Московский Авиационный Институт
(Национальный Исследовательский Университет)

«Программно-Определяемые Радиосистемы»

Серкин Фёдор Борисович

Кафедра 408 – «Инфокоммуникации»

Литература:

1. Скляр Б., «Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение», «Вильямс», Москва, Санкт-Петербург, Киев, 2003.

2. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н., «Цифровая обработка сигналов», «Радио и связь», Москва, 1990.

3. Максфилд К., «Проектирование на ПЛИС. Архитектура, средства и методы», «Додэка-XXI», Москва, 2007.

4. «IEEE 1012 Standard for Software Verification and Validation», IEEE, New York, 2005.

5. Tuttlebee W., «software defined radio. Enabling technology», WILEY, New York, 2002.

Содержание курса:

I. Введение в ПОР.

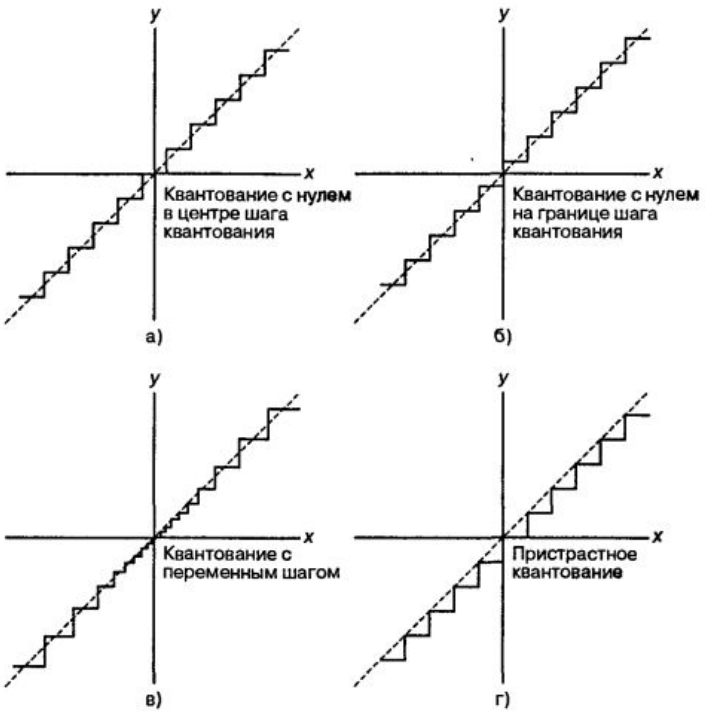
II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

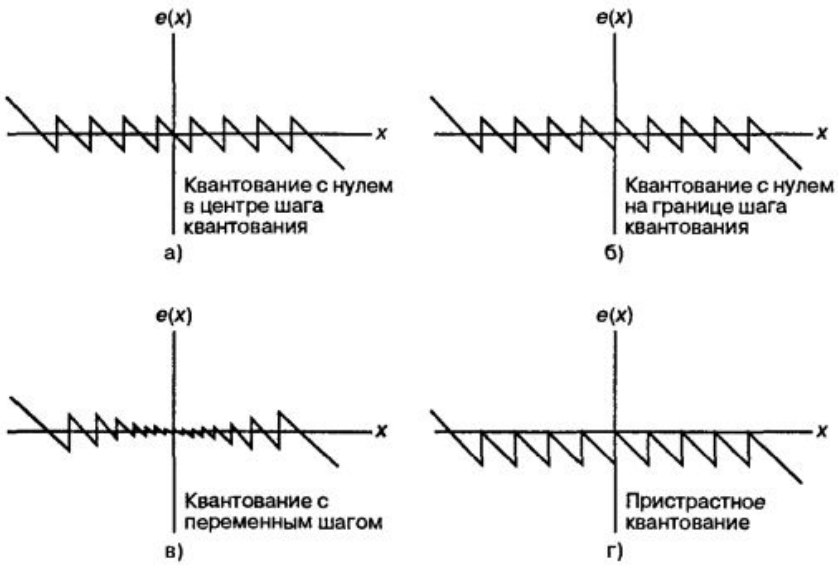
III. Реализация на жесткой и программируемой логике.

IV. Программируемое радио.

II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Квантование амплитуды.

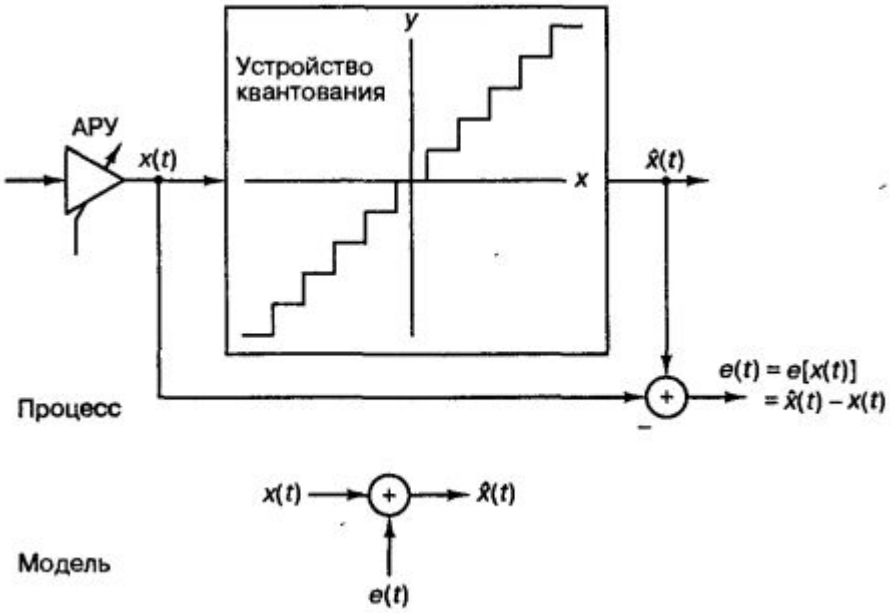




II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

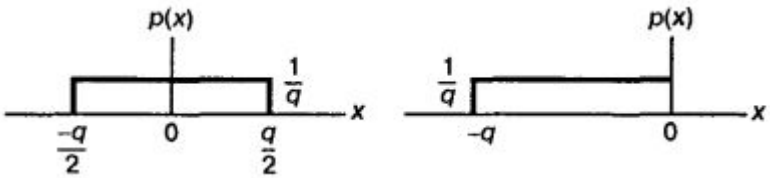
Шум квантования.

$$\hat{x}(t) = x(t) + e(t)$$



II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Шум квантования.



$$q = \frac{2E_{max}}{2^b}$$

$$\sigma^2 = \int_{-q/2}^{q/2} e^2 p(e)de = \int_{-q/2}^{q/2} e^2 \frac{1}{q} de = \frac{q^2}{12}$$

При нулевом среднем: $\sigma_x^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 p(x)dx$

$$q = (2E_{max})2^{-b}$$

$$\sigma_q^2 = \frac{1}{12}(2E_{max}2^{-b})^2 = \frac{1}{12}(2E_{max})^2 2^{-2b}$$

$$\sigma_x^2 = \int_{-E_{max}}^{+E_{max}} \frac{1}{2E_{max}} x^2 dx = \frac{1}{12}(2E_{max})^2$$

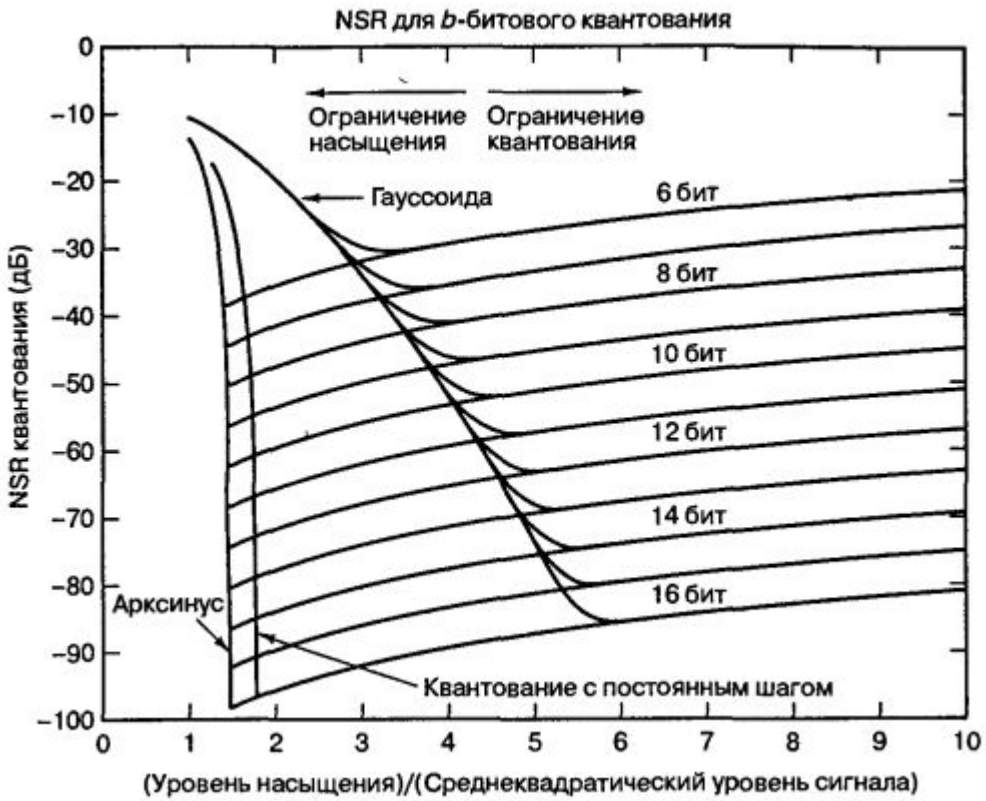
$$\mathrm{NSR} = \frac{\sigma_q^2}{\sigma_x^2} = 2^{-2b}$$

$$\mathrm{NSR}_{дБ} = 10\lg(\mathrm{NSR}) = 10\lg(2^{-2b}) =$$
$$= -20b\lg(2) = -6{,}02b(дБ).$$

$$\mathrm{NSR}_{дБ} = -6{,}02b + C.$$

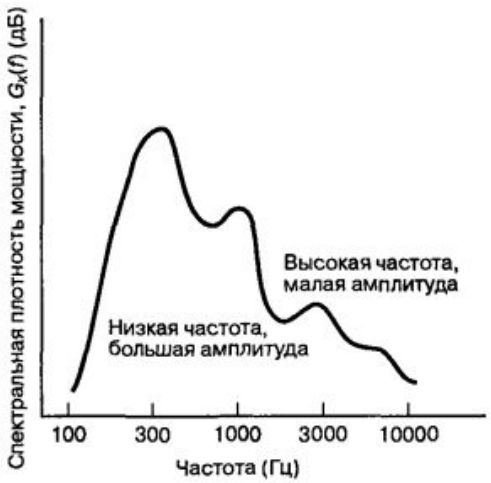
II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

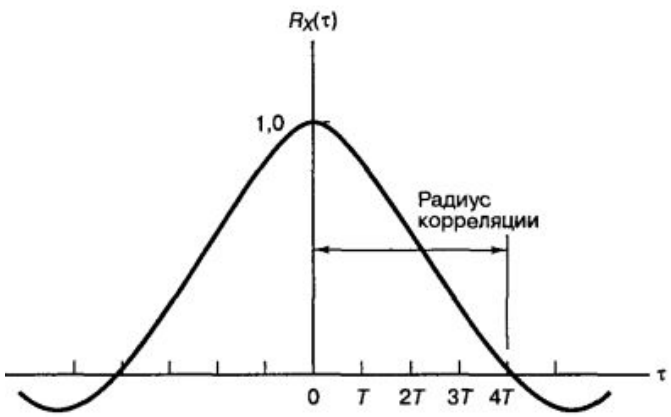
Шум квантования.



II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Дифференциальная импульсно-кодовая модуляция (ДИКМ).





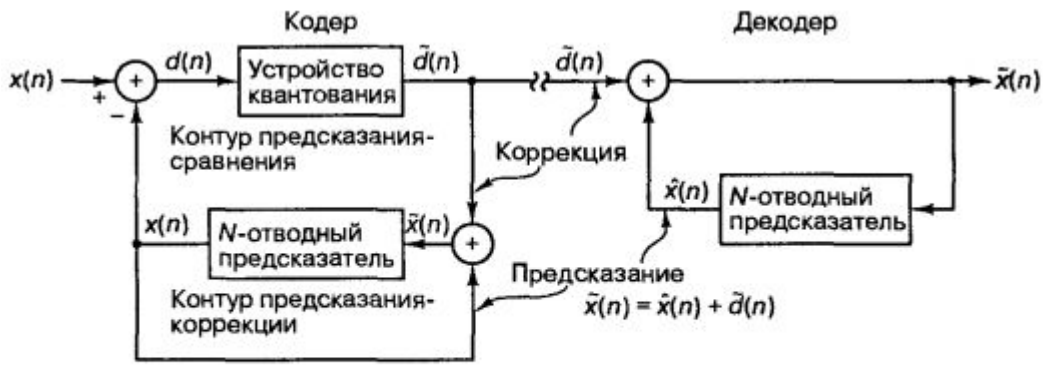


Рис. 13.20. N-отводный дифференциальный импульсно-кодовый модулятор с предсказанием

$$d(n) = x(n) - \hat{x}(n)\,,$$

$$\tilde{d}(n) = \mathrm{quant}\,[d(n)]$$

$$\tilde{x}(n) = \hat{x}(n) + \tilde{d}(n)$$

II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Одноотводное предсказание.

$$x(n|n-1) = ax(n-1|n-1)$$

$$d(n) = [x(n) - x(n|n-1)] =$$

$$= [x(n) - ax(n-1|n-1)]$$

$$\mathbf{E}\{d^2(n)\} = \mathbf{E}\{x(n)x(n) - 2ax(n)x(n-1|n-1) + a^2x(n-1|n-1)x(n-1|n-1)\}$$

$$R_d(0) = R_x(0) - 2aR_x(1) + a^2R_x(0) =$$

$$= R_x(0)[1 + a^2 - 2aC_x(1)].$$

$$\frac{\partial R_d(0)}{\partial a} = R_x(0)\left[2a - 2C_x(1)\right]$$

$$R_d^{\text{opt}}(0) = R_x(0)[1 + a^{\text{opt}}C_x(1) - 2a^{\text{opt}}C_x(1) =$$

$$= R_x(0)[1 - a^{\text{opt}}C_x(1)] =$$

$$= R_x(0)[1 - C_x^2(1)].$$

Усиление предсказание для одноотводного фильтра LPC

а) $R_d^{\text{opt}}(0) = R_x(0)(1 - 0{,}64) = 0{,}36R_x(0)$ Усиление предсказания = 1/(0,36) = 2,78 или 4,44 дБ

б) $R_d(0) = 2R_x(0)(1 - 0{,}8) = 0{,}40R_x(0).$ Усиление предсказания = 1/(0,40) = 2,50 или 3,98 дБ

II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

N-Одноотводное предсказание.

$$x(n|n-1) = a_1 x(n-1) + a_2 x(n-2) + \ldots + a_N x(n-N)$$

$$d(n) = x(n) - x(n|n-1) =$$

$$= x(n) - a_1 x(n-1) - a_2 x(n-2) - \ldots - a_N x(n-N)$$

$$\mathbf{E}\{d(n)d(n)\} = \mathbf{E}\{[x(n) - x(n|n-1)]^2\}$$

$$\frac{\partial R_d(0)}{\partial a_j} = \mathbf{E}\left\{2\left[x(n) - x(n|n-1)\right]\frac{\partial x(n|n-1)}{\partial a_j} x(n|n-1)\right\} =$$

$$= \mathbf{E}\left\{2\left[x(n) - x(n|n-1)\right]\left[-x(n-j)\right]\right\} =$$

$$= 2\mathbf{E}\left\{\left[x(n) - a_1 x(n-1) - a_2 x(n-2) - \ldots - a_N x(n_N)\right]\left[-x(n-j)\right]\right\} =$$

$$= 2\left[R_x(j) - a_1 R_x(j-1) - a_2 R_x(j-2) - \ldots - a_N R_x(j-N)\right].$$

$$\begin{bmatrix} R_x(1) \\ R_x(2) \\ R_x(3) \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ R_x(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_x(0) & R_x(-1) & R_x(-2) & \cdot & \cdot & \cdot & R_x(-N+1) \\ R_x(1) & R_x(0) & R_x(-1) & \cdot & \cdot & \cdot & R_x(-N+2) \\ R_x(2) & R_x(1) & R_x(0) & \cdot & \cdot & \cdot & R_x(-N+3) \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & \cdot & \cdot \\ R_x(N-1) & R_x(N-2) & R_x(N-3) & \cdot & \cdot & \cdot & R_x(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_N \end{bmatrix}^{\text{opt}}$$

$$\mathbf{r}_x(1, N) = \mathbf{R}_{xx}\mathbf{a}^{\text{opt}},$$

$$R_d(0) = \mathbf{E}\{[x(n) - \mathbf{a}^T\mathbf{x}(n-1)][x(n) - \mathbf{x}^T(n-1)\mathbf{a}]\} =$$

$$= R_x(0) - \mathbf{r}_x^T(1, N)\mathbf{a} - \mathbf{a}^T\mathbf{r}_x(-1, -N) + \mathbf{a}^T\mathbf{R}_{xx}\mathbf{a},$$

$$R_d(0) = R_x(0) - \mathbf{r}_x^T(1, N)\mathbf{a}^{\text{opt}} - \mathbf{a}^{\text{opt}\,T}\mathbf{r}_x(-1, -N) + \mathbf{a}^{\text{opt}\,T}\mathbf{r}_x(1, N) =$$

$$= R_x(0) - \mathbf{r}_x^T(-1, -N)\mathbf{a}^{\text{opt}}.$$

II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

N-Одноотводное предсказание.

$$\begin{bmatrix} R_x(0) & R_x(-1) & R_x(-2) & R_x(-3) & \dots & R_x(-N) \\ R_x(1) & R_x(0) & R_x(-1) & R_x(-2) & \dots & R_x(-N+1) \\ R_x(2) & R_x(1) & R_x(0) & R_x(-1) & \dots & R_x(-N+2) \\ R_x(3) & R_x(2) & R_x(1) & R_x(0) & \dots & R_x(-N+3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_x(N) & R_x(N-1) & R_x(N-2) & R_x(N-3) & \dots & R_x(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -a_1 \\ -a_2 \\ -a_3 \\ \vdots \\ -a_N \end{bmatrix}^{\text{opt}} = \begin{bmatrix} R_d(0) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}$$

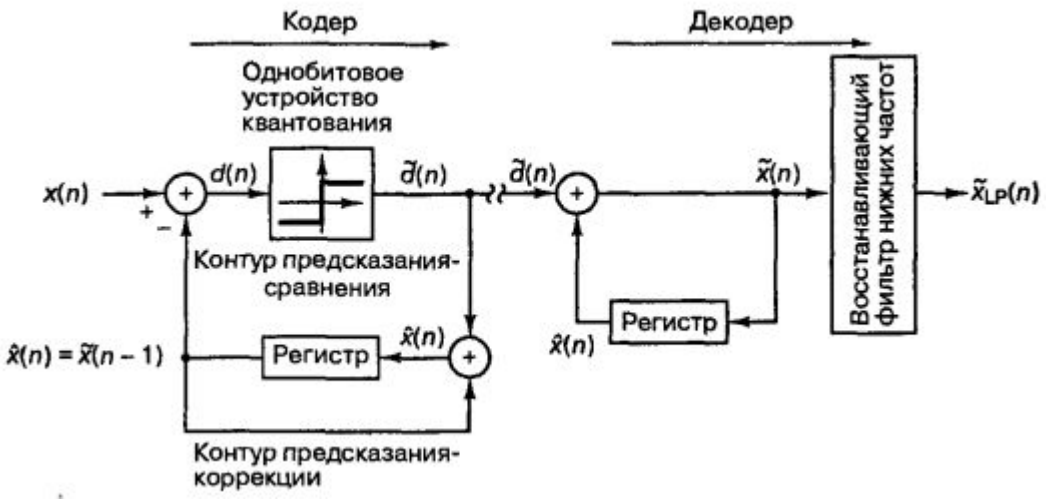
$$R_d(0) = R_x(0)[1 - a_1 C_x(1) - a_2 C_x(2) - \dots - a_N C_x(N)].$$

II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Дельта-модуляция.

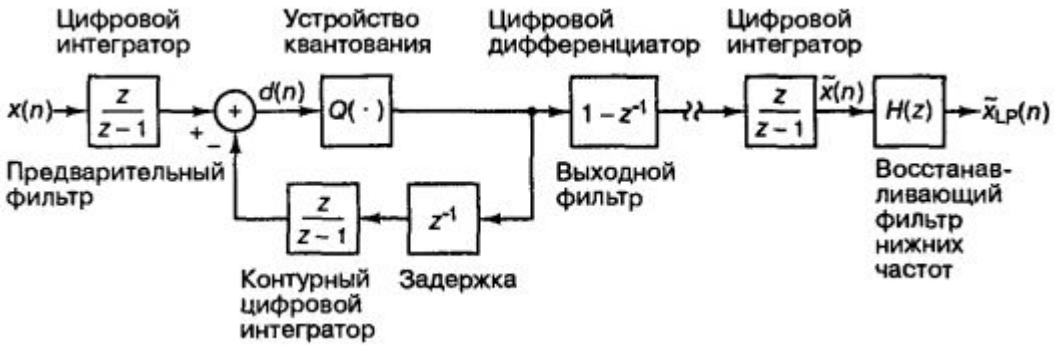
$$x(n|n-1) = x(n-1|n-1)$$

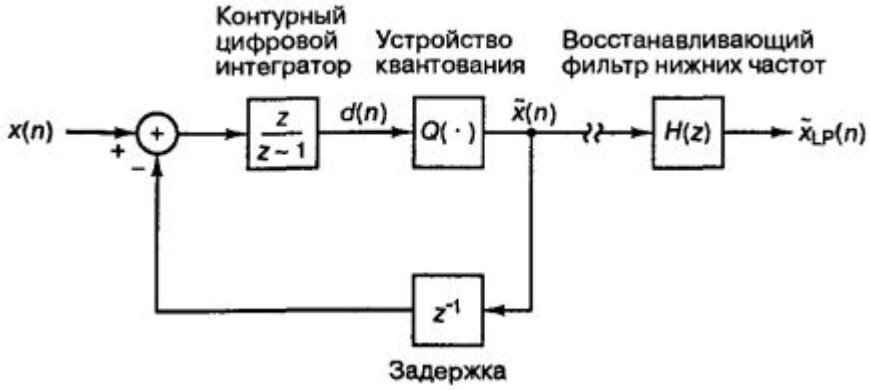
$$d(n) = x(n) - x(n|n-1)\ ,$$



II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

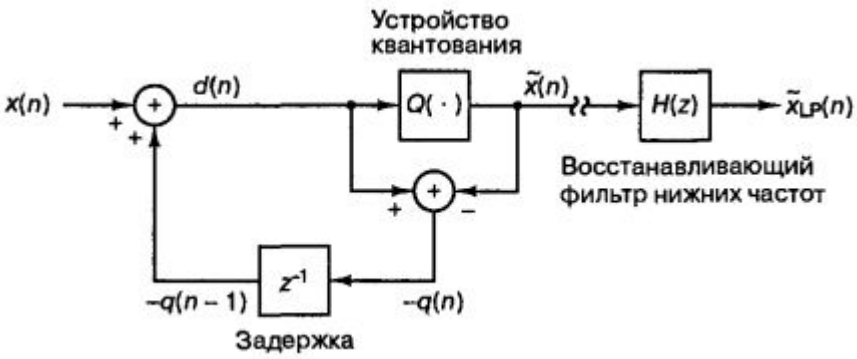
Сигма-дельта-модуляция.





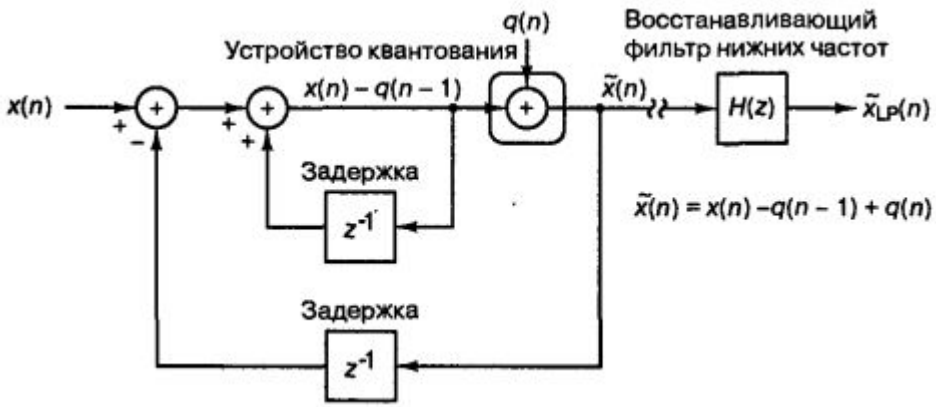
II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Сигма-дельта-модуляция.



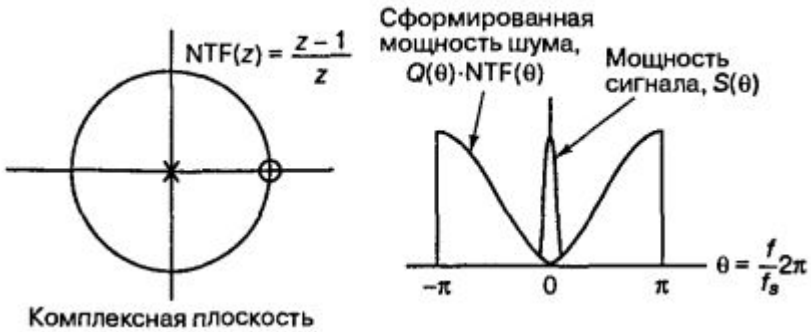
$$y(n) = \tilde{x}(n) = x(n) - q(n-1) + q(n) =$$
$$= x(n) + [q(n) - q(n-1)],$$

$$Y(Z) = X(Z) - Z^{-1}Q(Z) + Q(Z) =$$
$$= X(Z) + Q(Z)[1 - Z^{-1}] =$$
$$= X(Z) + Q(Z)\frac{Z-1}{Z}.$$



II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Шум сигма-дельта-модулятора.



$$H^2(\omega) = \left[2\sin\left(\frac{\omega}{2\omega_s}\right)\right]^2 =$$

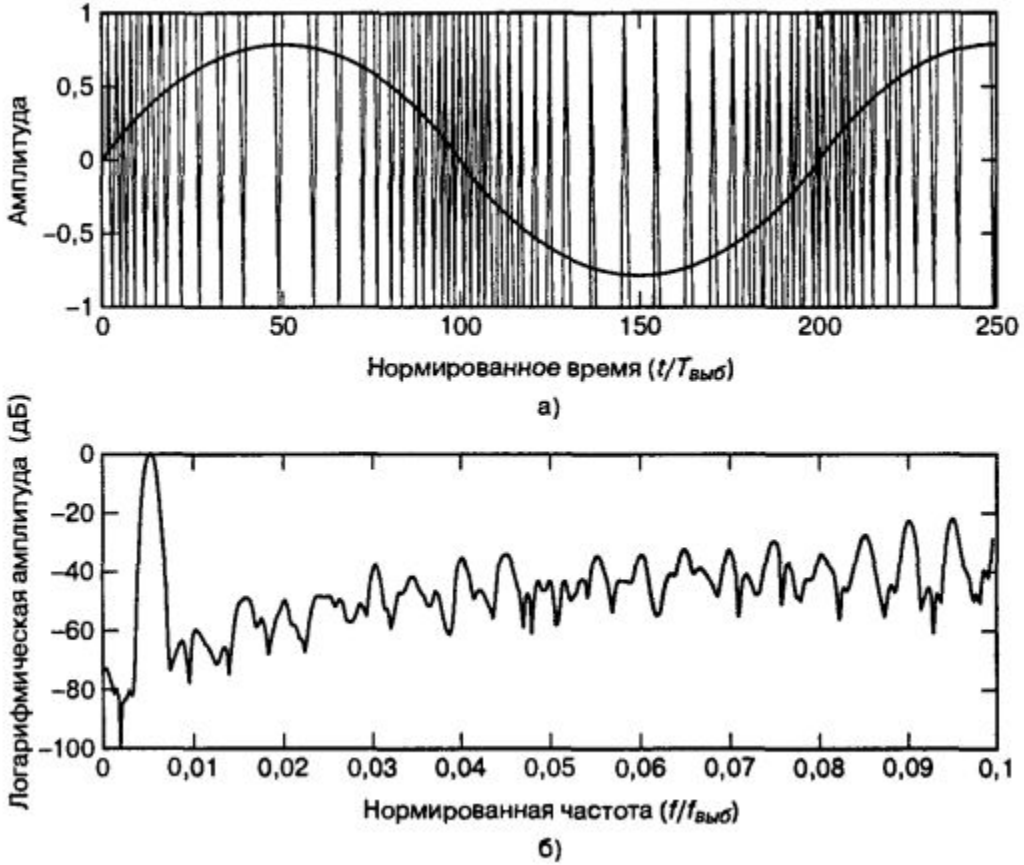
$$= 2\left[1 - \cos\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)\right] =$$

$$= 2\left\{1 - \left[1 - \frac{1}{2!}\left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 + \ldots + \right]\right\} \approx \left(\frac{\omega}{\omega_s}\right)^2 = \left(\frac{f}{f_s}\right)^2$$

$$N(\omega) = \frac{N_0}{2}\int_{-f_{BW}}^{f_{BW}} \left(\frac{f}{f_s}\right)^2 df = \frac{N_0}{2}\frac{1}{3}\left(\frac{f}{f_s}\right)^3\Bigg|_{f=-f_{BW}}^{f=f_{BW}} = \frac{N_0}{3}\left(\frac{f_{BW}}{f_s}\right)^3$$

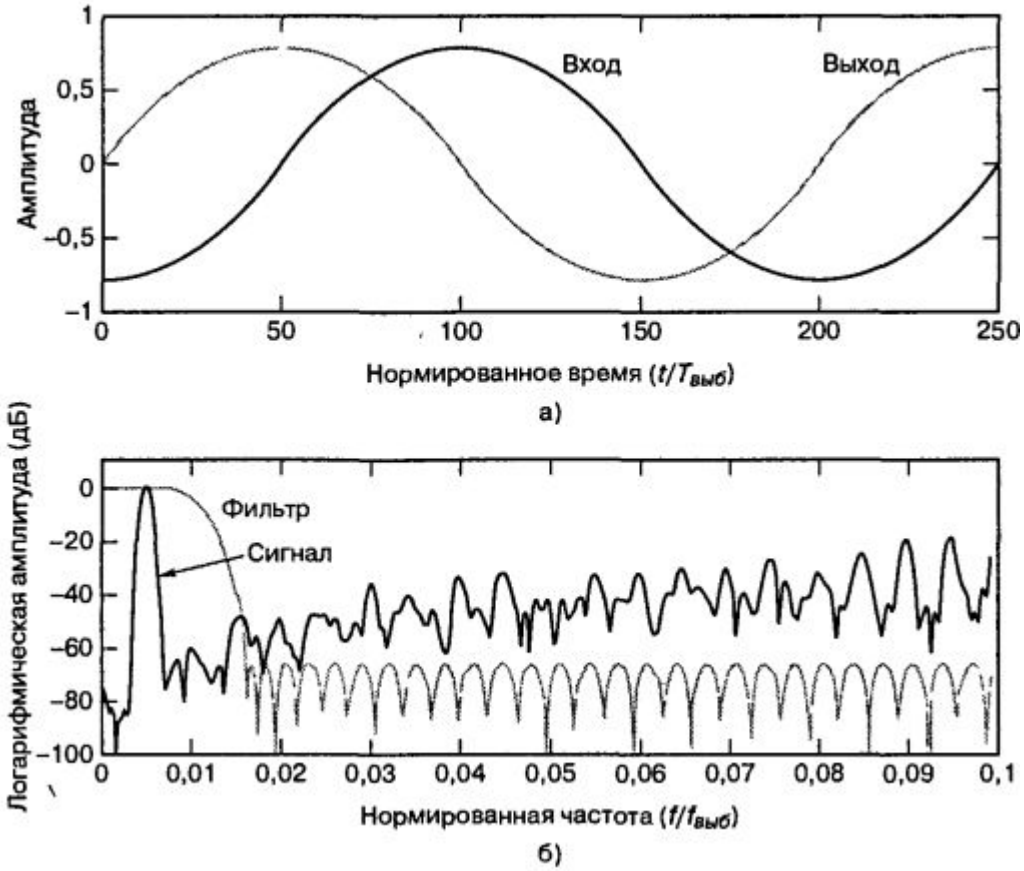
II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Сигма-дельта АЦП и ЦАП



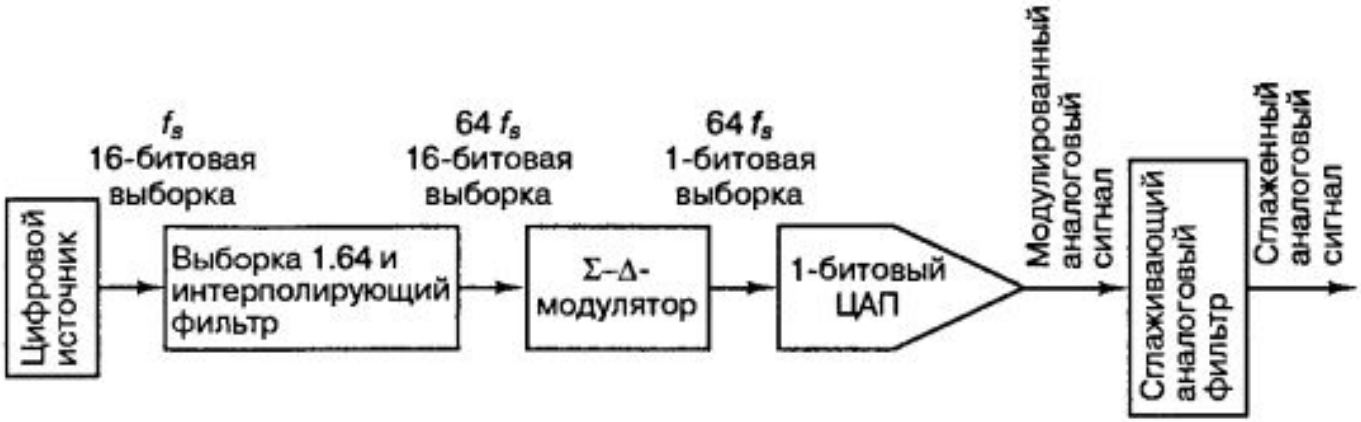
II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Сигма-дельта АЦП и ЦАП



II. Основные теоретические вопросы проектирования ПОР.

Сигма-дельта АЦП и ЦАП.



Спасибо за внимание.