

Лекция №14

Курс Т и ТРЛ и РН

- В программе курса рассматриваются автономные радионавигационные системы летательных аппаратов.
- Будут рассмотрены вопросы построения и функционирования радиовысотометров, доплеровских измерителей скорости и угла сноса летательных аппаратов, а также систем счисления пути и обзорно-сравнительных навигационных систем.

РАДИОВЫСОТОМЕРЫ

1. Отражение радиосигналов от земной и морской поверхности. Расчет мощности отраженного сигнала

1.1. Критерий шероховатости поверхности

Гладкая

$$\sigma_h \cos \theta < \lambda/8$$

Шероховатая

$$\sigma_h \cos \theta > \lambda/8$$

$$\theta \approx 0^\circ, \sigma_h \approx \text{см}$$

РВ – системы, работающие в дециметровом и более длинноволновом диапазоне волн.

Бетонированная взлетно-посадочная полоса аэродрома, спокойная поверхность водоема, ровные участки пустыни и т.д.

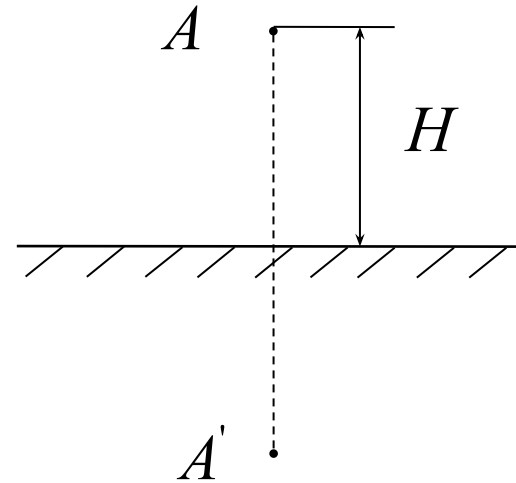
РВ – системы, работающие в сантиметровом диапазоне длин волн.

Морская поверхность при волнении, овраги, холмы, лесистую местность и т.д.

1.2. Отражение волн от гладкой поверхности

$$P_0 \left[4\pi (2H)^2 \right]^{-1}$$

$$\frac{P_0 G_{\text{ПРД}} K_f^2}{4\pi (2H)^2} g_{\text{ПРД}}(0,0)$$



$$S_{\text{ПРМ}} = G_{\text{ПРМ}} \lambda^2 g_{\text{ПРМ}}(0,0) / 4\pi$$

$$P_{\text{ЗЕР}} = \frac{P_0 G^2 \lambda^2 K_f^2 g^2(0,0)}{(8\pi H)^2}$$

Вид поверхнос ти	Диапазон волн	K_f
Сухая почва	1 см – 10 м	0,4
Влажная почва	1 см – 10 м	0,6
Морская вода	1 см	0,75
Морская вода	10 см	0,8
Морская вода	1 м	0,9

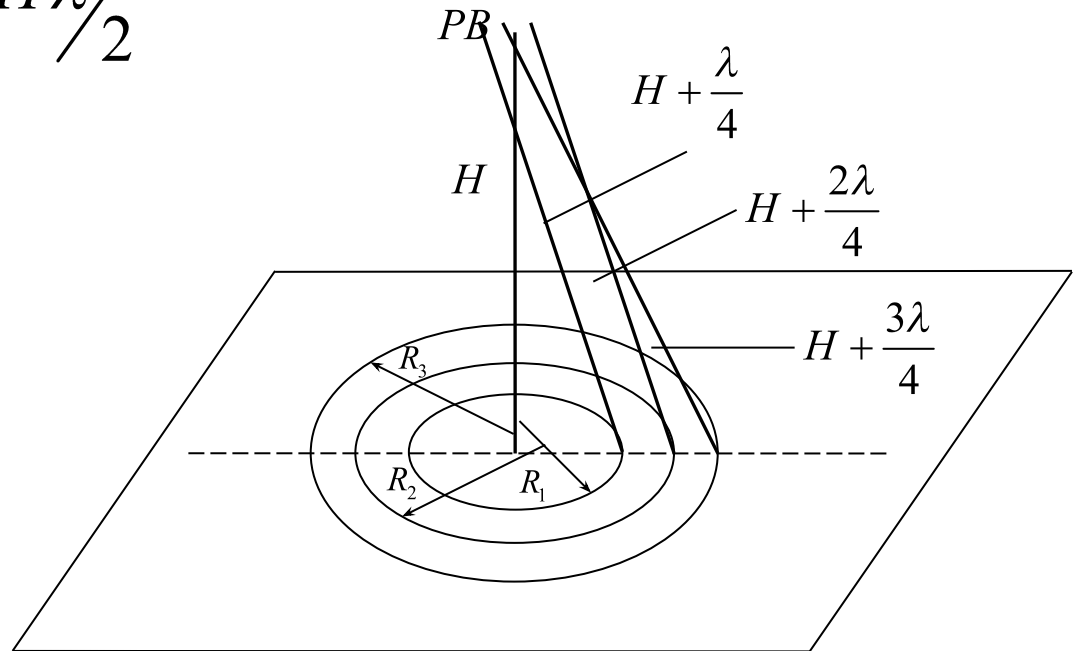
1.2. Отражение волн от гладкой поверхности

$$R_1 = \sqrt{\left(H + \frac{\lambda}{4}\right)^2 - H^2} \approx \sqrt{\frac{H\lambda}{2}} \quad R_2 = \sqrt{H\lambda}$$

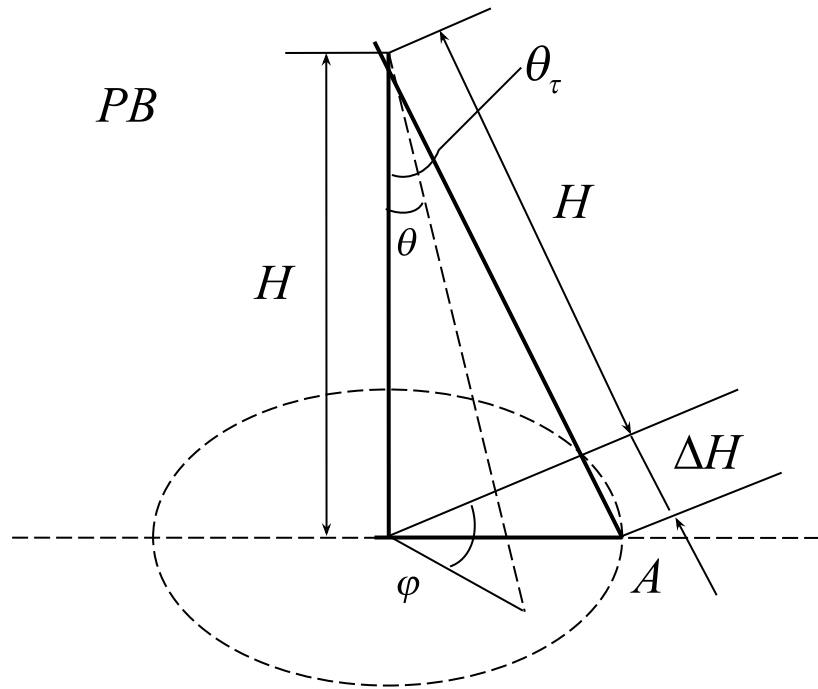
$$R_4 = \sqrt{2H\lambda} \quad R_3 = \sqrt{\frac{3H\lambda}{2}}$$

$$S_k = \pi (R_{k+1}^2 - R_k^2)$$

$$S_k = \pi H \lambda / 2$$



1.3. Отражение волн от шероховатой поверхности



$$\Delta H = \frac{c\tau_a}{2} \quad \tau_a = \frac{1}{\Delta f}$$

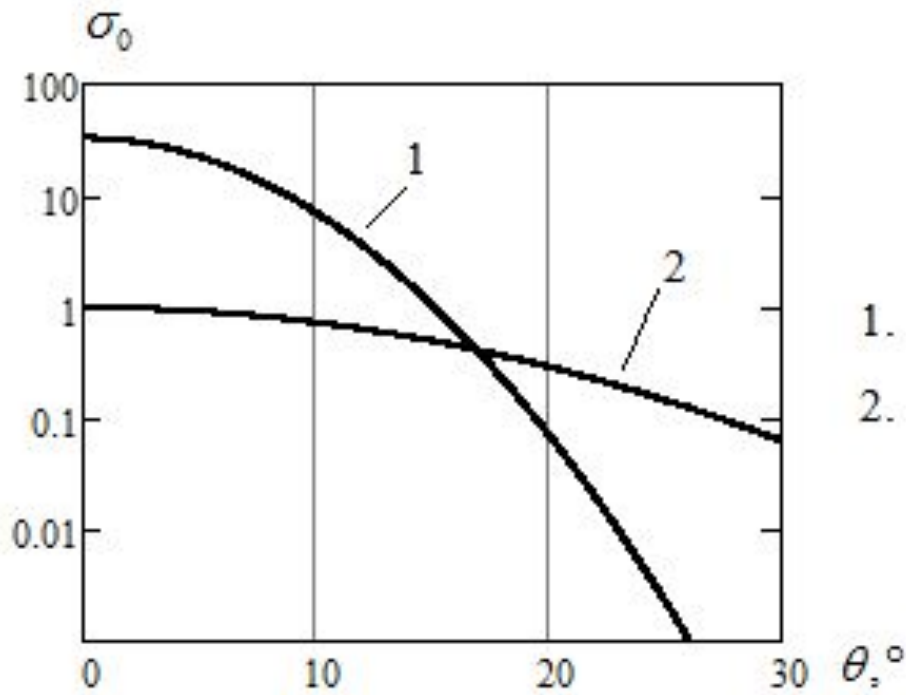
$$R \approx \sqrt{cH\tau_a} \quad S_\tau = \pi R^2 \approx \pi Hc\tau_a$$

$$P_{\text{рас}} = \frac{P_0 G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 H^4} = \frac{P_0 G^2 \lambda^2 \sigma_0 S_\tau}{(4\pi)^3 H^4}$$

$$\Delta\theta_0 > 2\theta_\tau : P_{\text{рас}} = \frac{P_0 G^2 \lambda^2 \sigma_0 \pi Hc\tau_a}{(4\pi)^3 H^4} = \frac{P_0 G^2 \lambda^2 \sigma_0 c}{64\pi^2 H^3 \Delta f}$$

$$\Delta\theta_0 < 2\theta_\tau : R \approx H \operatorname{tg} \left(\frac{\Delta\theta_0}{2} \right) \quad P_{\text{рас}} = \frac{P_0 G^2 \lambda^2 \sigma_0 \operatorname{tg}^2 \left(\frac{\Delta\theta_0}{2} \right)}{64\pi^2 H^2}$$

1.3. Отражение волн от шероховатой поверхности



$$\sigma_0(\theta) = \frac{K_f^2}{a_w^2} \exp\left(-\frac{\theta^2}{a_w^2}\right)$$

1. $K_f^2 = 0,8; a_w^2 = 0,02.$
2. $K_f^2 = 0,31; a_w^2 = 0,1.$

$$a_w^2 = \frac{4\sigma_h^2}{l_h^2}$$

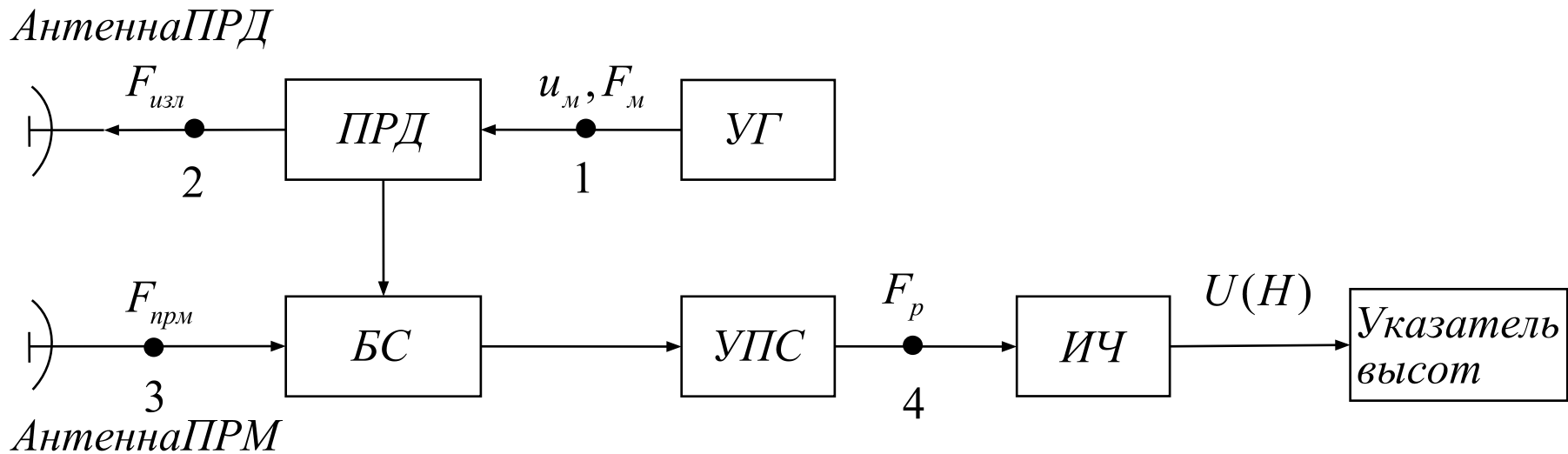
$$\Delta\theta_{op} = \sqrt{\pi} a_w \approx 3,4 \frac{\sigma_h}{l_h}$$

$$P_{рас} \approx \frac{P_0 \lambda^2 G_{ПРД} G_{ПРМ} \lambda^2 K_f^2}{(8\pi H)^2 \frac{\Delta\theta_0^2}{\Delta\theta_0^2 + \Delta\theta_{op}^2}} \exp\left(-\frac{\pi\theta_s^2}{\Delta\theta_0^2 + \Delta\theta_{op}^2}\right)$$

$$P_{зер} = \frac{P_0 G^2 \lambda^2 K_f^2 g^2(0,0)}{(8\pi)^2 H^2} \exp\left[-\left(4\pi \frac{\sigma_h}{\lambda}\right)^2\right] \quad P_{\Sigma} = P_{зер} + P_{рас}$$

2. Принцип действия и основные соотношения для радиовысотометров с частотной модуляцией

2.1. Принцип действия



УГ – управляемый генератор

ПРД – передатчик

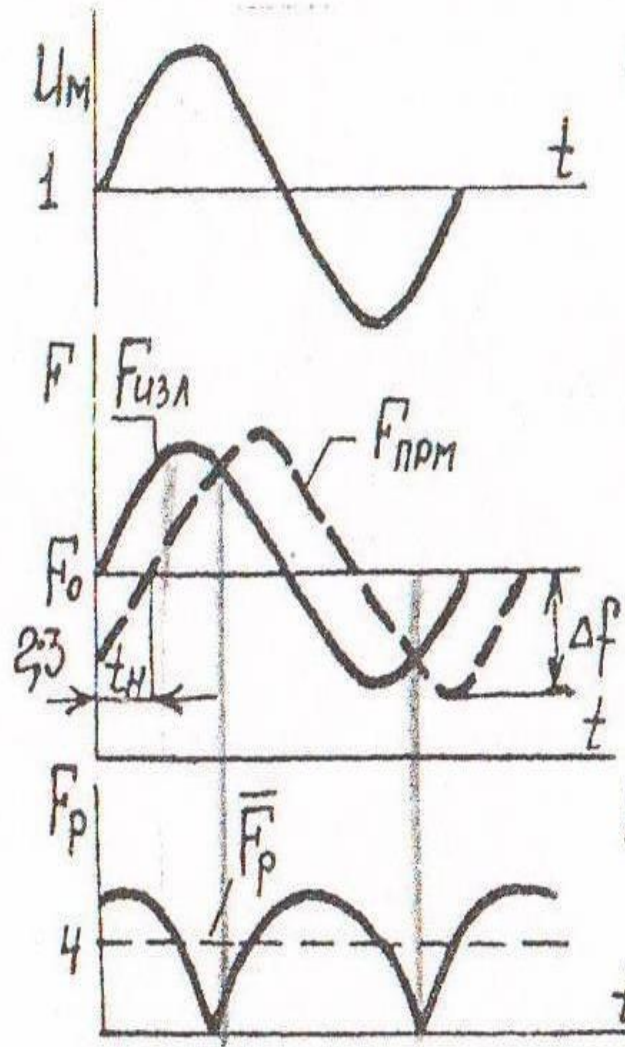
БС – балансный смеситель

УПС – усилитель преобразованного сигнала

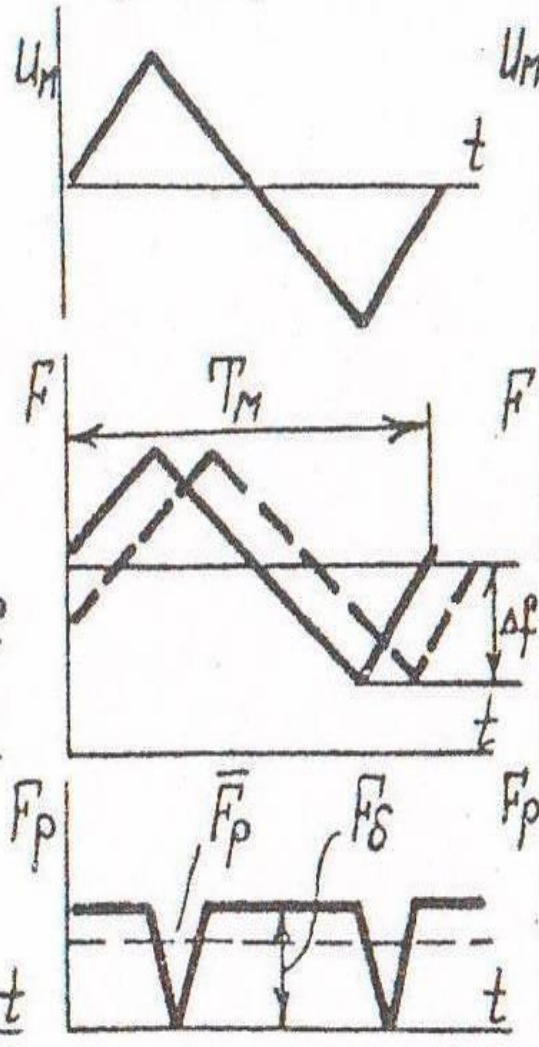
ИЧ – измеритель частоты

2.1. Принцип действия

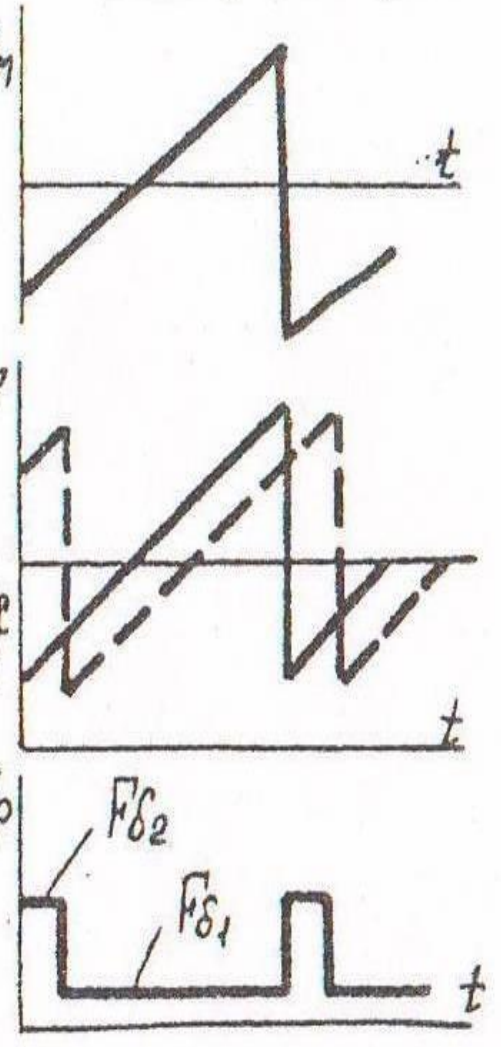
Гармоническая ЧМ (ГЧМ)



Симметричная ЛЧМ (СЛЧМ)



Несимметричная ЛЧМ (НСЛЧМ)



2.2. Основные соотношения для РВ с различными законами ЧМ

Гармоническая ЧМ

$$u_{\Delta\omega}(t) = U_c \sin \left[\omega_0 t + \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_M} \right) \sin \omega_M t \right]$$

$$u_{nрм}(t) = U_{nрм} \sin \left[\omega_0 (t - t_h) + \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_M} \right) \sin \omega_M (t - t_h) + \varphi_0 \right]$$

$$(u_{\bar{c}})_{нч} = U_{\bar{c}} \cos \left\{ \omega_0 t_h - \varphi_0 + 2 \left(\frac{\Delta\omega}{\omega_M} \right) \left[\sin \left(\frac{\omega_M t}{2} \right) \cos \left[\omega_M \left(t - \frac{t_h}{2} \right) \right] \right] \right\}$$

$$F_{\text{взл}} = \left| F_{nрм} - F \right| = \left| 2\Delta f \sin \left(\frac{\pi F t}{M} \right) \sin \left[2\pi F \left(t - \frac{t_h}{2} \right) \right] \right|$$

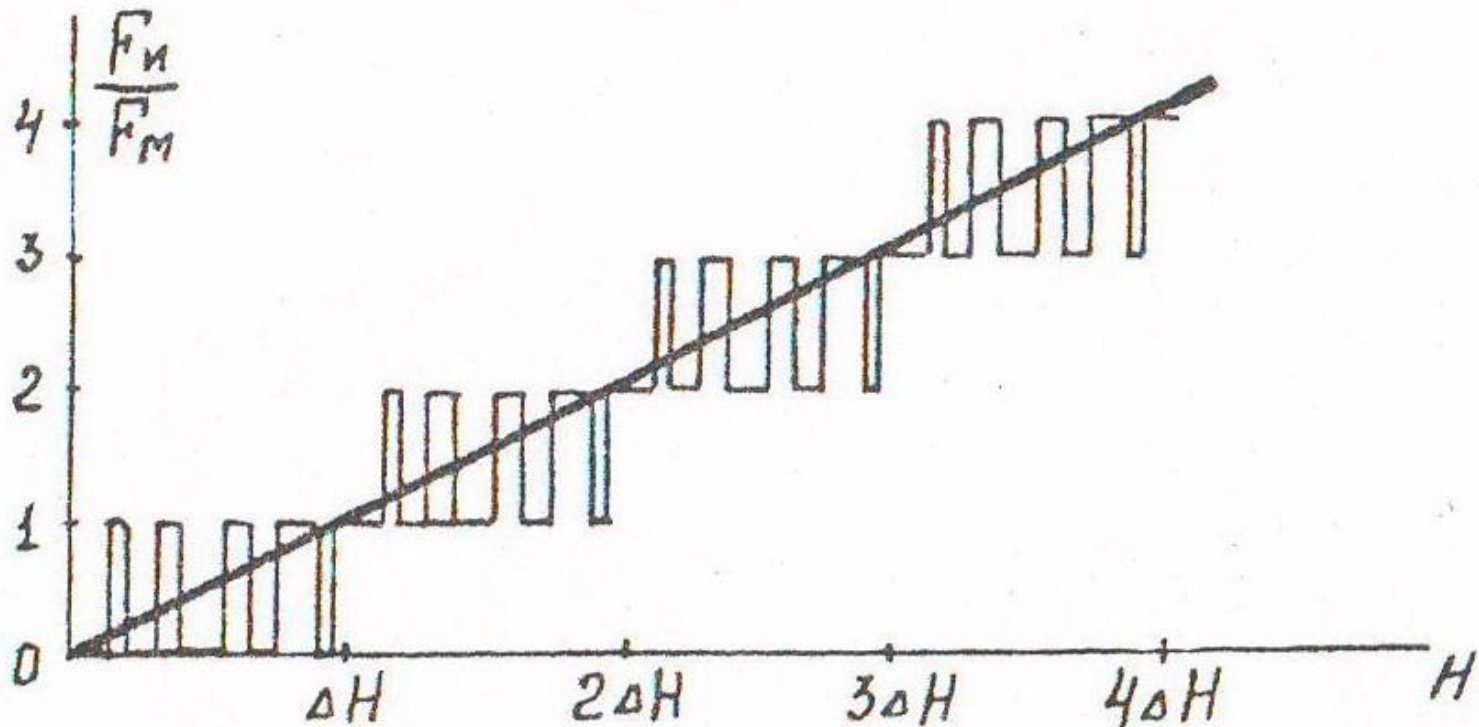
$$\overline{F_M} = \frac{2}{T_M} \int_0^{T_M/2} F_p(t) dt = \frac{(4\Delta f)}{\pi} \sin(\pi F t) = \frac{8\Delta f F_M H}{c}$$

2.2. Основные соотношения для РВ с различными законами ЧМ

$$(u_{\bar{bc}})_{нч} = U_{\bar{bc}} \cos(\varphi_T + d \cos \omega_M t); \quad F_{И} = N_T F_M;$$

$$\cos(\varphi_M + d \cos \omega t) = 0; \quad N_T = \frac{4d}{2\pi} = \frac{2\Delta\omega t_n}{\pi} = \frac{8\Delta f H}{c}$$

$$F_{И} = \frac{8\Delta f F_M H}{c}; \quad \Delta H = \frac{c}{(8\Delta f)}$$

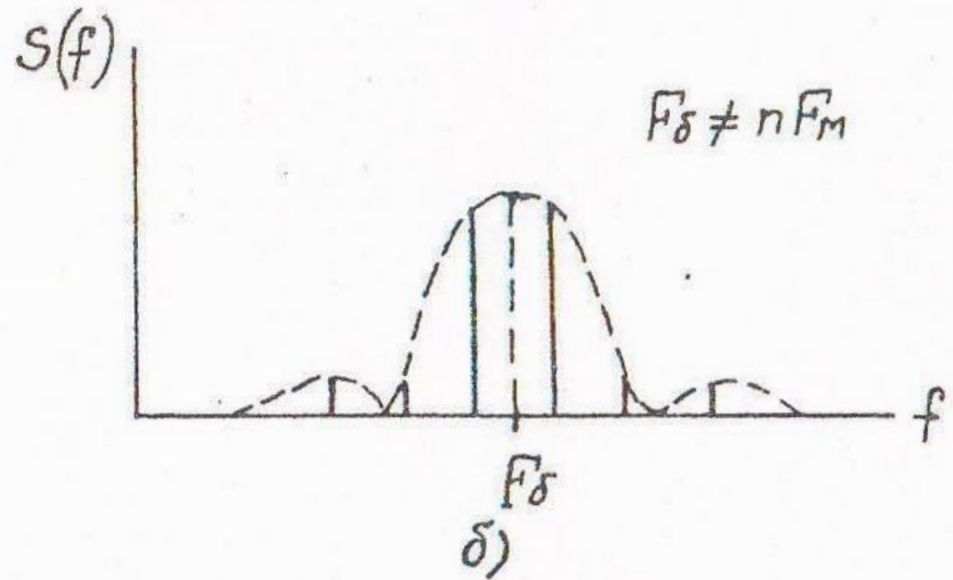
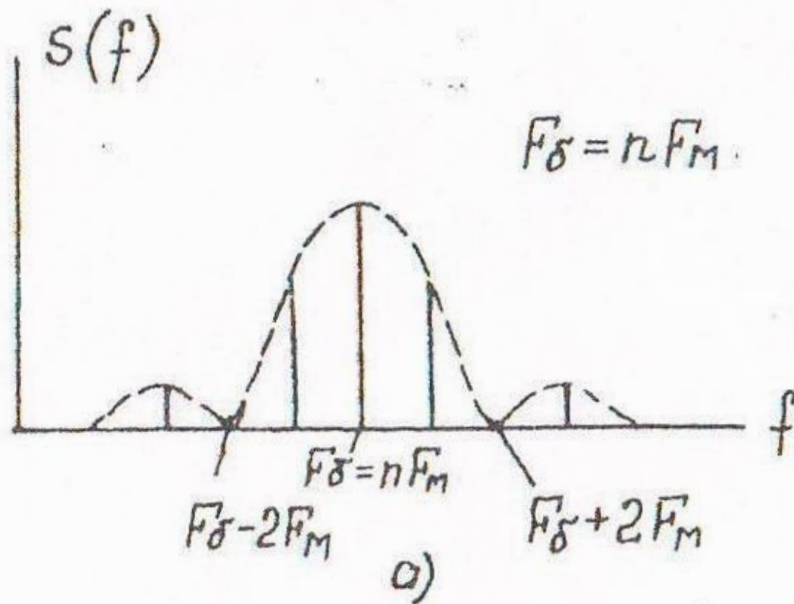


2.2. Основные соотношения для РВ с различными законами ЧМ

Линейная ЧМ

$$\overline{F_M} = 2/T_p \int_0^{T_M/2} F(t) dt = F_H \left(1 - \frac{2t}{T} \right)$$

$$F_\delta = 4\Delta f F_M t_h = 8\Delta f F_M H/c$$



2.2. Основные соотношения для РВ с различными законами ЧМ

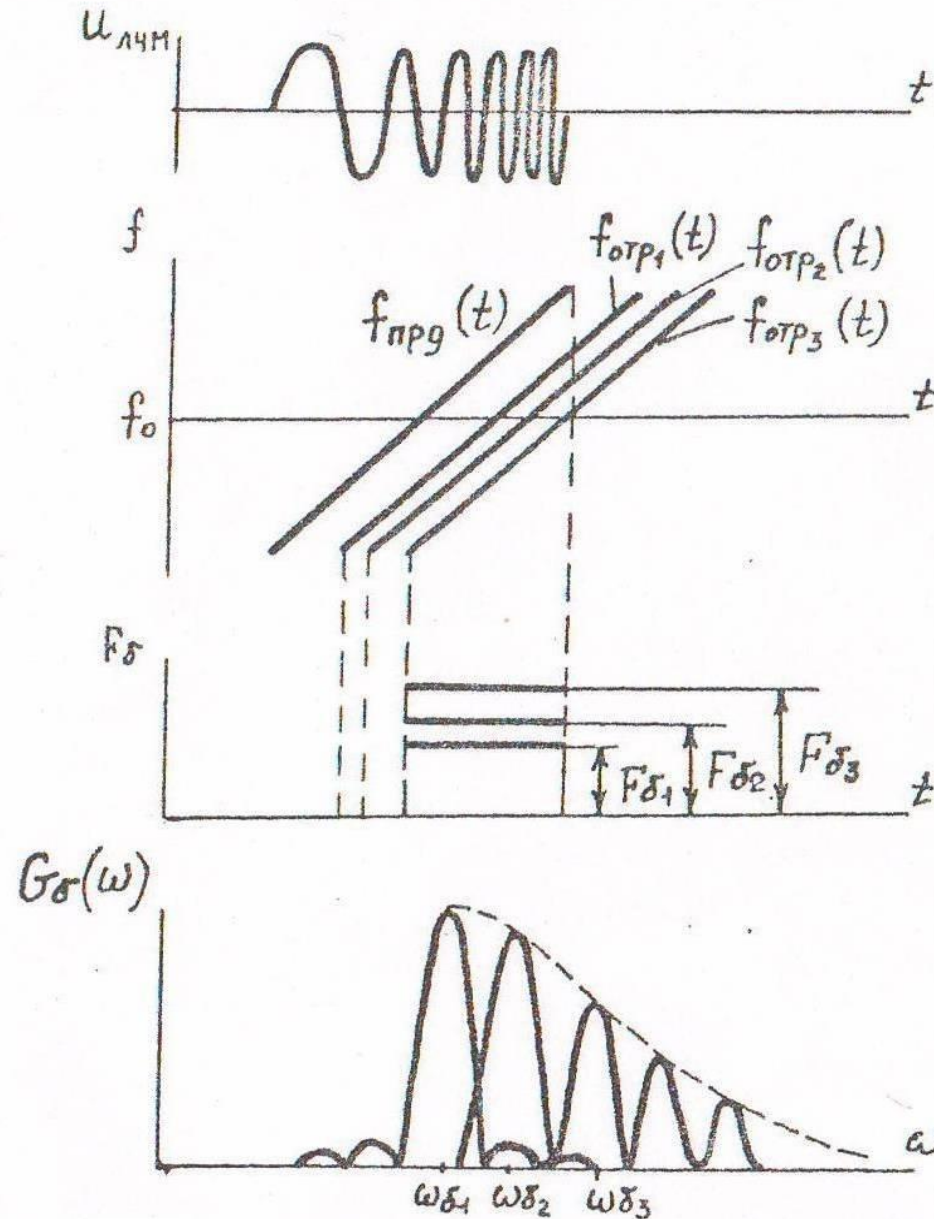
$$H_{\min} = cF_{\delta \min} / (8\Delta f F_M) = c / (8\Delta f)$$

$$H_{\max} = cF_{\delta \max} / (8\Delta f F_M) \leq c / (8F_M)$$

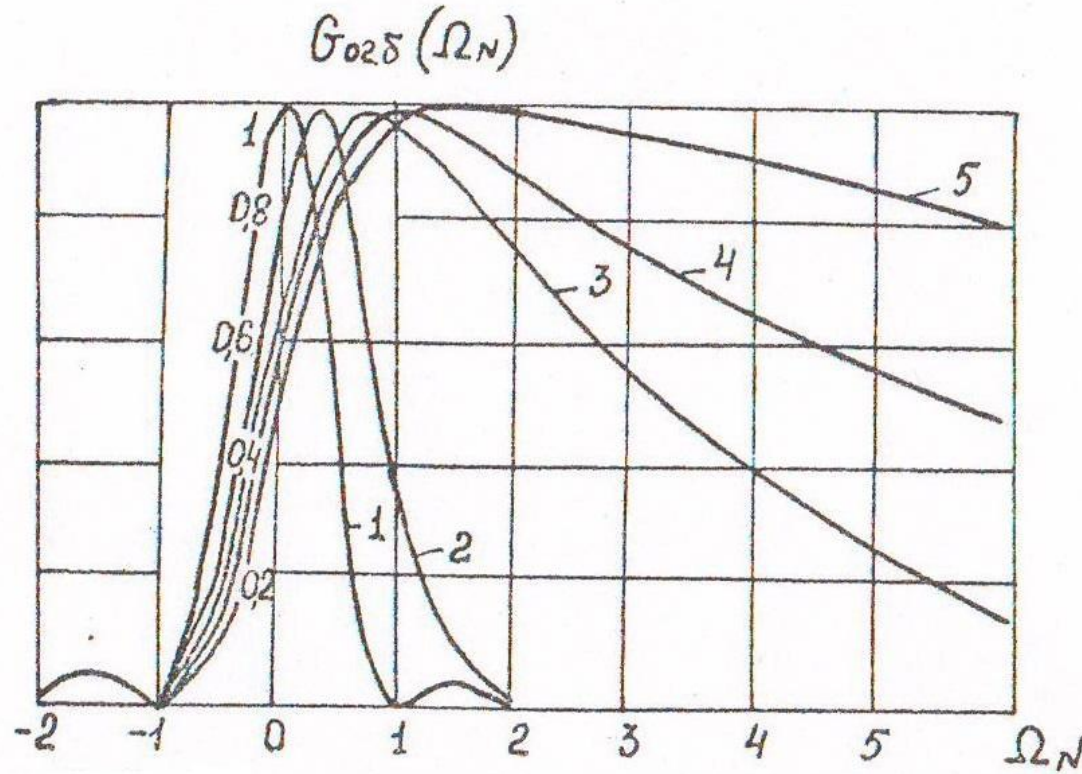
Для НЛЧМ: $F_{\delta 1} = 4\Delta f F_M H / c$

Закон частотной модуляции	Информативный параметр преобразованного сигнала	Масштабный коэффициент
Гармонический	$\overline{F_p} = 8c^{-1} F_M \Delta f H$	$M = 0,125cT_M \Delta f^{-1}$
Линейный симметричный	$\overline{F_p} = 8c^{-1} F_M \Delta f H$	$M = 0,125cT_M \Delta f^{-1}$
Линейный несимметричный	$F_{\delta 1} = 4c^{-1} F_M \Delta f H$	$M = 0,25cT_M \Delta f^{-1}$

2.3. Деформация спектра сигнала биений в РВ с ЧМ при некогерентном рассеянии от шероховатой поверхности



2.3. Деформация спектра сигнала биений в РВ с ЧМ при некогерентном рассеянии от шероховатой поверхности



- 1 - $(\sin \pi \Omega_N / \pi \Omega_N)^2$;
- 2 - $\mu_H = 0,34$;
- 3 - $\mu_H = 2,25$;
- 4 - $\mu_H = 5,65$;
- 5 - $\mu_H = 22,6$.

$\mu_H = X_H \Delta\theta_9^2 / 2$ - параметр, характеризующий значение нормированной разности расстояний между высотой и наклонной дальностью

$\Delta\theta_9$ - эквивалентная ширина ДНА, учитывающая влияние ДОР

3. Анализ ошибок измерения высоты в радиовысотомерах с ЧМ

3.1. Характеристика основных источников ошибок

Смещение оценки – 1) формирование сигнала от большого участка поверхности; 2) отклонение ЛА по крену и тангажу.
Распределение имеет произвольную форму.

Флуктуационные ошибки – определяются параметрами зондирующего сигнала, соотношением сигнал/шум, параметрами аппаратуры. Нестационарный закон распределения с переменными дисперсией и средним значением.

Динамические ошибки - инерционность измерителя по отношению к изменениям измеряемого параметра и в смещении частоты биений на частоту Доплера .

3.2. Систематические ошибки, вызванные смещением средней оценки

$$F_{\bar{\sigma}_0} = (8\Delta f F_M / c) H = H/M,$$

$$F_{\bar{\sigma}_{\text{накл}}} = R_{\text{накл}} / M = H / (M \cos \Delta\theta_0 / 2),$$

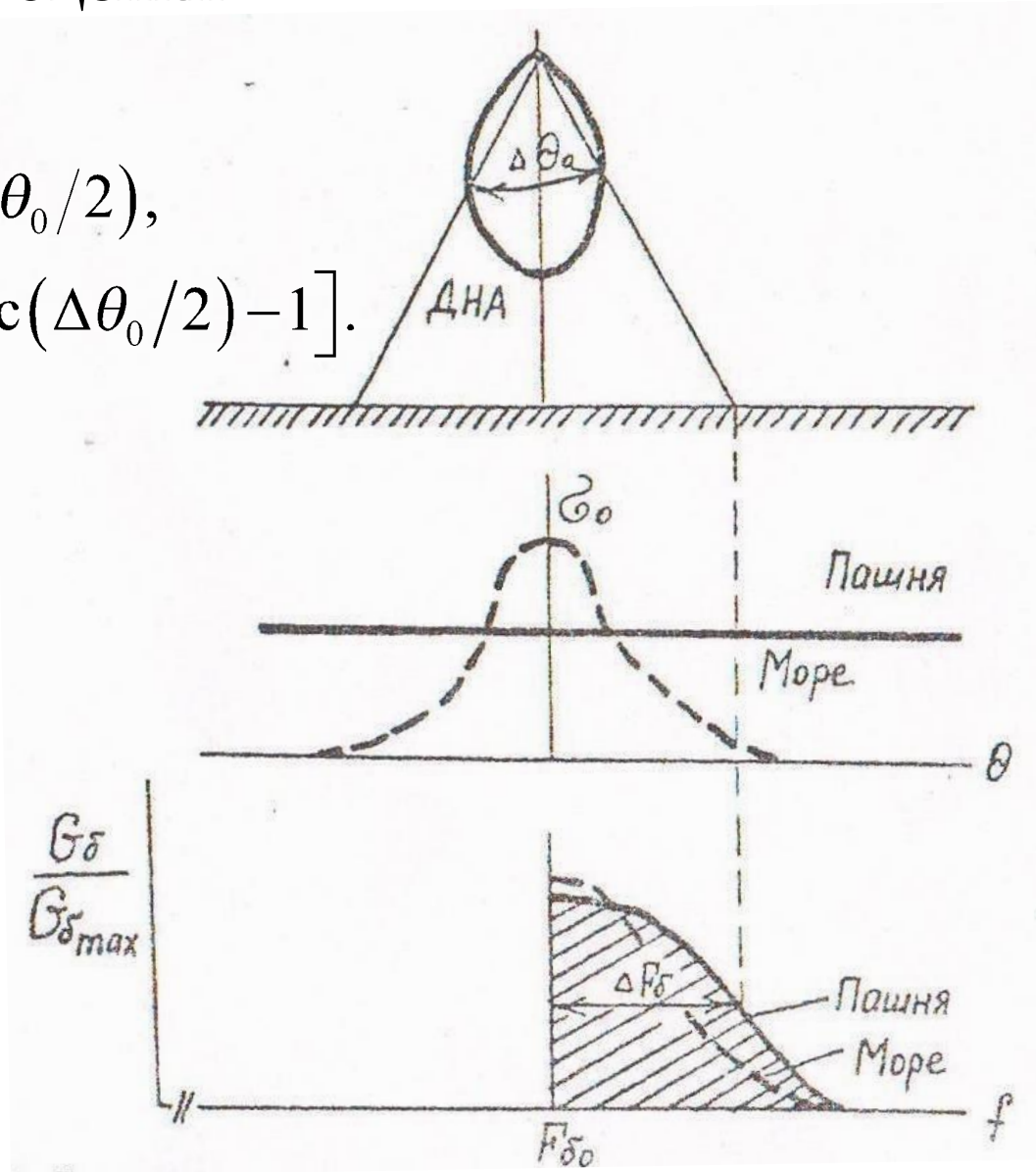
$$\Delta F_{\bar{\sigma}} = F_{\bar{\sigma}_{\text{накл}}} - F_{\bar{\sigma}_0} = (H/M) [\sec(\Delta\theta_0 / 2) - 1].$$

$$\xi = \Delta F_{\bar{\sigma}} / F_{\bar{\sigma}_0} = \sec(\Delta\theta_0 / 2) - 1$$

$$G_{\bar{\sigma}}(F) = 1 - (F - F_{\bar{\sigma}_0}) / \Delta F_{\bar{\sigma}}$$

$$F_{\bar{\sigma}_{\text{ср}}} = F_{\bar{\sigma}_0} + \Delta F_{\bar{\sigma}} / 3$$

$$\delta_{\text{ср}} = \Delta F_{\bar{\sigma}} / 3F_{\bar{\sigma}_0} = \xi / 3$$



3.2. Систематические ошибки, вызванные смещением средней оценки

$$F_{cp\Sigma} = \frac{P_{cp} F_c + P_{usc} F_{usc}}{P_{uc} + P} = \frac{q}{q+1} \left(F_{cp} + \frac{1}{q} F_{usc} \right)$$

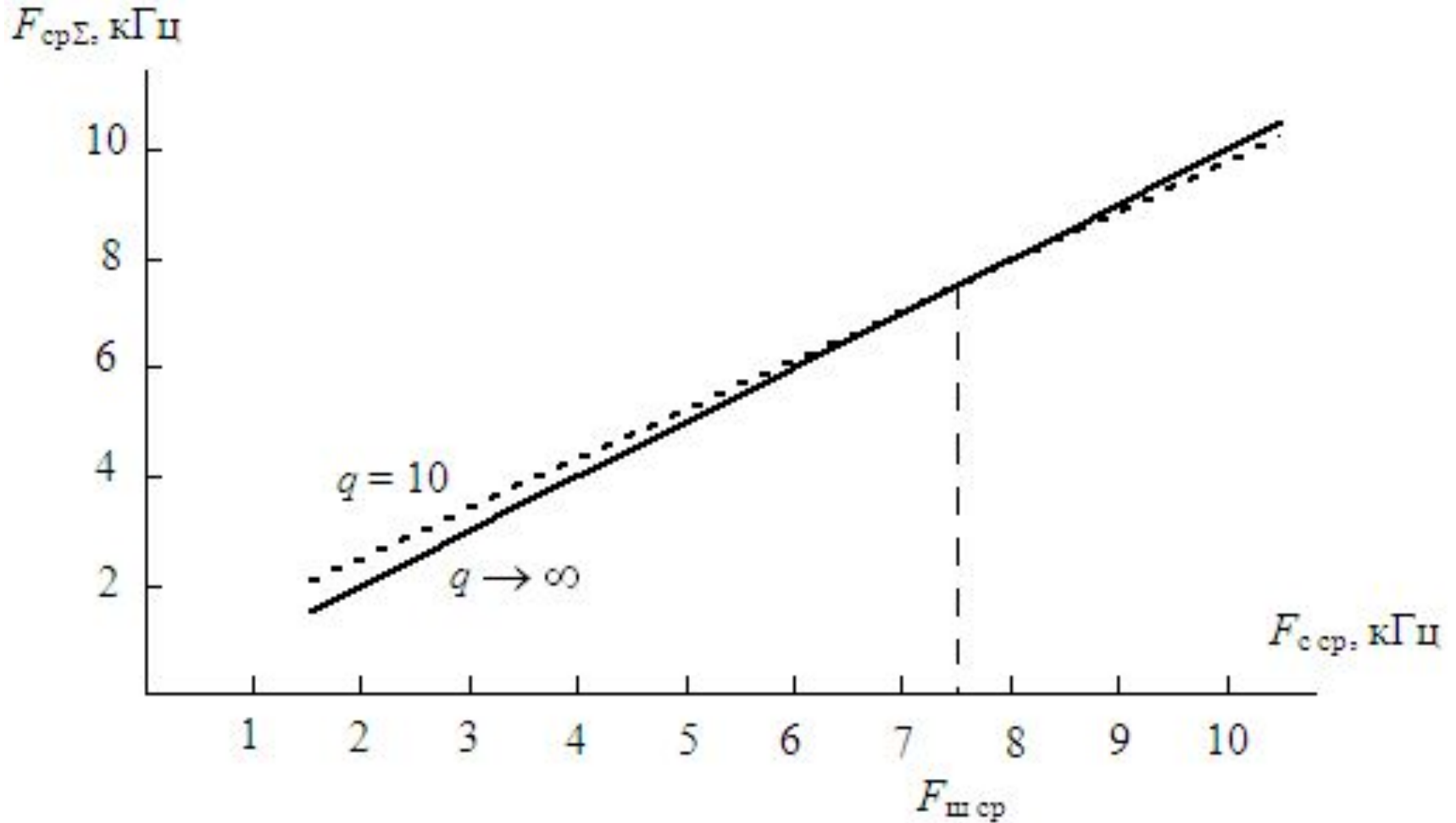
$$F_{usc} = \frac{\int_0^{\infty} F \cdot G_{uc}(F) dF}{\int_0^{\infty} G_{uc}(F) dF} = \frac{\int_{F_{min}}^{F_{max}} F \cdot F^2 dF}{\int_{F_{min}}^{F_{max}} F^2 dF} = \frac{(1/4)(F_{max}^4 - F_{min}^4)}{(1/3)(F_{max}^3 - F_{min}^3)}$$

$$F_{min} = 0,2 \text{ кГц}; \quad F_{max} = 10 \text{ кГц};$$

$$F_{usc} \approx (3/4) F_{max} = 7,5 \text{ кГц};$$

$$F_{cp} = F_{\sigma 0} + \Delta F_{\sigma} / 3$$

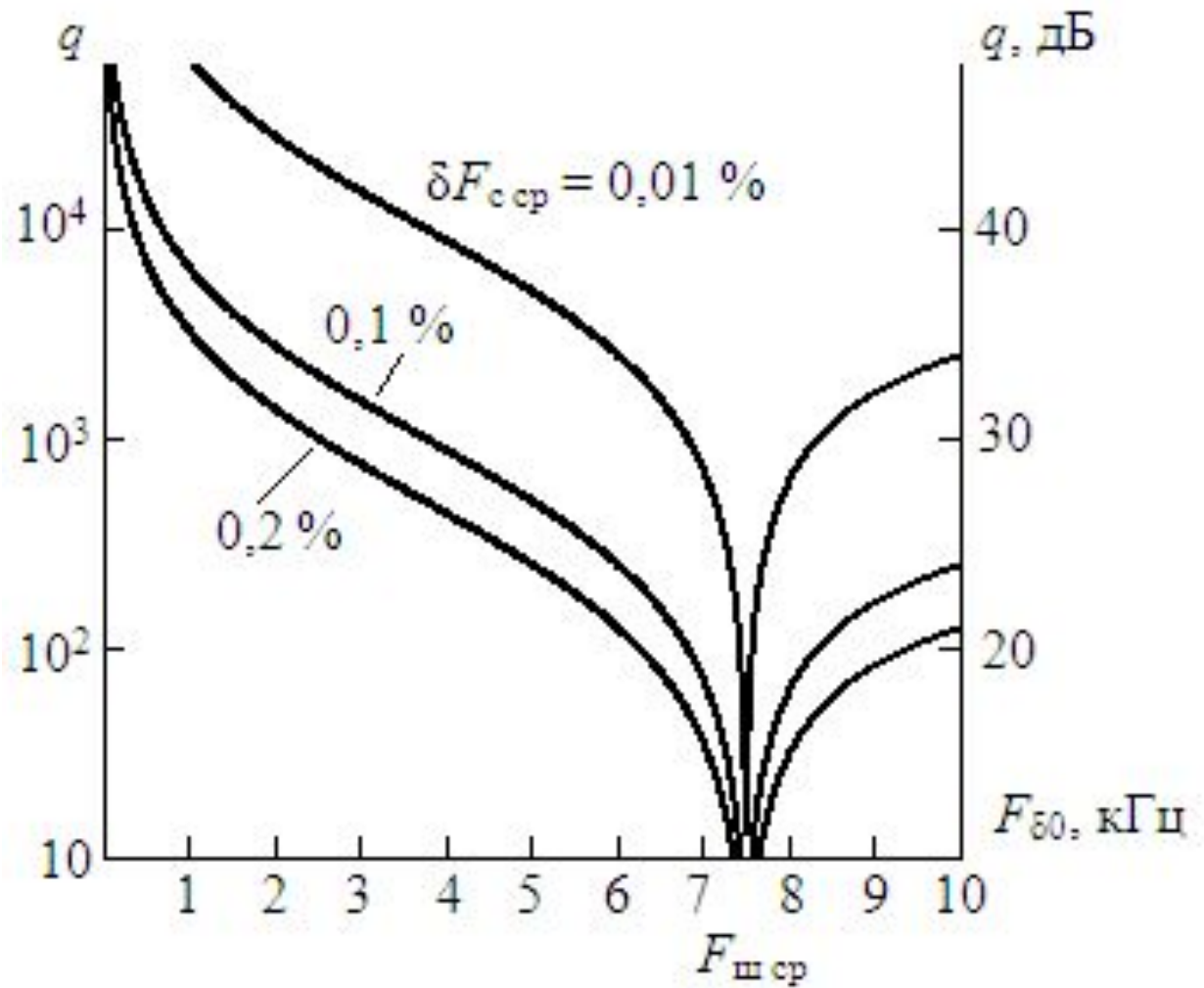
3.2. Систематические ошибки, вызванные смещением средней оценки



$$\Delta F_{ср} = |F_{ср\Sigma} - F_{ср}| = \left| \frac{q}{q+1} F_{ср} - F_{ср} + \frac{1}{q+1} F_{шср} \right| = \frac{1}{q+1} |F_{шср} - F_{ср}|$$

3.2. Систематические ошибки, вызванные смещением средней оценки

$$\delta F_{cp} = \Delta F_{cp} / F_{ссп} \approx 1/q \left| F_{шср} / F_{ссп} - 1 \right| \quad q \approx \left(1/\delta F_{cp} \right) \left| F_{шср} / F_{б0} - 1 \right|$$



3.3. Флуктуационные ошибки

Собственные флуктуации отраженного сигнала: $\sigma_{F_c} = k_F \sqrt{\Delta F / T}$

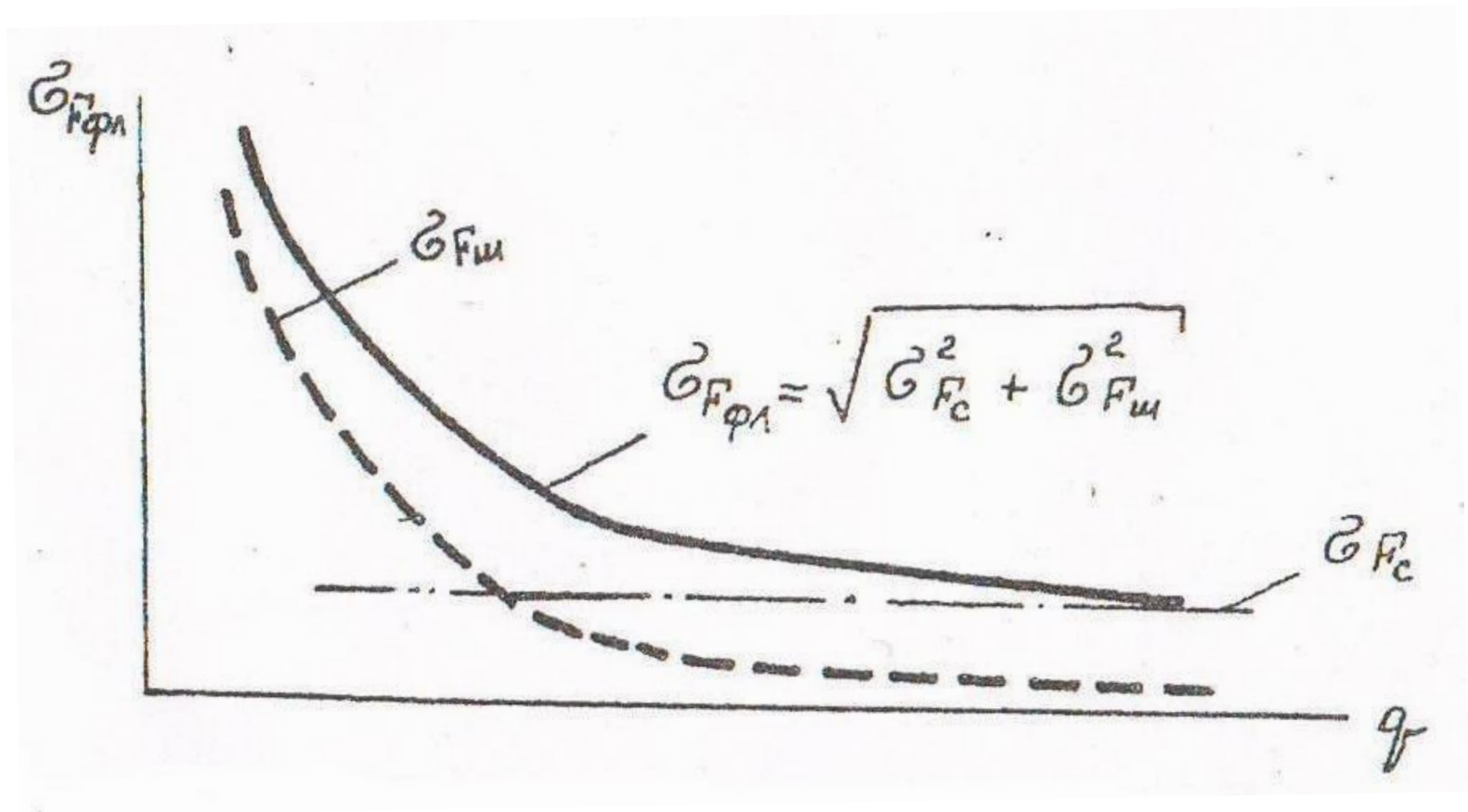
$$\frac{\sigma_H}{H} = \frac{\sigma_{F_c}}{F_0} = \frac{k_F}{F_0} \sqrt{\frac{H \left[\sec\left(\frac{\Delta\theta_0}{2}\right) - 1 \right]}{MT}} = k_F \sqrt{\frac{c \left[\sec\left(\frac{\Delta\theta_0}{2}\right) - 1 \right]}{M \delta \Delta f F HT}}$$

Погрешность, обусловленная шумами: $\sigma_{H_{PM}} = k_F \sqrt{\Delta F / T} / q$

Суммарная погрешность:

$$\frac{\sigma_{H_{\phi l}}}{H} = \frac{\sigma_{F_{\phi l}}}{F_{00}} = \frac{\sqrt{\sigma_{F_c}^2 + \sigma_{F_{ш}}^2}}{F_{00}}$$

3.3. Флуктуационные ошибки



3.4. Динамическая ошибка

Ошибка, обусловленная эффектом Доплера:

$$\delta_{H_{дин}} = \frac{\Delta H_{дин}}{H} = \frac{F_d}{F_{\sigma 0}} = \frac{2V_v}{\lambda F_{\sigma 0}} = \frac{2V_v M}{\lambda H}$$

Пример: режим автоматической посадки самолета, снижающего до высоты порядка 30 м со скоростью 3 м/с при $M = 1/200$ и $\lambda = 7$ см

$$\delta_{H_{дин}} = \frac{\Delta H_{дин}}{H} = 0,014$$