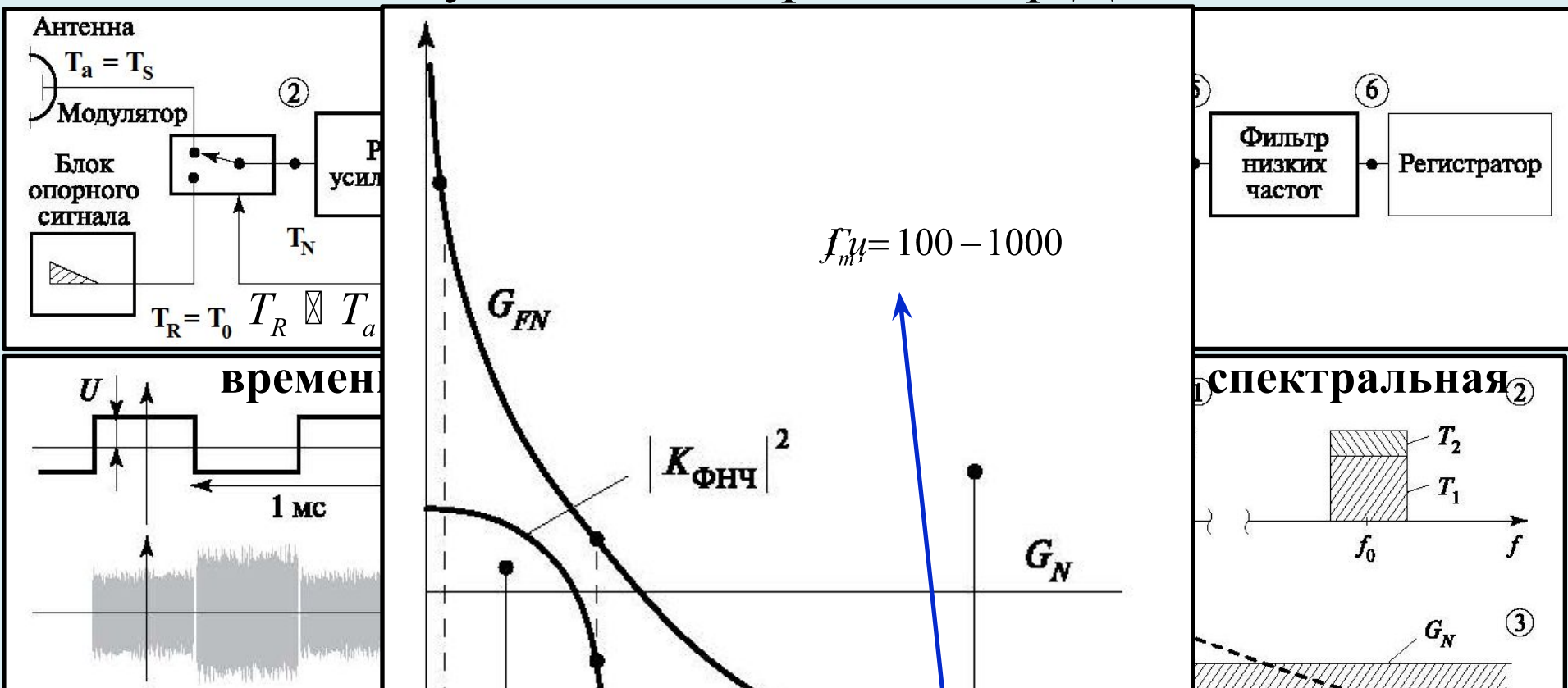
$$\Delta T = \sqrt{\Delta T_{ir}^2 + \Delta T_{FN}^2} = T_N \sqrt{\frac{1}{2\Delta f\tau} + \left(\frac{\sigma_{FN}}{G_A}\right)^2}$$

$$T_N \approx 300 K, \Delta f = 1 \text{ Hz}, \tau = 1 \text{ s} \Rightarrow \Delta T_{ir} = 10^9 \text{ K}$$

$$\tau = 1 \text{ c}, \sigma_{FN} = (10^{-2} - 10^{-3}) G_A$$

$$\Delta T = 3 \text{ K} \quad (\Delta T / \Delta T_{ir} \approx 450)$$

Модуляционный радиометр Дикке



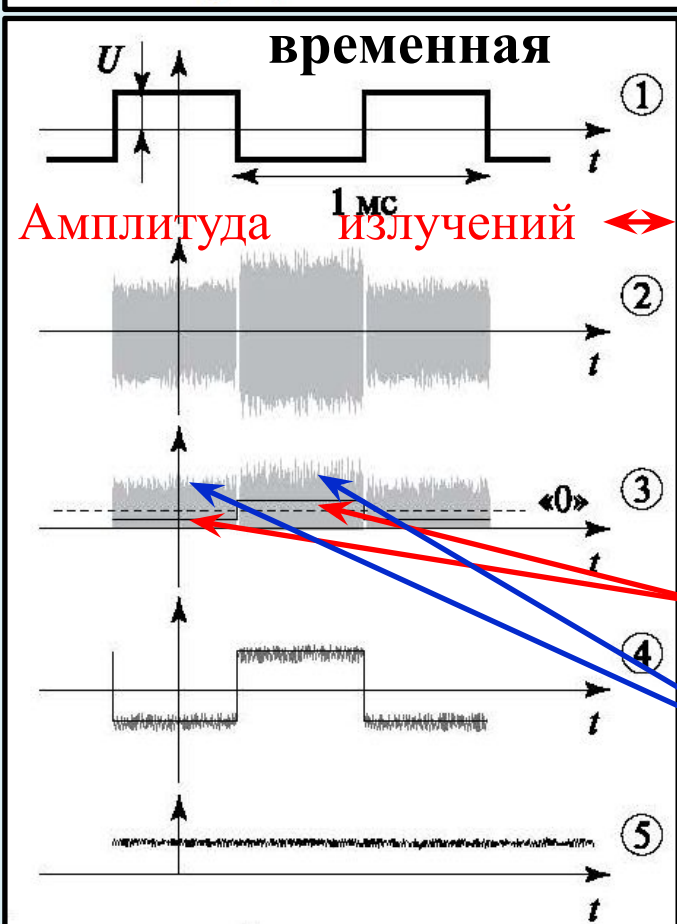
Амплитудно-фазовый спектр импульсного сигнала:

$$S(\omega) = U \frac{4}{\pi} \left(\cos \Omega t - \frac{1}{3} \cos 3\Omega t + \frac{1}{5} \cos 5\Omega t - \dots \right),$$

амплитуды спектра мощности

$$\Omega = 2\pi f_m, \quad A_N^{S(\omega)} \propto \frac{1}{(2N+1)}, \quad A_N^{|S(\omega)|^2} \propto \frac{1}{(2N+1)^2}, \quad N = 0, 1, 2, \dots$$

Модуляционный радиометр



циклограмма

Интенсивность:

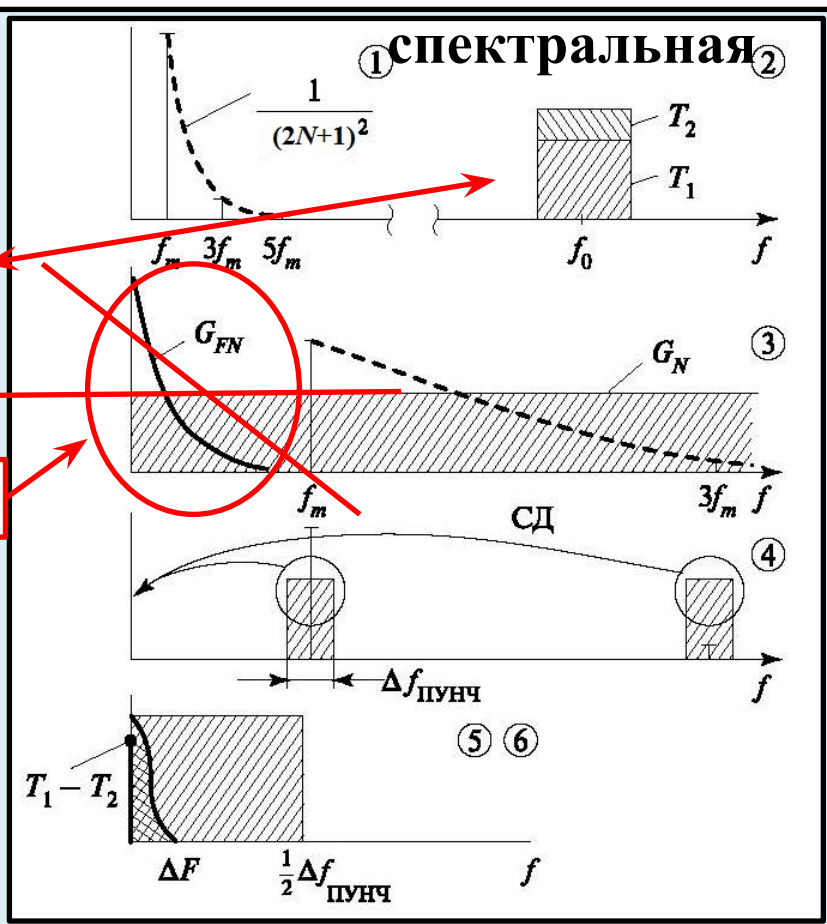
$$T_1 = T_a + T_N,$$

$$T_2 = T_R + T_N$$

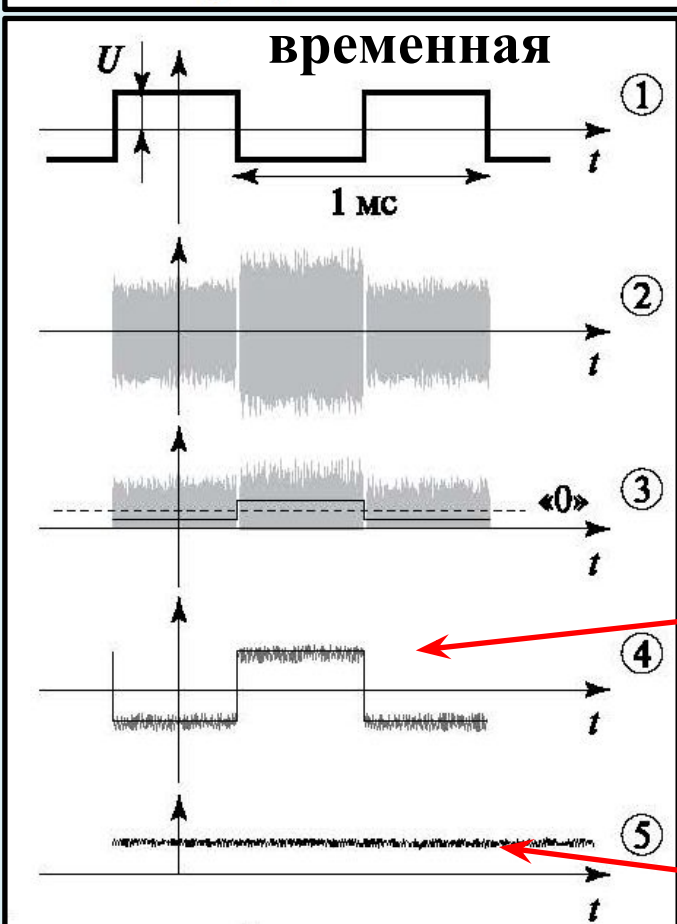
Функция ПУНЧ

$const \propto T_1, T_2$

$\propto S, FN$



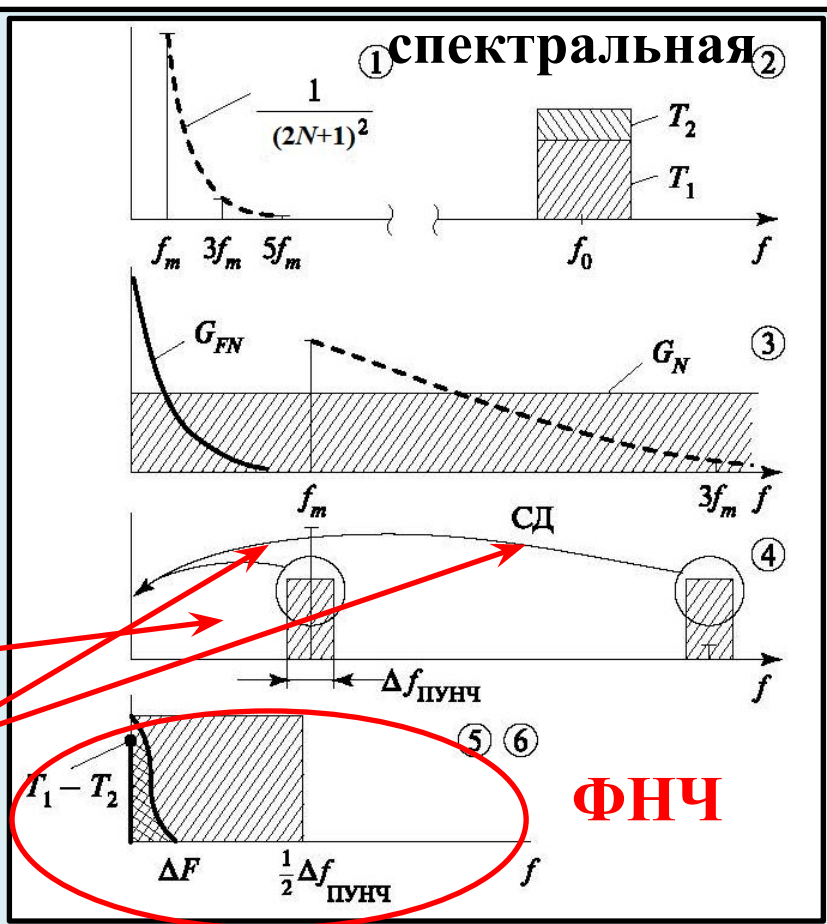
Модуляционный радиометр



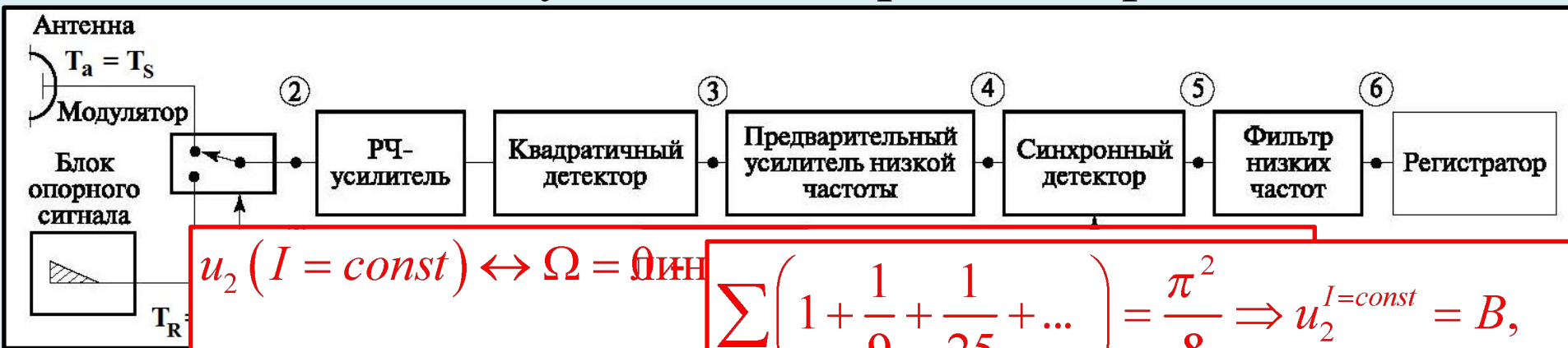
циклограмма

Действие ПУНЧ:
 вырезает в Δf ,
 усиливает,
 подавляет.

$I = const$
 и $\propto T_1 - T_2$



Модуляционный радиометр



$$u_2 (I = const) \leftrightarrow \Omega = \Omega_{ин}$$

$$u_2 = f(\varphi_1 - \varphi_2) \Rightarrow \max$$

$$\sum \left(1 + \frac{1}{9} + \frac{1}{25} + \dots \right) = \frac{\pi^2}{8} \Rightarrow u_2^{I=const} = B,$$

гармонический и импульсный сигналы:

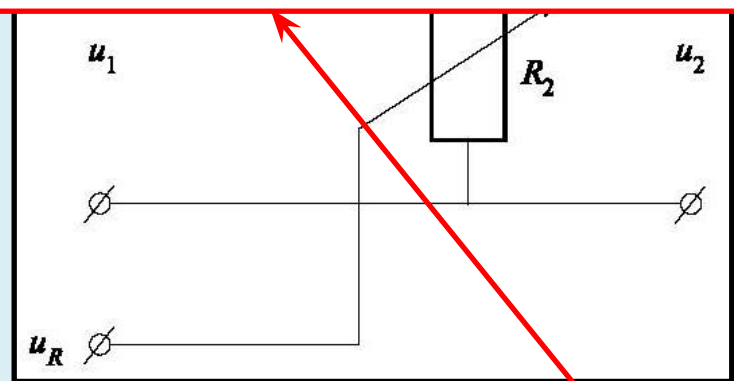
$$u_2^{I=const} = \frac{2B}{\pi} \text{ промежуточное значение.}$$

Управление
 $R_2 = R_0 [1 + A \cos(\Omega t + \varphi_2)]$

закон Ома $\langle u_2 = \frac{u_1}{R_1} R_2 \rangle$

$$u_1 = u_0 \cos(\Omega t + \varphi_1)$$

$$u_2 = \frac{B}{A} \cos(\Omega t + \varphi_1) + \frac{B}{2} \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{B}{2} \cos(2\Omega t + \varphi_1 + \varphi_2), \quad B = \frac{A u_0 R_0}{R_1}.$$



Прямоугольное синхронное пульсирование входного и управляющего сигнала:

$$S(\omega) = U \frac{4}{\pi} \left(\cos \Omega t - \frac{1}{3} \cos 3\Omega t + \frac{1}{5} \cos 5\Omega t - \dots \right) \rightarrow u_2^{I=const} = B \frac{16}{\pi^2} \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{9} + \frac{1}{25} + \dots \right)$$

Модуляционный радиометр



Модуляция

ВЫХОД квадратичного детектора, т. 3:

$$\bar{V}_2 = \beta u_2^2 = \beta k (T_N T_1 T_S) \Delta f$$

$$\bar{V}_1 = \beta u_1^2 = \beta k (T_N T_2 T_0) \Delta f$$

Синхронный детектор:

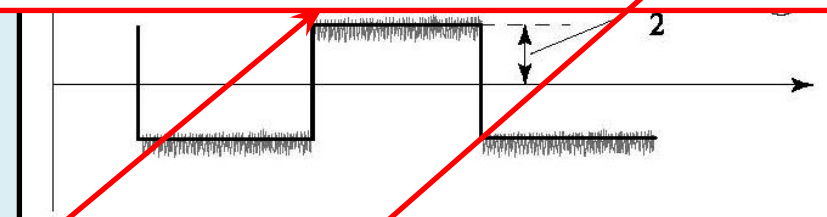
$V_{\text{ПУНЧ}} \times \text{импульсный сигнал} \rightarrow u_2^{I=\text{const}} (\Omega = 0) \rightarrow$

$$\bar{T} = T_2 + \frac{T_1 - T_2}{2} = T_N + \frac{T_S - T_0}{2} \rightarrow \left\langle \sum \left(1 + \frac{1}{9} + \frac{1}{25} + \dots \right) = \frac{\pi^2}{8} \Rightarrow u_2^{I=\text{const}} = B \right\rangle \rightarrow$$

ВЫХОД ПУНЧ:

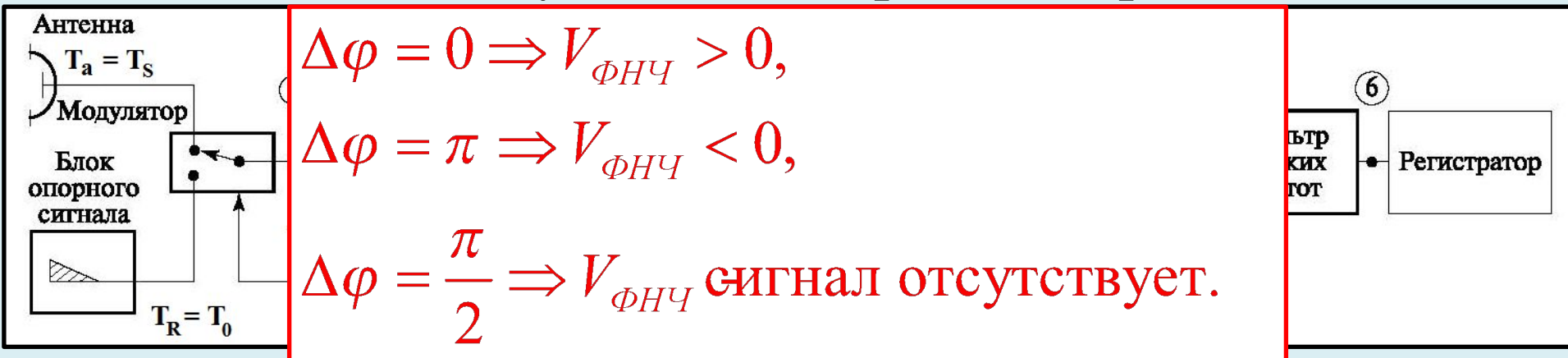
$$V_{\text{ПУНЧ}} = \beta k \frac{T_S - T_0}{2} \Delta f \frac{4}{\pi} (\cos 2\pi f_m t -$$

$$-\frac{1}{3} \cos 3 \cdot 2\pi f_m t + \frac{1}{5} \cos 5 \cdot 2\pi f_m t - \dots) + A(t)$$



$$V_{\text{ФНЧ}} = \frac{1}{2} \beta k (T_S - T_0) \Delta f + A_1(t)$$

Модуляционный радиометр



$$\Delta\varphi = 0 \Rightarrow V_{\text{ФНЧ}} > 0,$$

$$\Delta\varphi = \pi \Rightarrow V_{\text{ФНЧ}} < 0,$$

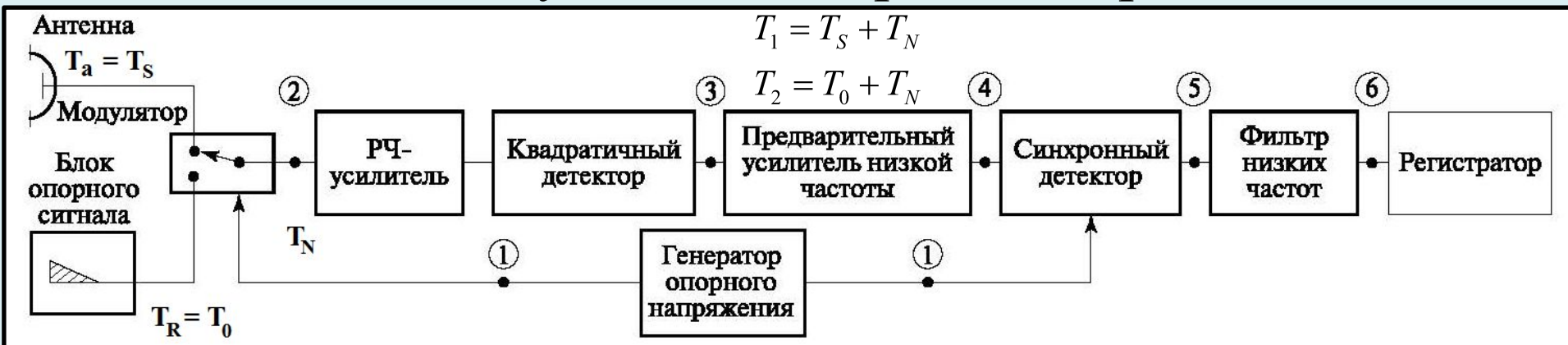
$$\Delta\varphi = \frac{\pi}{2} \Rightarrow V_{\text{ФНЧ}} \text{ сигнал отсутствует.}$$

$$V_{\text{ФНЧ}} = \frac{1}{2} \beta k (T_s - T_0) \Delta f + A_1(t) \Rightarrow$$

Свойства модуляционных измерений:

1. На выходе системы регистрируется сигнал в виде разности между исследуемым и эталонным сигналами. При $T_s = T_0$ на выходе системы \rightarrow «0», хотя на входе системы присутствует исследуемый сигнал. Требуется внешняя калибровка.
2. Выходной сигнал системы калибруется и нормируется в виде шкалы абсолютной температуры в градусах К, приведённой ко входу системы.
3. Фазочувствительные элементы (модулятор и синхронный детектор) - выходной сигнал также является фазочувствительным по отношению к фазе управляющего сигнала для синхронного детектора.

Модуляционный радиометр

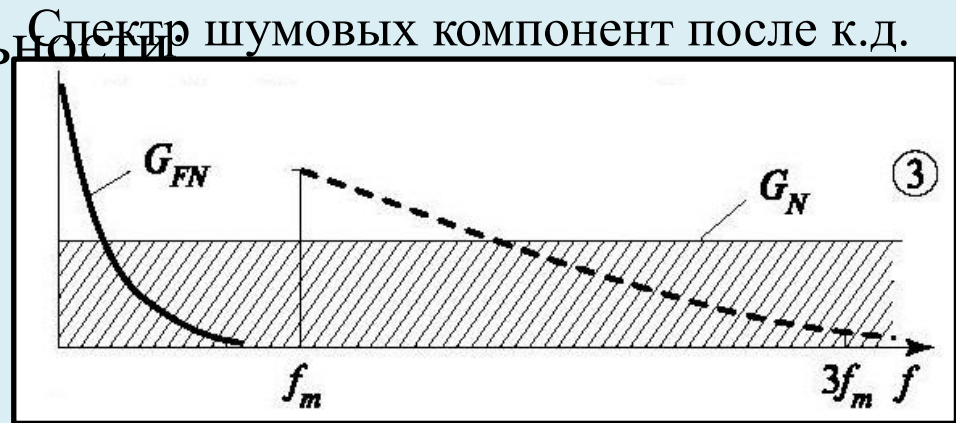


Порог

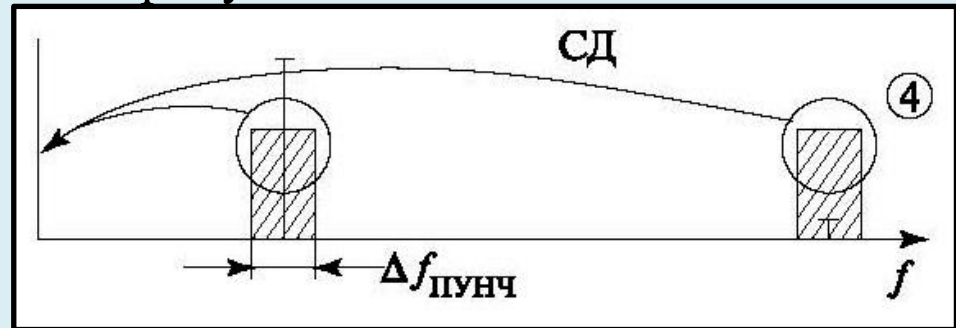
чувствительности

синусоидальная модуляция:

$$\frac{\Delta T_{mr}}{\Delta T_{ir}} = 2.82$$



Спектр шумовых компонент после ПУНЧ



$$\Delta T_{ir} = \sqrt{2} T_N \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} \Rightarrow \frac{\Delta T_{mr}}{\Delta T_{ir}} = 2$$

$$\Delta T_r = \alpha T_N \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} = \frac{\alpha}{2} \frac{T_N}{\sqrt{\Delta f \tau}}$$

$$\alpha = \sqrt{2} \rightarrow \Delta T_{ir}, \alpha = 2 - 4 \rightarrow \Delta T$$

Модуляционный радиометр

Фликкер

выход ФНЧ:

$$\left. \begin{aligned} \bar{V}_S &= \beta T_S k \Delta f = k_1 G_A(f) T_S(t) \overset{\text{ШУМ:}}{k \Delta f} \\ V_{mr}^{\Phi НЧ} &= \frac{1}{2} \beta k (T_S - T_0) \Delta f + A_1(t) \end{aligned} \right\} \Rightarrow V_{mr}^{\Phi НЧ} = \frac{1}{2} k_1 G_A(f) k (T_S - T_0) \Delta f$$

$G_A(f)$ линейный коэф. усиления по мощности с системы,

k_1 линейный коэф. преобразования остальных элементов системы.



$$\Delta T = \sqrt{T_N^2 \frac{\Delta F}{\Delta f} + (T_S - T_0)^2 \left(\frac{\sigma_{FN}}{G_A} \right)^2} \Rightarrow FN \propto f \left(\frac{T_S - T_0}{T_N} \right)$$

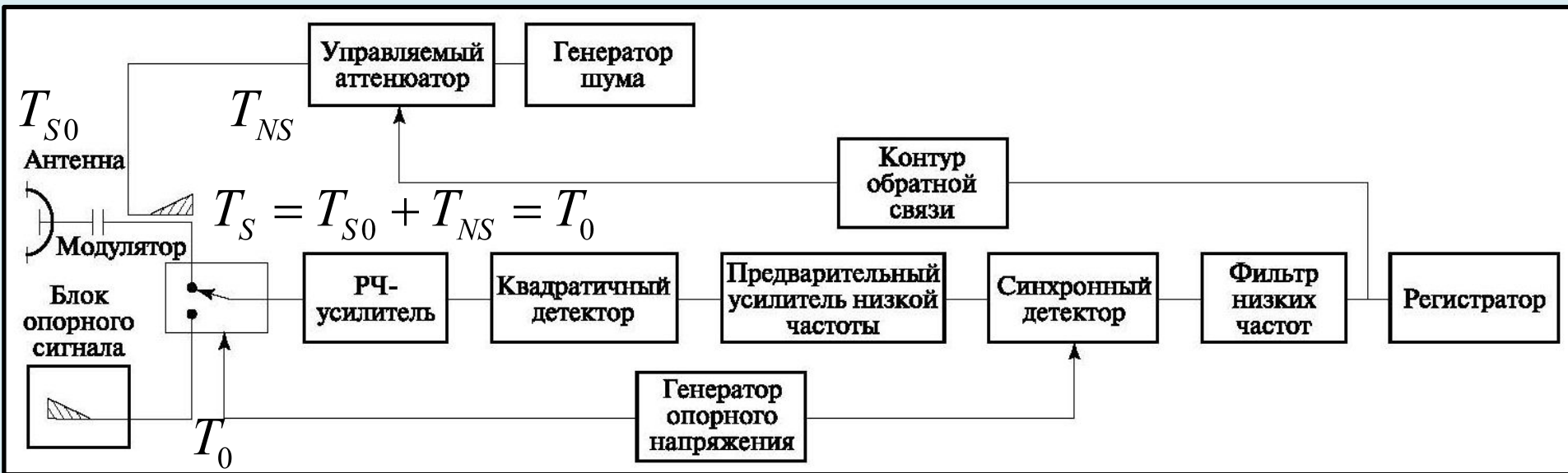
$$\frac{T_S - T_0}{T_N} \ll 1 \Rightarrow FN \rightarrow 0,$$

бортовые измерения собственного излучения земных покровов:

$$T_{Water} \propto 150 \text{ K} - T_{Forest} \propto 300 \text{ K} \Rightarrow \frac{T_S - T_0}{T_N} \propto 0.1 \dots 0.5 \Rightarrow FN \uparrow$$

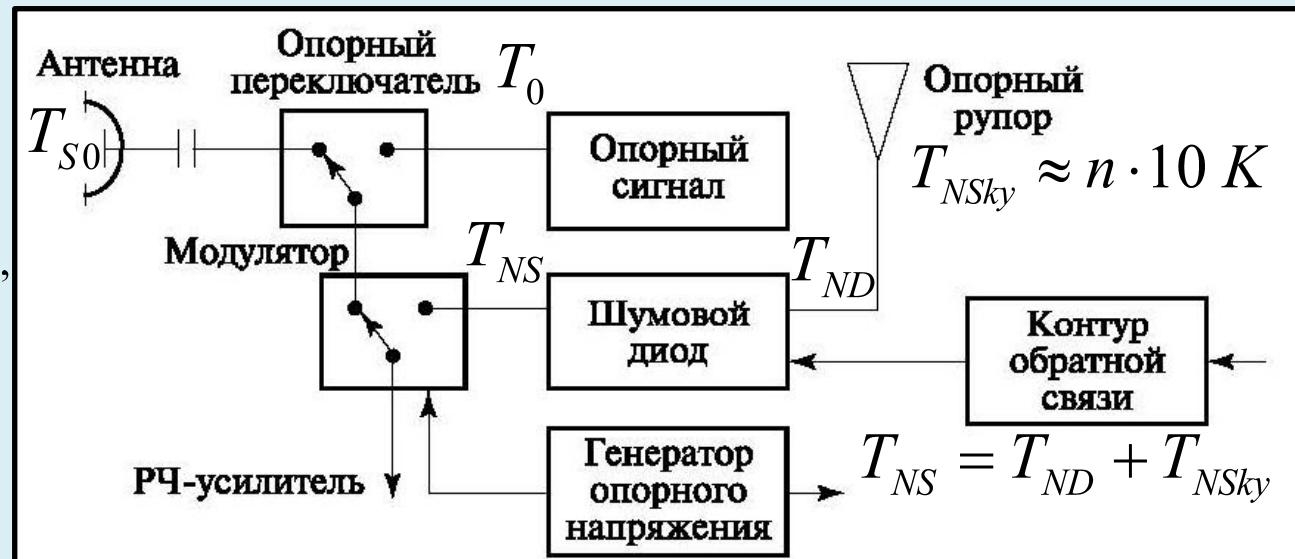
Модуляционный радиометр.

Квазинулевой режим:



$$\Delta T = \sqrt{T_N^2 \frac{\Delta F}{\Delta f} + (T_S - T_0)^2 \left(\frac{\sigma_{FN}}{G_A} \right)^2}$$

$T_{Water} \approx 150 K \rightarrow \Delta T \leq 0.1 K$



Измерение основных параметров радиометра ΔT , T_N , Δf , τ (ΔF)

Методы измерения порога чувствительности ΔT :

$$\Delta T = \sigma_F \quad \Delta T_r = \alpha T_N \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta f}} = \frac{\alpha}{2} \frac{T_N}{\sqrt{\Delta f \tau}}$$

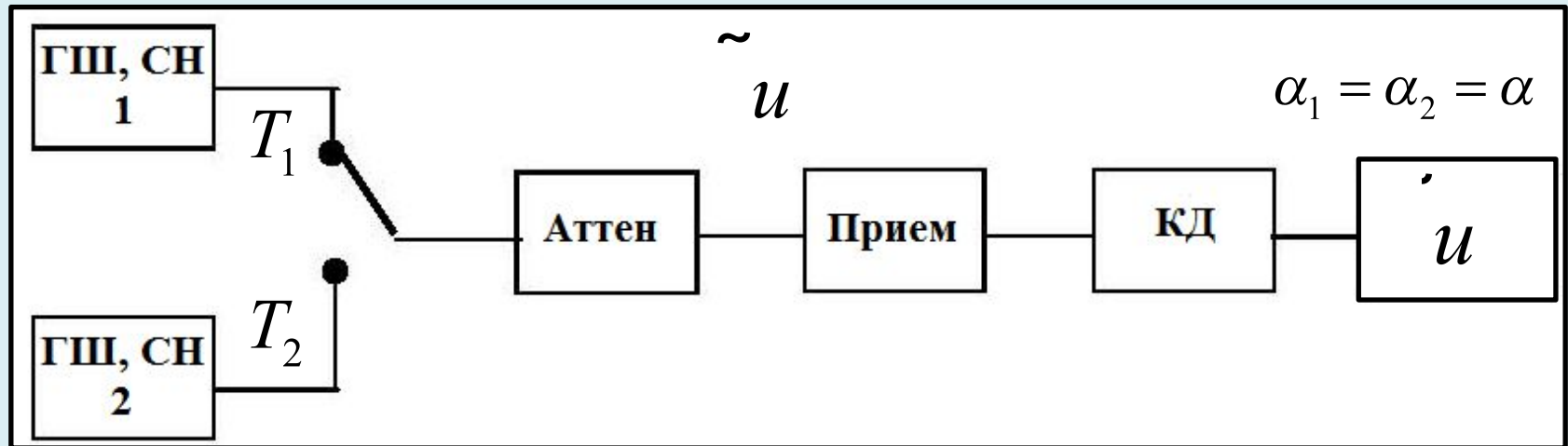
$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i,$$
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}{n-1}},$$

калибровочный сигнал:

$$T_K \rightarrow \sigma_K \Rightarrow \Delta T = T_K \frac{\sigma}{\sigma_K}$$



Измерение шумовой температуры радиометра T_N



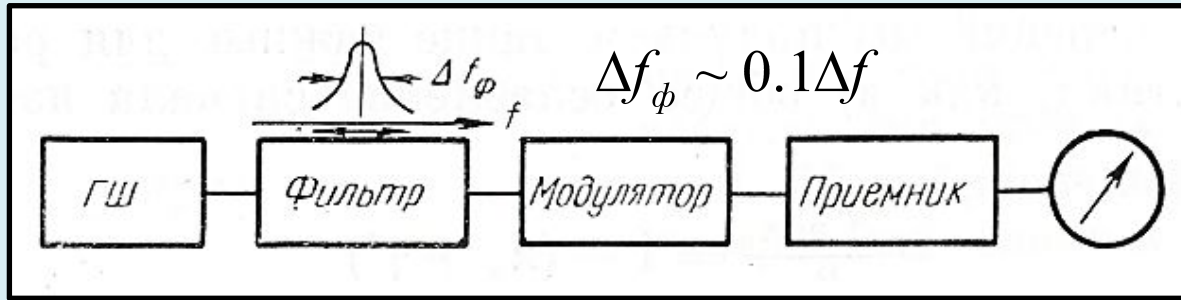
Линейный тракт приемника:

$$\left. \begin{array}{l} \alpha_1 \sim T_N + T_1 \\ \alpha_2 \sim T_N + T_2 \end{array} \right\} \Rightarrow T_N = (T_1 - T_2) \frac{\alpha_1 / \alpha_2}{1 - \alpha_1 / \alpha_2} - T_1$$

Нелинейный тракт приемника:

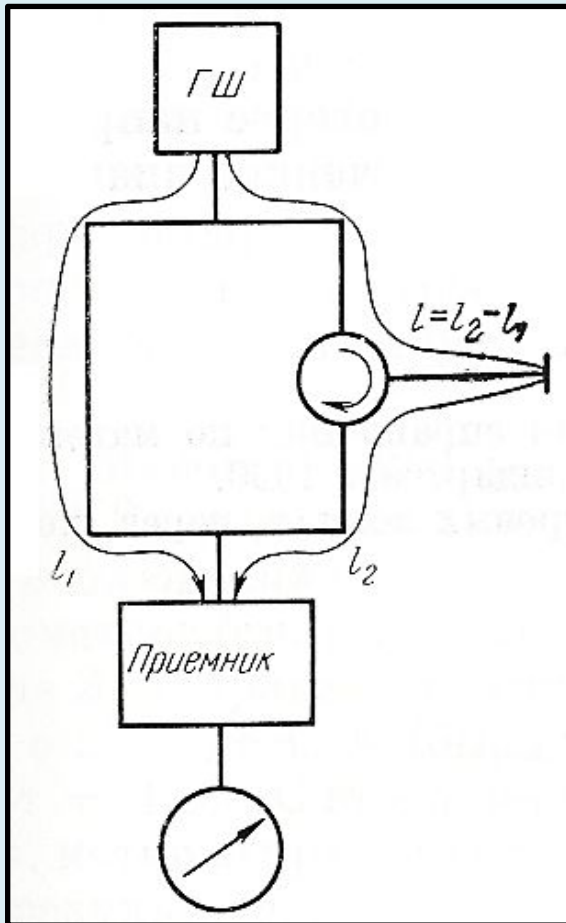
$$\left. \begin{array}{l} \alpha_1 = \alpha \\ \alpha_2 \xrightarrow{\text{аттенуатр}} \alpha \end{array} \right\} \Rightarrow \alpha = \frac{T_2 + T_N}{L}$$

Определение полосы принимаемых частот Δf



$$P_\phi = kT_{ГШ} \Delta f_\phi$$

$$\Delta f_\phi = \frac{\int P(f) df}{P(f_0)}$$



$$l = l_1 - l_2$$

интерференция

$$E \text{ и } E e^{-ikl}$$

$$\sum \downarrow$$

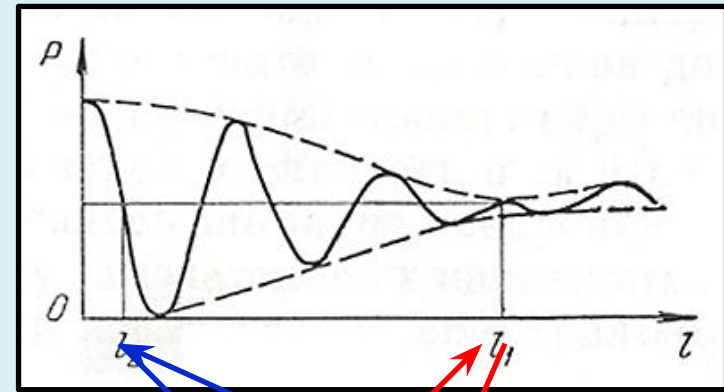
$$E_{ex} = E(1 + e^{-ikl}), dP \propto E_{ex} E_{ex}^* df = 2E^2 (1 + \cos kl) df$$

$$P \propto 2E^2 \int_{f_1}^{f_2} (1 + \cos kl) df = 2E^2 \Delta f \left[1 + \frac{\sin(a\Delta f)}{a\Delta f} \cos 2af_0 \right]$$

$$l = \lambda_0 f_0 / \Delta f \rightarrow \frac{\sin(a\Delta f)}{a\Delta f} = 0, a = \pi l / c$$

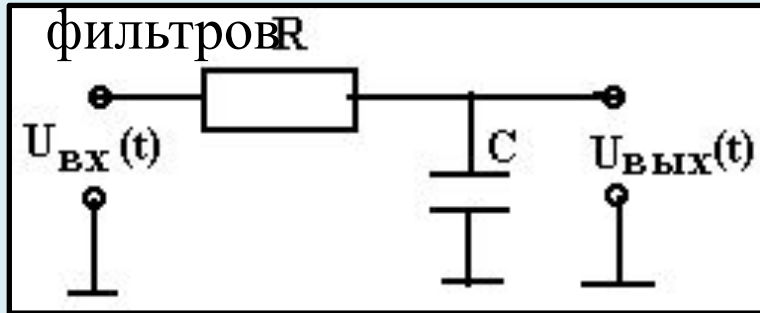
$$\Delta f = f_0 \frac{\lambda_0}{l_1}$$

$$f_0 \leftrightarrow \lambda_0 = 4l_2$$



Определение постоянной времени τ

ФНЧ - цепочка RC-



$$\frac{U_{\text{вых}}(t)}{U_{\text{вх}}(t)} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j\omega\tau}$$



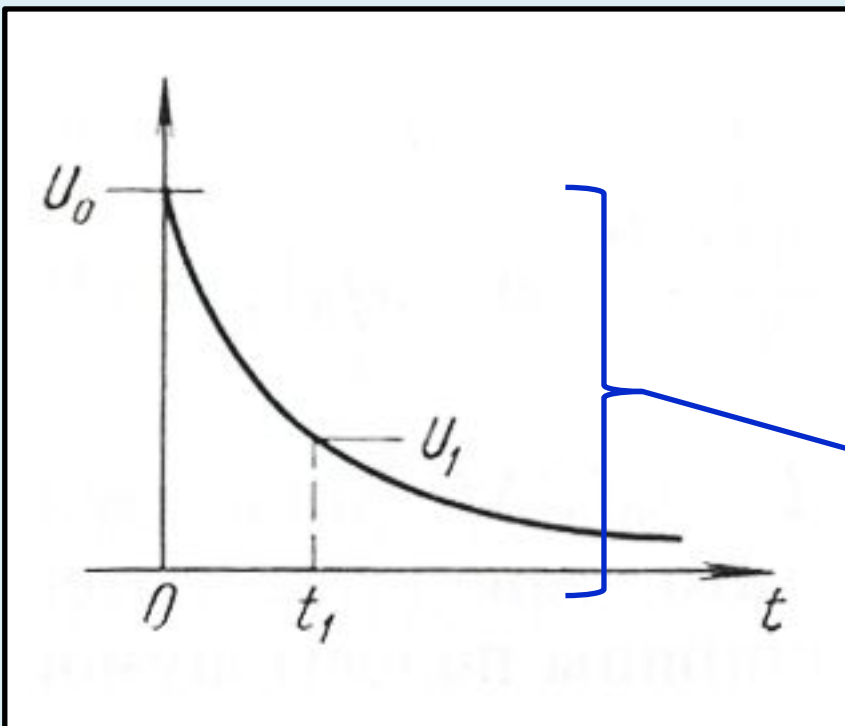
$$U_{\text{вх}}(t) = U_{\text{вых}}(t) + \tau \frac{dU_{\text{вых}}(t)}{dt} \Rightarrow \tau = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}}{dU_{\text{вых}}/dt}$$



$$\tau = -\frac{U_{\text{вых}}}{dU_{\text{вых}}} dt \rightarrow \int_0^{t_1} \frac{dt}{\tau} = -\int_{U_0}^{U_1} \frac{dU_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}}$$



$$\frac{t_1}{\tau} = -\left(\ln \frac{U_1}{U_0}\right) \Rightarrow \frac{U_1}{U_0} = e^{-t_1/\tau}$$



Основные схемы усилительных устройств.

Приёмное устройство - микроволновый усилитель
(до квадратичного детектора)

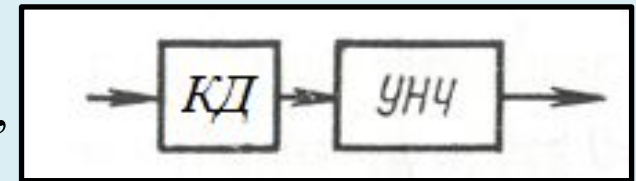
Усилительные устройства:

1. детекторные приёмники,
2. приёмники прямого усиления,
3. приемники супергетеродинного типа.

Детекторные

приёмники

- лабораторные измерения
- радиоастрономия (интенсивные ист. - см и мм),
- водяной пар в облачном слое Венеры на аппарате «Маринер-2»

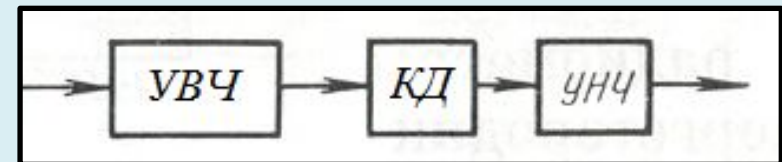


$$\Delta T \approx 2 - 3 K$$

Приёмники прямого усиления

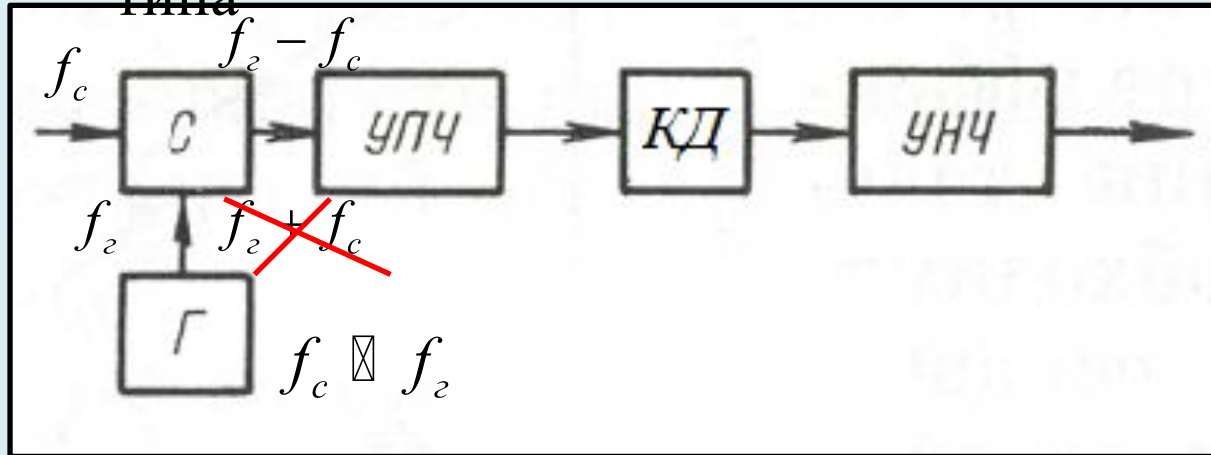
$$f_{\text{КД}} 50 \dots 50 \text{ , } K_{\Delta} \approx 10^{-3} \leftrightarrow \tau = 1$$

$$\Delta T_{\text{ш}} \approx \sqrt{\Delta f} \text{ основной недостаток}$$



Основные схемы усилительных устройств

Приёмники супергетеродинного типа



$$\Delta K \boxtimes 0.05 \dots 0.1$$