

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Институт Радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова

Типовой расчет по курсу:
«Основы теории радиолокационных систем»

Студент: Жеребин В.Р.
Группа: ЭР-15-15

Москва
2019

Исходные данные:

1. Тип и назначение РЛС: РЛС обнаружения и автосопровождения по углу (по центру пачки).
2. Длина волны $\lambda = 6$ см, потери в атмосфере и АФУ $\eta = 3,0$ дБ.
3. Требуемая зона обзора по дальности и угловым координатам:
 $R_{\max} = 80$ км; $\varepsilon_{\alpha} = 100^{\circ}$.
4. Ширина ДНА РЛС $\Delta\alpha = 0,8^{\circ}$; $\Delta\beta = 36^{\circ}$.
5. Требуемая разрешающая способность по дальности $\Delta R = 15$ м.
6. Вид помехи и ее характеристики:
Собственный шум ПРМ, $T_{\text{ш}} = 320$ К°.
7. Вид модуляции зондирующего сигнала:
Сигнал ЛЧМ, длительность импульса $\tau_{\text{и}} = 30$ мкс, количество импульсов в пачке $m = 22$.
8. Требуемая вероятность правильного обнаружения $D = 0,9$ и ложной тревоги $F = 10^{-3}$.
9. Параметры цели:
ЭПС цели $\sigma_{\text{ц}} = 24$ м², скорость перемещения цели $V_{\min} - V_{\max} = 800 - 1200$ км/ч.
10. Способ обработки сигнала:
Фильтровой с некогерентным цифровым накоплением.

Необходимо:

1. Определить параметры зондирующего сигнала и изобразить сечения НДАФ по осям $\rho(\tau, F)$ и топографическое сечение НДАФ.
2. Составить развернутую функциональную схему РЛС.
3. С учетом потерь на обработку рассчитать требуемую мощность ПРД, необходимую для обеспечения заданной вероятности обнаружения на максимальной дальности.
4. Рассчитать характеристики цифрового согласованного фильтра.

Параметры зондирующего сигнала

Центральная частота: $f_0 = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{6 \times 10^{-2}} = 5 \times 10^9 \text{ Гц} = 5 \text{ ГГц}$

Ширина спектра сигнала: $\Delta f_c = \frac{c}{2\Delta R} = \frac{3 \times 10^8}{2 \cdot 15} = 10 \times 10^6 \text{ Гц} = 10 \text{ МГц}$

База сигнала: $B = \Delta f_c \tau_u = 10 \times 10^6 \cdot 30 \times 10^{-6} = 300$

Скорость изменения частоты: $k = \frac{\Delta f_c}{\tau_u} = \frac{10 \times 10^6}{30 \times 10^{-6}} = 333 \frac{\text{кГц}}{\text{мкс}}$

Период повторения: $T_{\Pi} = \frac{2R_{\max}}{c} 1,2 = \frac{2 \cdot 80 \times 10^3}{c} 1,2 = 640 \times 10^{-6} \text{ с} = 640 \text{ мкс}$

Разрешающая способность по скорости: $\Delta V_R = \frac{\lambda}{2\tau_u} = \frac{6 \times 10^{-2}}{2 \cdot 30 \times 10^{-6}} = 1000 \text{ м / с}$

Сечения НДАФ по осям $\rho(\tau, F)$

НДАФ некогерентной пачки импульсов: $\rho(\tau, F) = \sum_{i=-m}^m \left(1 - \frac{|i|}{m}\right) \cdot \rho_1(\tau - iT_{\Pi}, F),$

где $\rho_1(\tau, F)$ – НДАФ одиночного импульса.

Для одиночного импульса: $\rho_1(\tau, F) = \left| \frac{\sin \left[\pi (F + k\tau)(\tau_u - |\tau|) \right]}{\pi (F + k\tau) \tau_u} \right|, \text{ при } |\tau| \leq \tau_u$

Тогда $\rho(\tau, F) = \sum_{i=-m}^m \left(1 - \frac{|i|}{m}\right) \cdot \left| \frac{\sin \left[\pi (F + k(\tau - iT_{\Pi}))(\tau_u - |\tau - iT_{\Pi}|) \right]}{\pi (F + k(\tau - iT_{\Pi})) \tau_u} \right|$

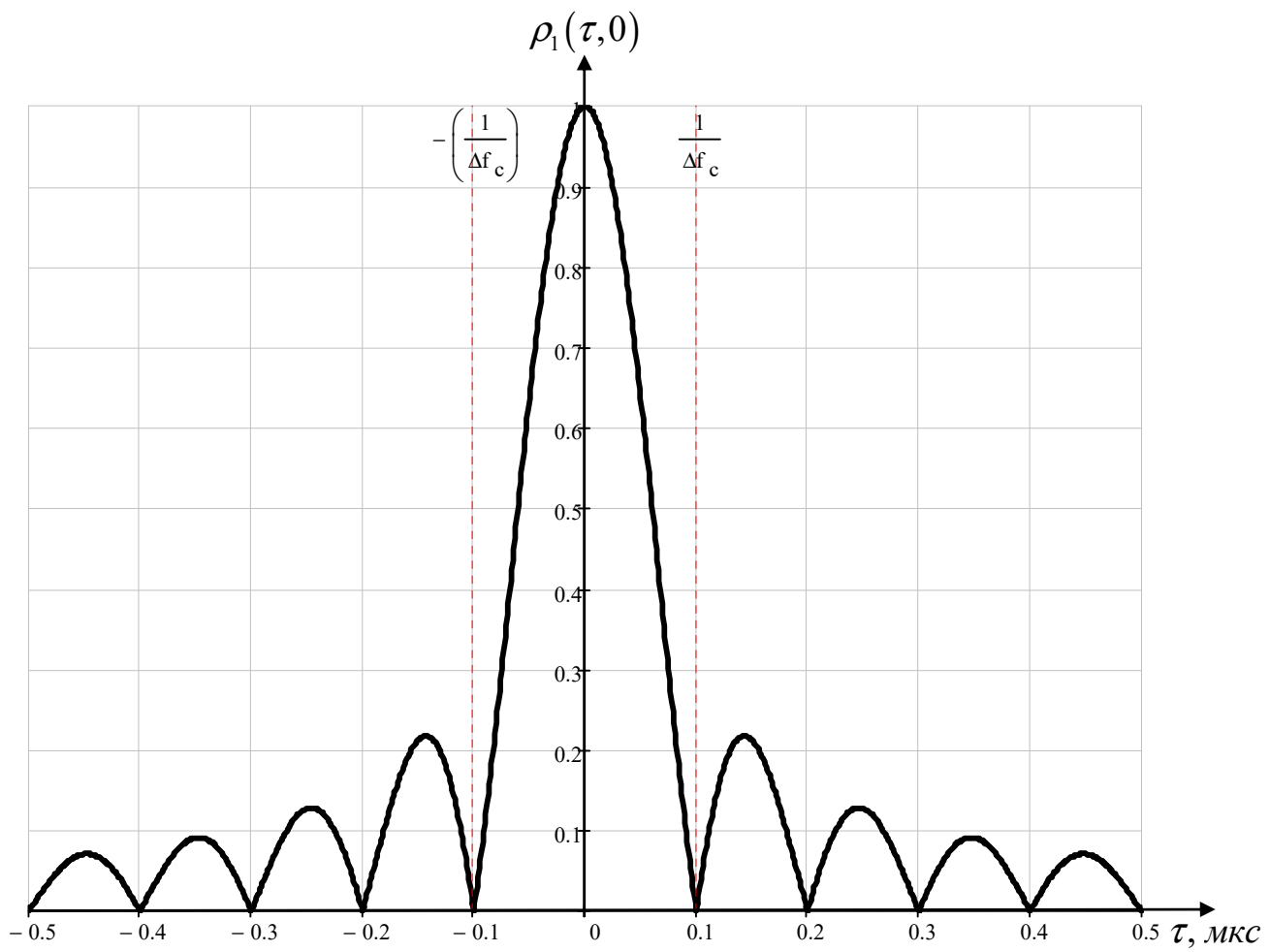


Рис. 1. Сечение НДАФ для одиночного импульса $\rho_1(\tau, 0)$

Сечение НДАФ для одиночного импульса:
$$\rho_1(\tau, 0) = \left| \frac{\sin(\pi \Delta f_c \tau)}{\pi \Delta f_c \tau} \right|$$

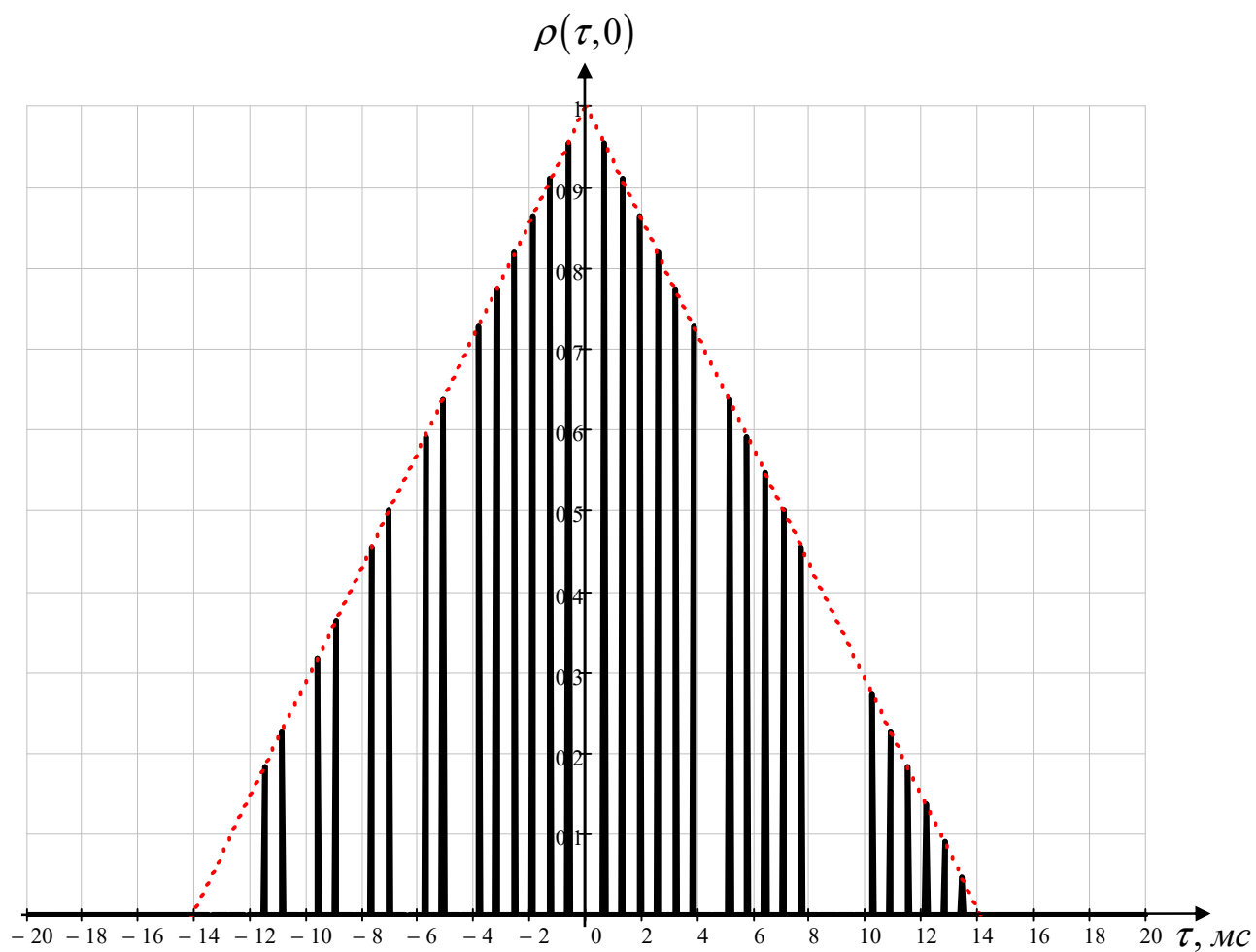


Рис. 2. Сечение НДАФ для пачки импульсов $\rho(\tau, 0)$

Сечение НДАФ для пачки импульсов:

$$\rho(\tau, 0) = \sum_{i=-m}^m \left(1 - \frac{|i|}{m} \right) \cdot \left| \frac{\sin[\pi k(\tau - iT_{II})(\tau_u - |\tau - iT_{II}|)]}{\pi k(\tau - iT_{II})\tau_u} \right|$$

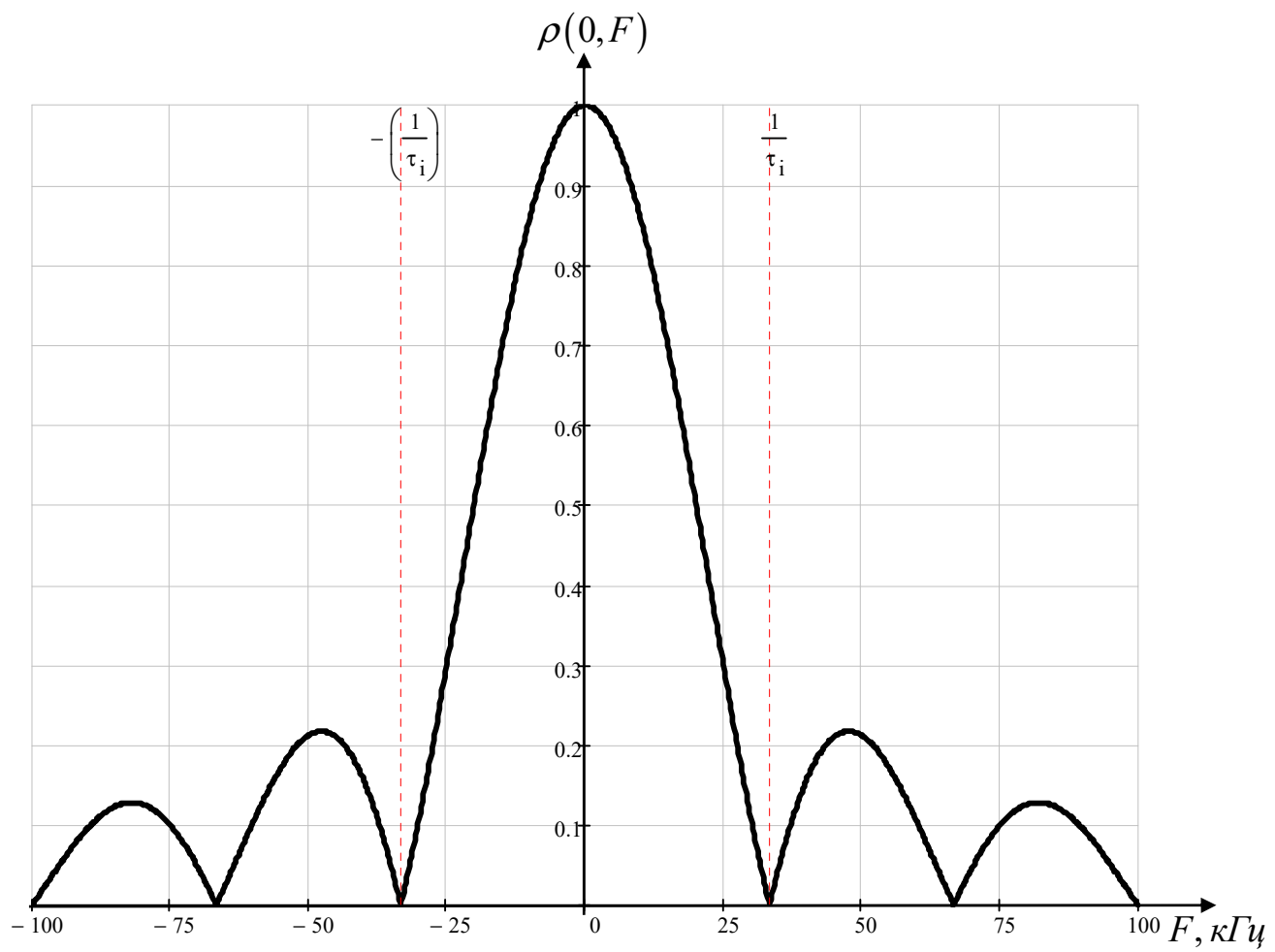


Рис. 3. Сечение НДАФ для пачки импульсов $\rho(0, F)$

Сечение НДАФ для пачки:
$$\rho(0, F) = \left| \frac{\sin(\pi F \tau_u)}{\pi F \tau_u} \right|$$

Топографическое сечение НДАФ

Развернутая функциональная схема РЛС

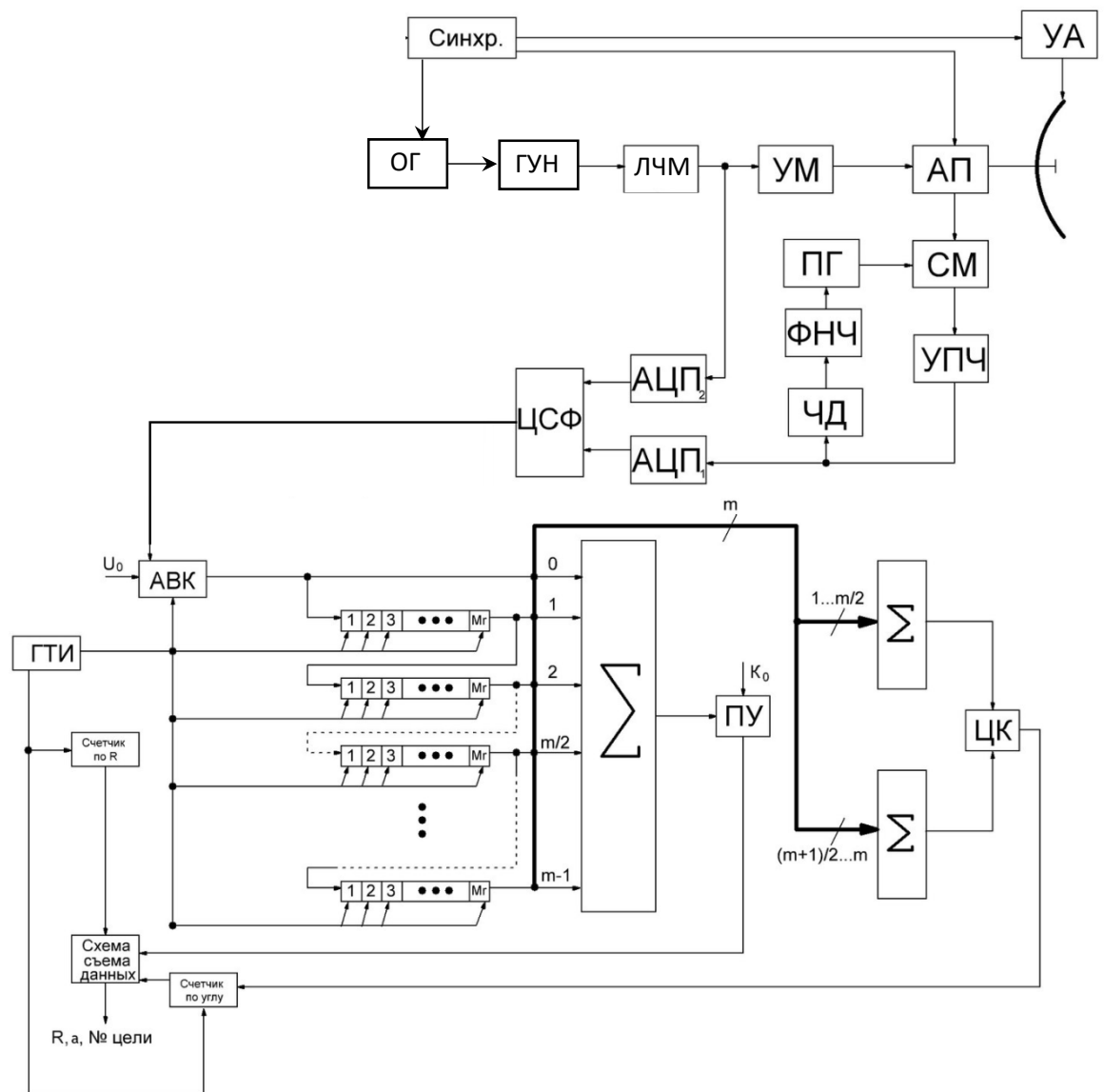


Рис. 6. Развернутая функциональная схема РЛС с многоканальным цифровым обнаружителем

Обозначения на схеме:

- ГУН – генератор управляемый напряжением
- УА – управление антенной
- АП – антенный переключатель
- ОГ – опорный генератор
- ЧД – частотный дискриминатор
- ПУ – пороговое устройство
- УМ – усилитель мощности
- АВК – амплитудной временной квантователь
- СМ – смеситель
- УПЧ – усилитель промежуточной частоты
- ГТИ – генератор тактовых импульсов
- ПГ – подстроечный генератор

Расчет основных параметров ЦО

Количество каналов по дальности:

$$R_{\min} = \frac{c \cdot \tau_u}{2} = \frac{3 \times 10^8 \cdot 30 \times 10^{-6}}{2} = 4,5 \times 10^3 \text{ м} = 4,5 \text{ км}$$

$$R_{\max} = 80 \times 10^3 \text{ м} = 80 \text{ км}; \Delta R = 15 \text{ м}$$

$$m_R = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{\Delta R} = \frac{80 \times 10^3 - 4,5 \times 10^3}{15} = 5033$$

Количество каналов по скорости:

$$m_V = \frac{V_{\max}}{\Delta V_R} = \frac{333}{500} \approx 0,66 \Rightarrow 1$$

Количество каналов по углу:

$$m_\varphi = \frac{\varepsilon_\alpha}{\Delta \alpha} = \frac{100^\circ}{0,8^\circ} = 125$$

Общее количество каналов:

$$m_\Sigma = m_R \cdot m_V \cdot m_\varphi = 629\,125$$

Вероятность ложной тревоги в одном канале:

$$F_1 = \frac{F}{m_\Sigma} = \frac{10^{-3}}{629\,125} = 1,59 \times 10^{-9}$$

Потери на трассе в атмосфере:

$$L_\eta = 10^{\frac{\eta}{10}} = 1,995$$

Отношение сигнал/шум:

$$q_\Sigma = \frac{\ln(F_1)}{\ln(D)} - 1 = \frac{-20,26}{-0,105} - 1 = 191,291 = 22,817 \text{ дБ} \text{ — для пачки импульсов}$$

$$\beta_m = 10 \log(m) = 13,424 \text{ дБ} \text{ — выигрыш от пачки}$$

$$\beta_{\text{ЦО}} \approx 2,5 \text{ дБ} \text{ — потери на цифровую обработку}$$

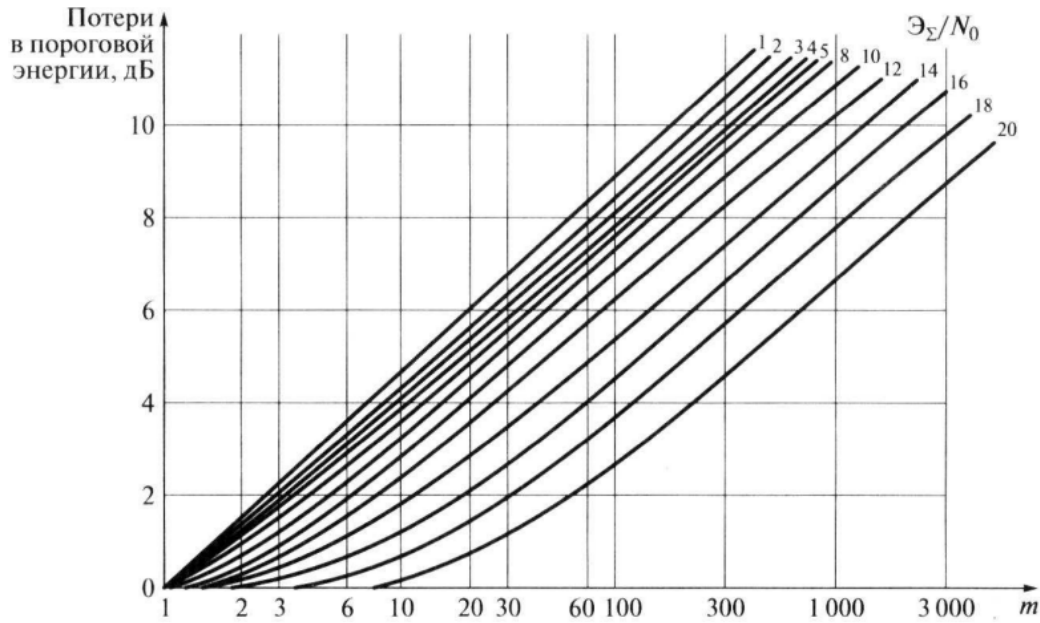


Рис. 7. Потери в пороговой энергии при обработке пачки из m НКГ импульсов

Для пачки из 22 импульсов, при $\frac{\Xi_c}{N_0} \approx 20$, потери на некогерентность составляют $\beta_{\text{НКГ}} \approx 1 \text{ дБ}$.

Доплеровское смещение при максимальной скорости цели:

$$F_d = \pm \frac{2 \cdot V_{\max}}{\lambda} = 22,2 \times 10^3 \text{ Гц}; \quad \tau_{ud} = \frac{F_d}{k} = 66,67 \times 10^{-9} \text{ с}$$

$$\beta_d = 10 \log \left(1 - \frac{\tau_{ud}}{\tau_u} \right) \approx 0,01 \text{ дБ} - \text{потери на доплеровское смещение.}$$

$q_{\text{ex}} = q_{\Sigma} - \beta_m + \beta_{\text{НКГ}} + \beta_{\text{ЦО}} + \beta_d = 12,902 \text{ дБ}$ – требуемое отношение сигнал/шум для одиночного импульса с учетом потерь на обработку.

$K_0 = 1,5\sqrt{m} \approx 7$ – оптимальный порог обнаружения пачки.

Вероятность превышения шумом порога квантования связана с вероятностью

$$\text{ложной тревоги: } F = \sum_{k=K_0}^m C_m^k p_u^k (1 - p_u)^{m-k}; \quad C_m^k = \frac{m!}{k!(m-k)!} \rightarrow p_u = 0,112$$

$$\text{Нормированный порог квантования: } X_0 = \sqrt{2 \cdot \ln \left(\frac{1}{p_u} \right)} = 2,092$$

Расчет требуемой мощности ПРД

Основное уравнение радиолокации для активной РЛС с пассивным ответом:

$$P_{нрм} = \frac{P_{нр\delta} KHD_a^2 \lambda^2 \sigma_{ц}}{(4\pi)^3 R^4 \eta}.$$

Коэффициент направленного действия антенны $KHD_a = \frac{4\pi}{\lambda^2} S_{\text{эфф}}$.

Эффективная площадь антенны

$$S_{\text{эфф}} = KИП \cdot D_{\alpha} \cdot D_{\beta} = KИП \frac{\lambda^2}{\Delta\alpha\Delta\beta} \Rightarrow KHD_a = \frac{4\pi KИП}{\Delta\alpha\Delta\beta}, \text{ где коэффициент}$$

использования поверхности $KИП=0,5$.

В таком случае мощность передатчика находится по формуле

$$P_{нр\delta} = \frac{(4\pi)^3 R^4 \eta P_{нрм}}{KHD_a^2 \lambda^2 \sigma_{ц}} = \frac{(4\pi)^3 R^4 \eta (\Delta\alpha\Delta\beta)^2 P_{нрм}}{(4\pi KИП)^2 \lambda^2 \sigma_{ц}} = \frac{4\pi R^4 \eta (\Delta\alpha\Delta\beta)^2 P_{нрм}}{KИП^2 \lambda^2 \sigma_{ц}}.$$

Средняя мощность сигнала на входе ПРМ $P_{нрмср} = \frac{\mathfrak{E}_1}{T_{\Pi}} = \frac{N_0 \frac{\mathfrak{E}_1}{N_0}}{T_{\Pi}} = \frac{k_B T_{ш} \frac{\mathfrak{E}_1}{N_0}}{T_{\Pi}}, \text{ где}$

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} / \text{ К}$ - постоянная Больцмана.

$$\frac{\mathfrak{E}_1}{N_0} = \sqrt{2 \cdot 10^{10} \frac{q_{\text{ex}}}{N_0}} = 6,246$$

Тогда средняя мощность передатчика, необходимая для обнаружения цели на

максимальной дальности $P_{нр\delta ср} = \frac{(4\pi)^3 R_{\text{max}}^4 L (\Delta\alpha\Delta\beta)^2 k_B T_{ш} \frac{\mathfrak{E}_1}{N_0}}{KИП^2 \lambda^2 \sigma_{ц} T_{\Pi}} =$

$$= \frac{(4\pi)^3 \cdot (80 \cdot 10^3)^4 \cdot 1,995 \cdot \left(0,8 \frac{\pi}{180} \cdot 36 \frac{\pi}{180}\right)^2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 320 \cdot 6,246}{0,5^2 \cdot 0,06^2 \cdot 24 \cdot 640 \cdot 10^{-6}} \approx 99,626 \cdot 10^3 = 99,6 \text{ кВт}$$

В свою очередь импульсная мощность передатчика $P_{примп} = P_{прдср} Q$, где

$Q = \frac{T_{\Pi}}{\tau_u} = 21,33$ – скважность импульсов. Тогда импульсная мощность

$$P_{примп} = P_{прдср} Q = 2,125 \times 10^6 = 2,125 \text{ МВт}$$

Характеристики цифрового согласованного фильтра

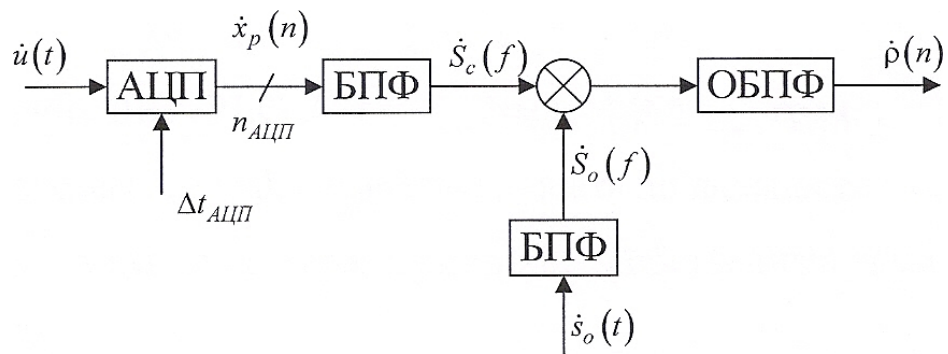


Рис. 8. Структурная схема цифрового СФ

$\Delta f_{АЦП} = 2 \cdot \Delta f_c = 20 \text{ МГц}$ – тактовая частота АЦП

$\Delta t_{АЦП} = \frac{1}{\Delta f_{АЦП}} = 50 \text{ нс}$ – период дискретизации АЦП

$N \cdot \Delta t_{АЦП} \geq \tau_u \rightarrow N \geq \frac{\tau_u}{\Delta t_{АЦП}} = 600$ – число дискретных отчетов входного сигнала

$n_{АЦП} = \log_2 \left(10^{\frac{q_{\text{вх}}}{10}} \right) = 5,557 \rightarrow n_{АЦП} = 6$ – минимальная разрядность АЦП