

# Лекция 8. Система слежения за фазой сигнала

Болденков Е.Н.

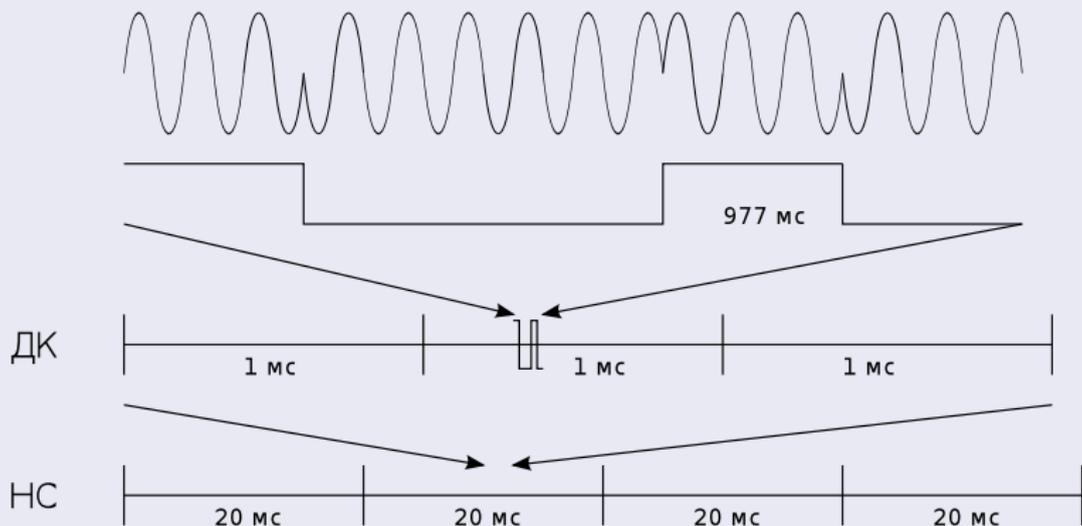
Московский Энергетический институт

октябрь 2014

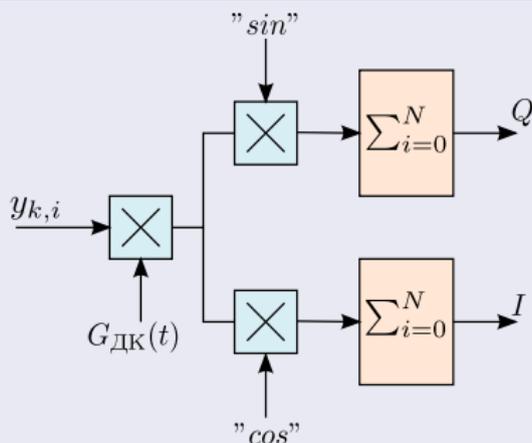
- 1 Когерентный и некогерентный режим
  - Отличия когерентного и некогерентного режимов
  - Отличия характеристик когерентного и некогерентного режимов
- 2 Приём сигнала с модуляцией ФМ-2
  - Усреднение АПВ по навигационному сообщению
  - Фазовый дискриминатор
  - Статистические характеристики фазового дискриминатора
- 3 Анализ системы ФАП
  - Структура системы ФАП
  - Сглаживающий фильтр ФАП
- 4 Влияние отношения сигнал / шум
- 5 Фазовые шумы ОГ

## Структура навигационного сигнала

$$s(t_{k,i}) = AG_{\text{ДК}}(t_{k,i} - \tau_k) \cos((\omega_0 + \omega_{\text{доп}})t_{k,i} + \varphi_k + \pi \cdot \theta_{\text{НС}}(t_{k,i} - \tau_k))$$



## Основа приёмника — коррелятор



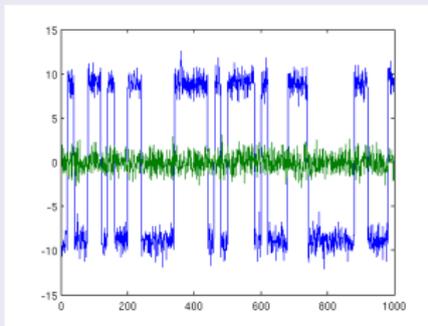
Для коррелятора необходимо формировать опорный сигнал

$$s_{I,k} = AG_{\text{ДК}}(t_{k,i} - \hat{\tau}_k) \cos(\hat{\omega}t_{k,i} + \hat{\varphi}_k)$$

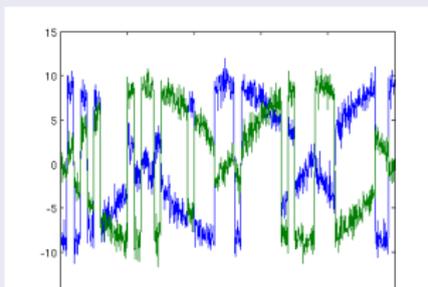
$$s_{Q,k} = AG_{\text{ДК}}(t_{k,i} - \hat{\tau}_k) \sin(\hat{\omega}t_{k,i} + \hat{\varphi}_k)$$

# Когерентный и некогерентный приём

Если оценивается фаза сигнала, приём называется *когерентным*



Если оценивается только частота сигнала, приём называется *некогерентным*



Одна из наиболее важных характеристик НАП —  
*чувствительность*

Чувствительность — способность приёмника выполнять свои функции при низком отношении сигнал/шум

Чувствительность отличается в зависимости от режима работы

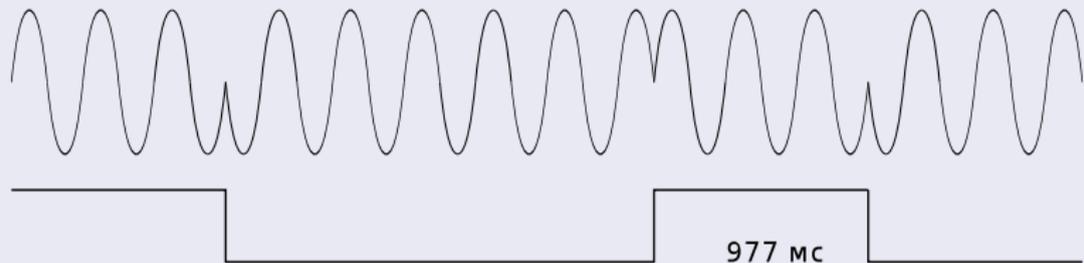
Типовые значения:

Режим	Чувствительность
Холодный старт	25 дБГц
Когерентное слежение	до 20 дБГц
Некогерентное слежение	10 дБГц

## Чувствительность слежения НАП, разработанных в различные годы

	Название	Чувствительность	Год	Технология
	SN-4706	-165 дБВт	2007	180 нм
	SiRFstar II	-171 дБВт	2002	130 нм
	Геос-1	-181 дБВт	2009	250 нм
	SiRFstar III	-185 дБВт	2005	90 нм
	NV-08C	-190 дБВт	2010	90 нм
	Геос-3	-190 дБВт	2012	130 нм
	u-blox6	-191 дБВт	2010	65 нм
	SiRFstar IV	-192 дБВт	2010	65 нм
	SiRFstar V	-195 дБВт	2013	20 нм

## Особенность навигационных сигналов — модуляция ФМ-2



Из теории — нужно усреднить АПВ по неинформативным параметрам

$$p(\tau, \omega, \phi, \theta_{\text{НС}}) = c \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \int_0^T y(t) \cdot \theta_{\text{НС}} s_{\text{ОП}}(\tau, \omega, \phi) dt \right\}$$

Навигационное сообщение  $\theta_{\text{НС}}$  считаем случайным равномерно распределённым

$$\theta_{\text{НС}} = \begin{cases} +1, & p = 1/2, \\ -1, & p = 1/2. \end{cases}$$

## Усреднение АПВ по навигационному сообщению

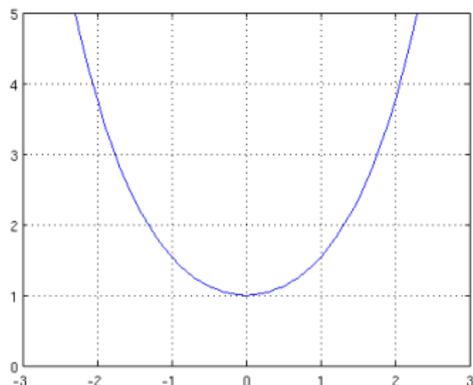
$$p(\tau, \omega, \phi, \theta_{\text{НС}}) = \frac{1}{2}p(\tau, \omega, \phi, \theta_{\text{НС}} = +1) + \frac{1}{2}p(\tau, \omega, \phi, \theta_{\text{НС}} = -1)$$

## Подставим выражение АПВ:

$$p(\tau, \omega, \phi) = \frac{1}{2}c \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \int_0^T y(t) \cdot s_{\text{ОП}}(\tau, \omega, \phi) dt \right\} + \\ + \frac{1}{2}c \exp \left\{ +\frac{1}{2\sigma^2} \int_0^T y(t) \cdot s_{\text{ОП}}(\tau, \omega, \phi) dt \right\}$$

В результате получается выражение с гипертангенсом:

$$p(\tau, \omega, \phi) = c \cdot ch(l_k)$$



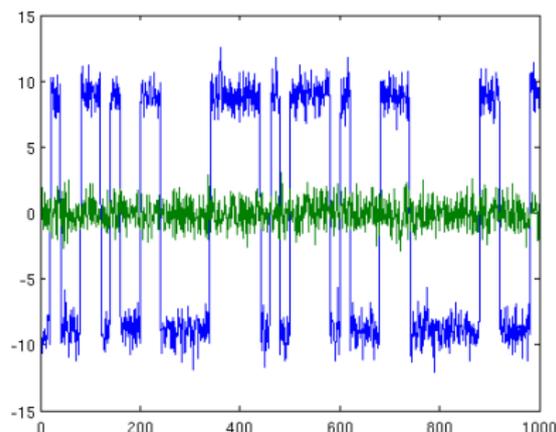
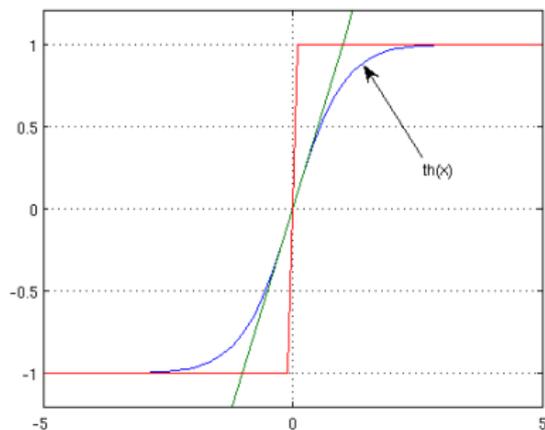
Для получения дискриминатора надо взять от АПВ производную по нужному параметру

$$u_{D\varphi} = \frac{\partial}{\partial \varphi} c \cdot ch(l_k)$$

Оптимальный дискриминатор ФАП

$$u_{D\varphi} = th(l_k) \cdot Q_k$$

Функция  $th(l_k)$  снимает модуляцию данными



При большом отношении сигнал/шум

$$th(x) \rightarrow sign(x)$$

$$u_{D\varphi} = sign(I_k) \cdot Q_k$$

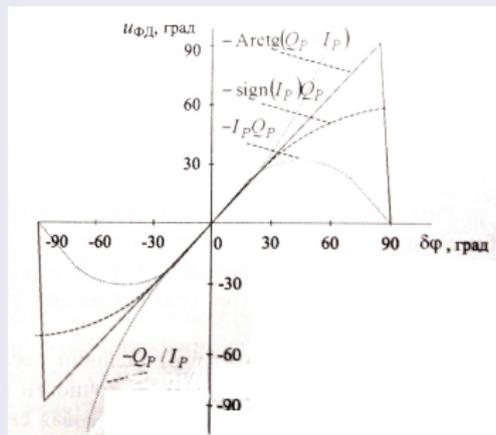
При малом отношении сигнал/шум

$$th(x) \rightarrow x$$

$$u_{D\varphi} = I_k \cdot Q_k$$

# Статистические характеристики фазового дискриминатора

## Дискриминационные характеристики

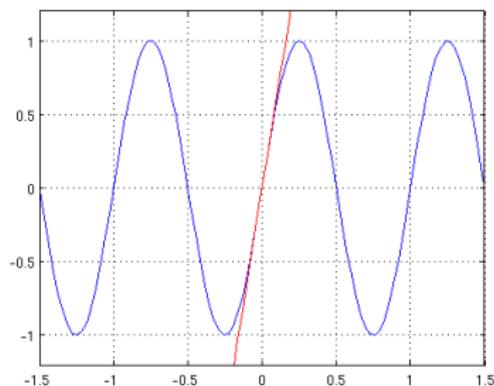


Для дискриминатора  $u_{\Delta\varphi} = I_k \cdot Q_k$

$$U_{\Delta\varphi}(\Delta\varphi) = (2q_c/n_0 T)^2 \rho^2 (\Delta\tau) \text{sinc}(\Delta\omega T/2) \sin(2\Delta\varphi)$$

# Статистические характеристики фазового дискриминатора

## Крутизна дискриминационной характеристики



Для дискриминатора  $u_{Д\varphi} = I_k \cdot Q_k$

$$S_{Д\varphi} = 2 (2q_c/n_0 T)^2$$

# Статистические характеристики фазового дискриминатора

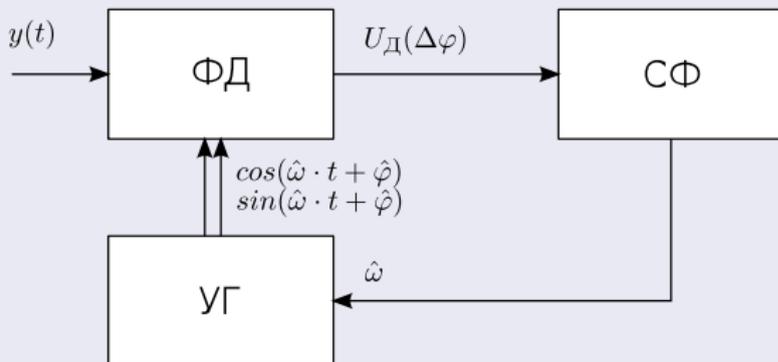
## Флуктуационная характеристика

$$DU_{\text{Д}\varphi} = (2q_{c/n_0} T)^3 (1 + 2q_{c/n_0} T)$$

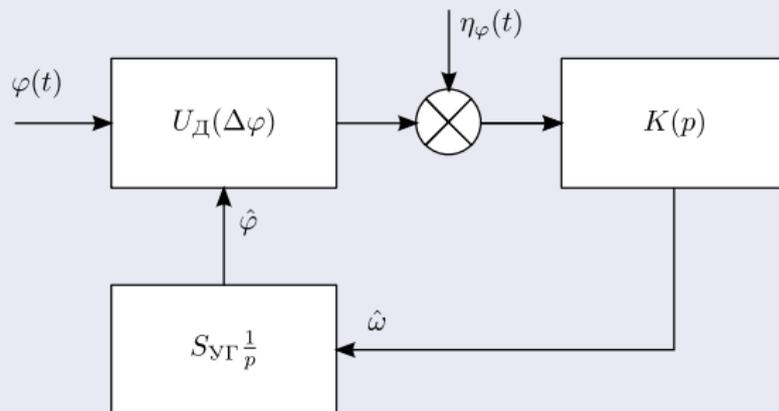
## Дисперсия шумов ФД, пересчитанная ко входу

$$D_{\eta} = \frac{DU_{\text{Д}\varphi}}{S_{\text{Д}}^2} = \frac{1}{2q_{c/n_0} T} \left( 1 + \frac{1}{2q_{c/n_0} T} \right)$$

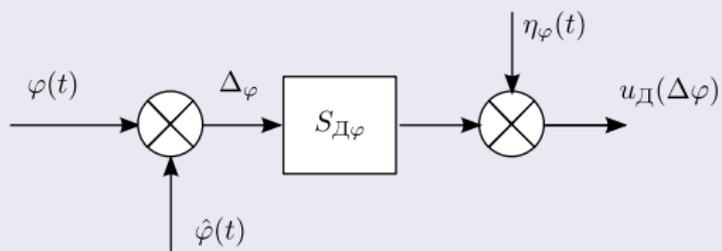
## Функциональная структура системы ФАП



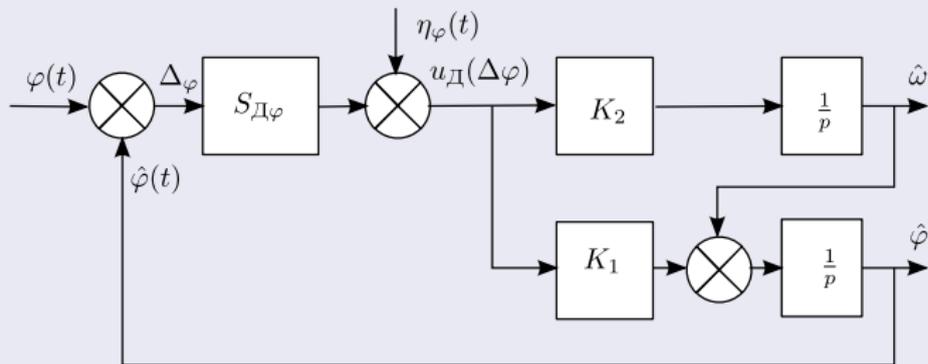
## Структурная схема ФАП



## Линеаризованный эквивалент дискриминатора

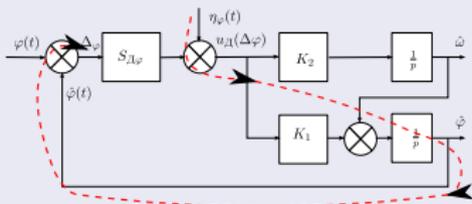


## Фильтр ФАП 2 порядка



# Шумовая составляющая ошибки

## Анализ шумовой составляющей ошибки

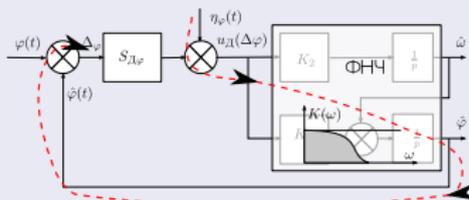


## Коэффициент передачи аддитивного шума

$$K_{\eta\Delta\varphi}(p) = \frac{S_{\Delta}\frac{1}{p} \left( K_1 + \frac{K_2}{p} \right)}{1 + S_{\Delta}\frac{1}{p} \left( K_1 + \frac{K_2}{p} \right)}$$

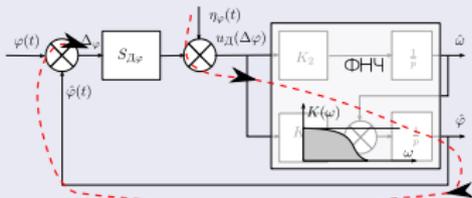
$$K_{\eta\Delta\varphi}(p) = \frac{S_{\Delta}K_1p + S_{\Delta}K_2}{p^2 + S_{\Delta}K_1p + S_{\Delta}K_2}$$

## Формирование шумовой составляющей ошибки

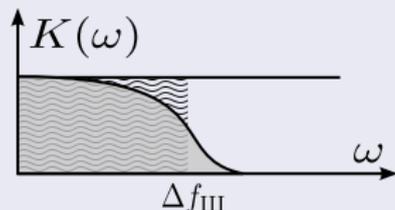


# Шумовая составляющая ошибки

## Формирование шумовой составляющей ошибки

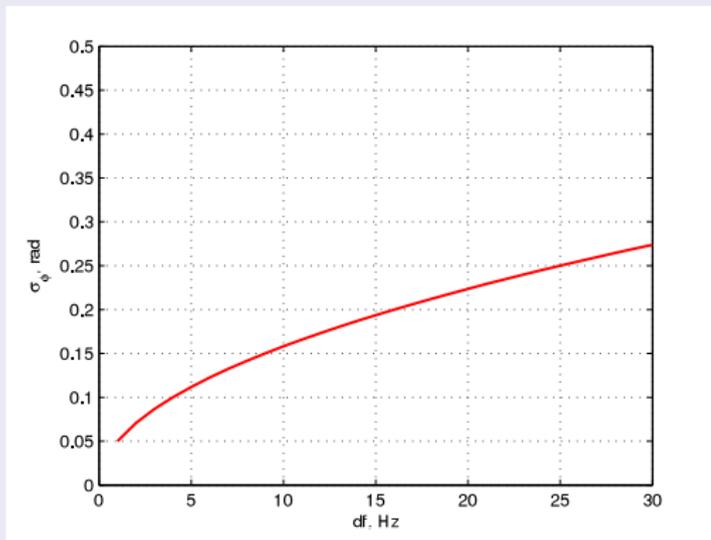


## Понятие шумовой полосы



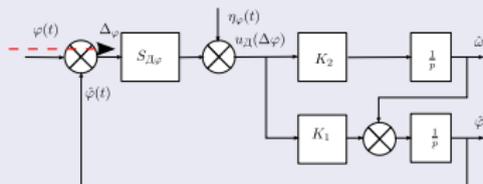
$$\sigma_{ш}^2 = \Delta f_{ш} \cdot |K(0)|^2 S_{\eta_\varphi}(0)$$

## Зависимость шумовой составляющей ошибки от полосы



$$\sigma_{\text{III}} = \sqrt{\Delta f_{\text{III}}} \times |K(0)| \sqrt{S_{\eta\varphi}(0)}$$

## Анализ динамической ошибки



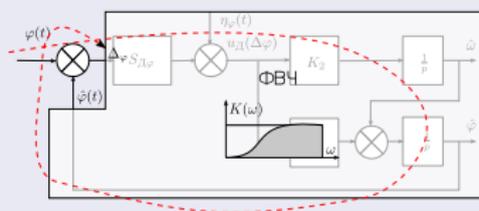
## Коэффициент передачи шумовой ошибки

$$K_{\varphi\Delta\varphi}(p) = \frac{1}{1 + S_{Д\varphi} \frac{1}{p} \left( K_1 + \frac{K_2}{p} \right)}$$

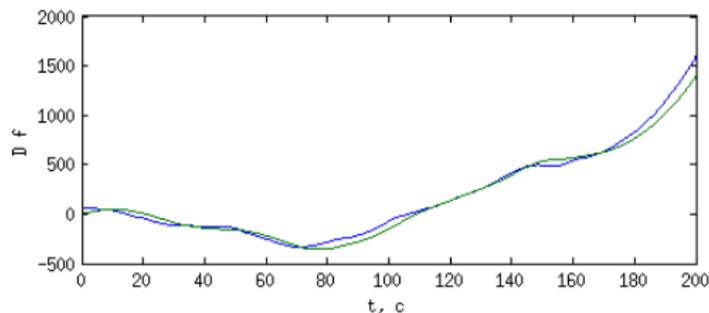
$$K_{\varphi\Delta\varphi}(p) = \frac{p^2}{p^2 + K_1 S_{Д\varphi} p + K_2 S_{Д\varphi}}$$

# Динамическая составляющая ошибки

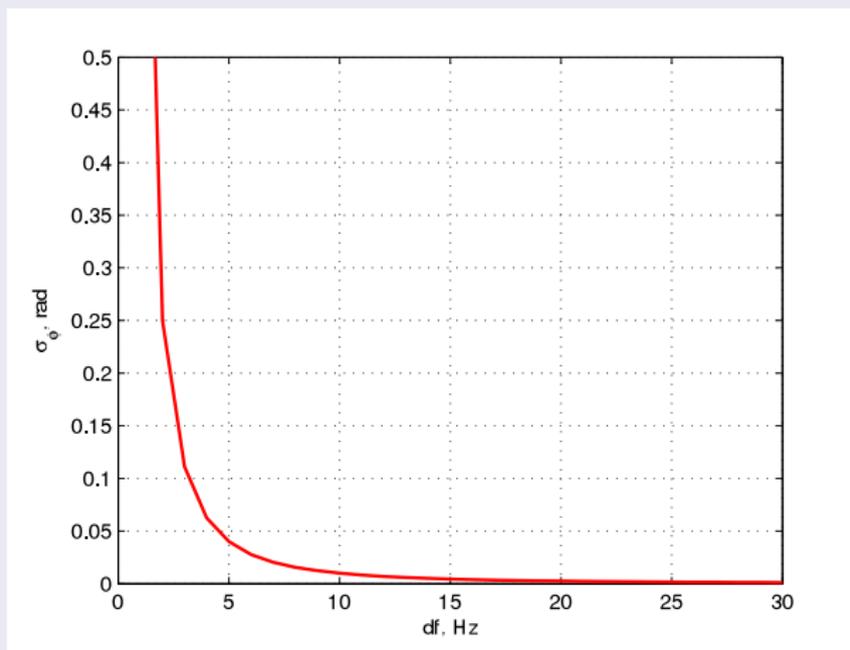
## Формирование динамической составляющей ошибки



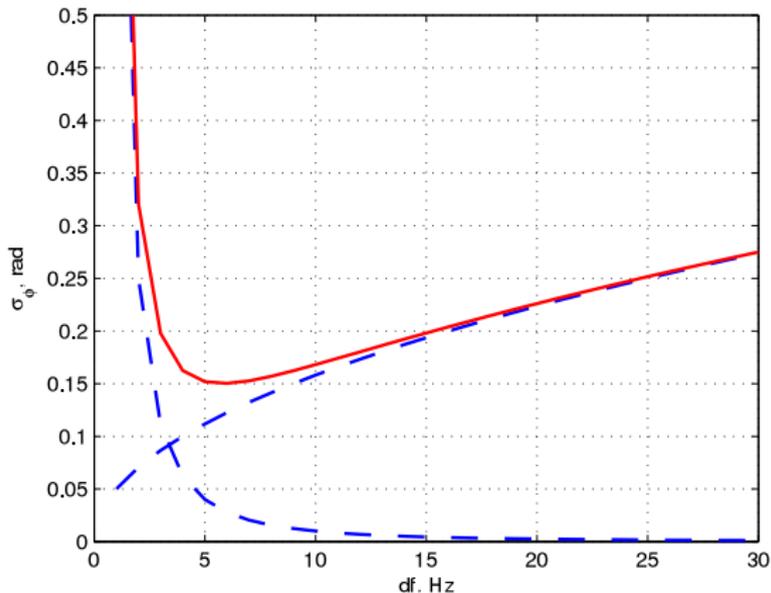
## Динамическая ошибка - “запаздывание” оценки



## Зависимость динамической ошибки от полосы



В результате есть противоброство двух тенденций



Коэффициент передачи аддитивного шума в ФАП 2 порядка

$$K_{\eta\Delta\varphi}(p) = \frac{S_{\text{Д}}K_1p + S_{\text{Д}}K_2}{p^2 + S_{\text{Д}}K_1p + S_{\text{Д}}K_2}$$

Значение шумовой полосы

$$\Delta f_{\text{ш}} = \frac{S_{\text{Д}}K_1^2 + K_2}{4K_1}$$

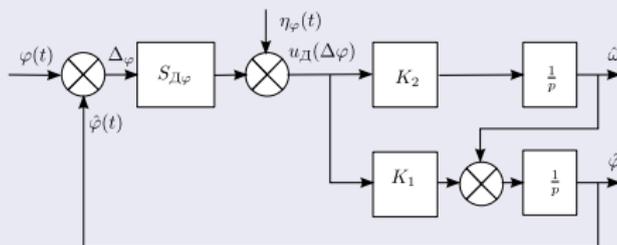
# Влияние изменения отношения сигнал/шум

Зависимость крутизны дискриминатора от отношения сигнал/шум

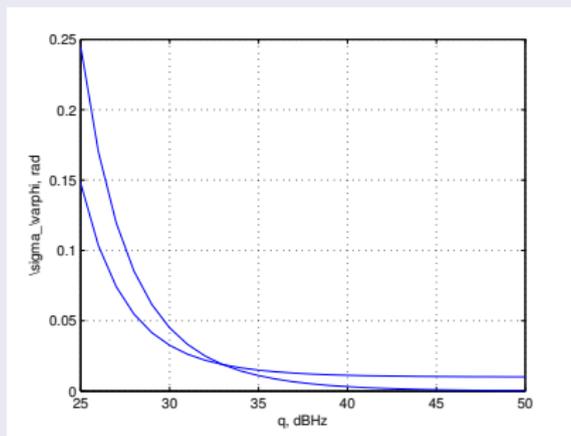
Для дискриминатора  $u_{Д,\varphi} = I_k \cdot Q_k$ :

$$S_{Д} = (2q_{с/n_0} T)^2$$

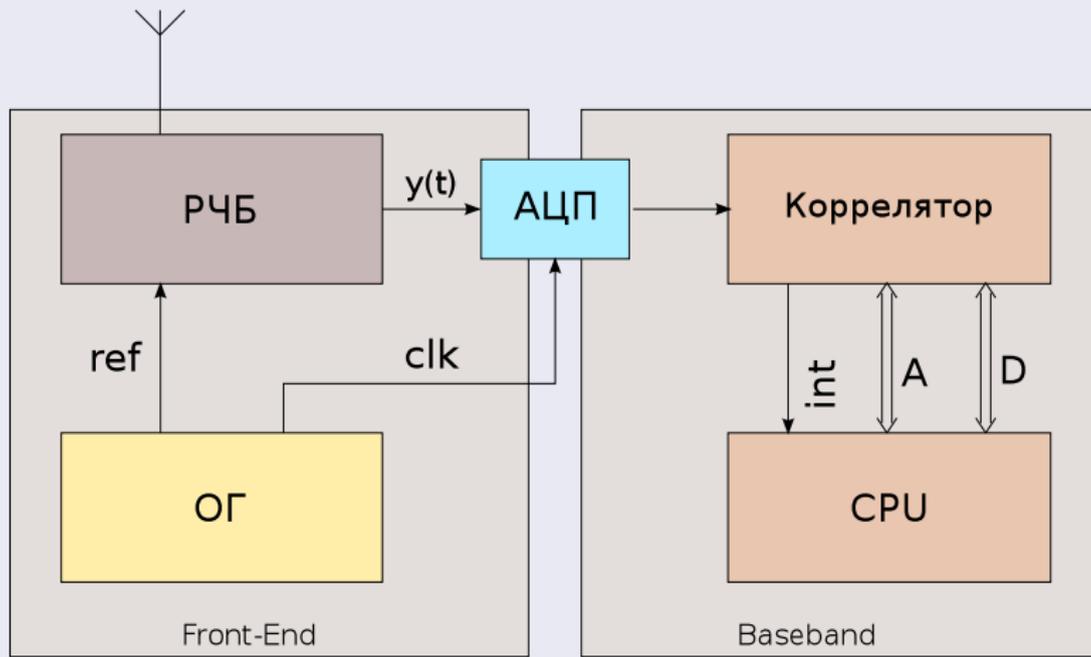
Структурная схема ФАП



## Зависимость ошибки слежения от отношения сигнал/шум



## Структура НАП

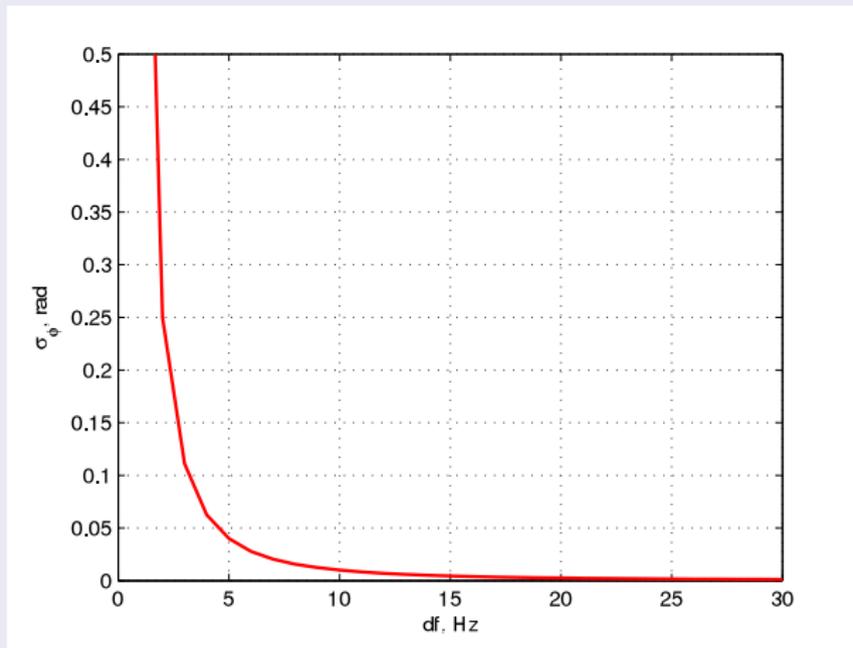


## Классификация фазовых шумов

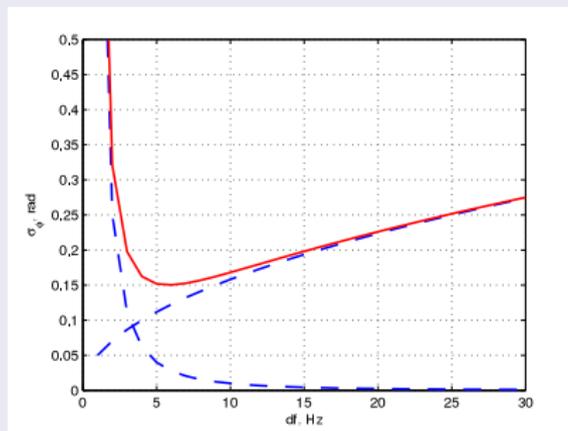
$S_\nu(f)$	$S_\varphi(f)$	Название
$h_{-2}f^{-2}$	$\nu_0^2 h_{-2}f^{-4}$	Частотный шум случайных блужданий
$h_{-1}f^{-1}$	$\nu_0^2 h_{-1}f^{-3}$	Частотный фликкер-шум
$h_0 f^0$	$\nu_0^2 h_0 f^{-2}$	Белый частотный шум
$h_{+1}f^{+1}$	$\nu_0^2 h_{+1}f^{-1}$	Фазовый фликкер-шум
$h_{+2}f^{+2}$	$\nu_0^2 h_{+2}f^0$	Белый фазовый шум

Таблица : Степенная модель спектральных плотностей

Фазовый шум воздействует аналогично динамической составляющей ошибки



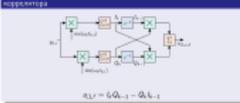
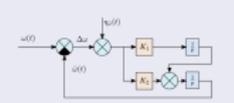
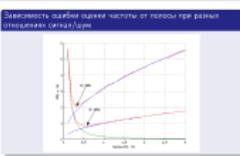
## Зависимость ошибки слежения от полосы ФАП



## Основные положения лекции по ФАП

- необходимы дискриминаторы с учётом модуляции данными;
- ошибка слежения складывается из шумовой и динамической составляющих;
- баланс шумовой и составляющей ошибок определяет оптимальную полосу ФАП;
- крутизна дискриминатора зависит от отношения сигнал/шум;
- фазовые шумы ограничивают чувствительность ФАП.

## Тема следующей лекции - система слежения за частотой сигнала

<b>Частотный дискриминатор</b> Формирование частотного дискриминатора по выходу корректора  $\dot{\omega}_1 = G\Omega_{\omega_1} - \Omega_{\omega_1}$	<b>Фильтр системы ЧАП</b> Структура ЧАП с фильтром 2-го порядка 
<b>Влияние относительной ошибки/шума</b> Зависимость фазы от частоты при разных относительных ошибках/шумах 	<b>Как это выглядит на практике</b> Уравнение частоты замкнутого контура <pre>reg [1:0] phase; reg [1:0] phase_rate; reg [1:0] phase_rate_IN; wire [1:0] out; wire phase_deriv;  always @(posedge clk)   phase[1:0] &lt;= phase_rate[1:0];  always @(posedge clk)   if (phase_rate_IN)     phase_rate[1:0] &lt;= phase_rate_IN[1:0];  constable OOS (   -clk,   -out,   -phase [phase[1:0]] 1);</pre>

Посетите наш web-сайт

<http://srns.ru>

