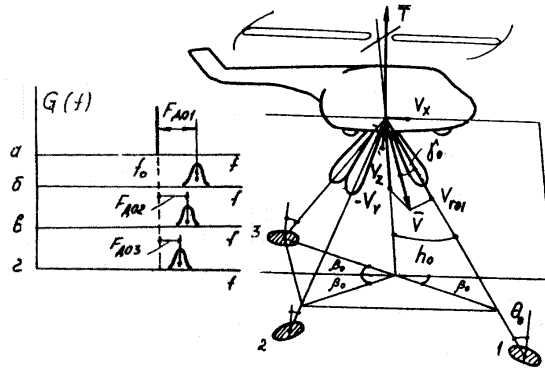


# Доплеровские измерители скорости



Основные соотношения в доплеровском датчике скорости;  
 а - спектр зондирующего сигнала; б, в, г - спектры сигналов на выходах приемных антенн по лучам 1, 2, 3

$$F_{A0} = f_0 \cdot \frac{2}{c} v_{r0} = \frac{2}{\lambda_0} |V| \cos \gamma_0 = k v_{r0},$$

Ширина доплеровского спектра определяется соотношением

$$\Delta f_g = \frac{2|V|}{\lambda_0} \Delta \gamma \sin \gamma_0,$$

где  $\Delta \gamma$  - ширина ДН антенны в плоскости угла  $\gamma_0$ .

$$F_{A01} = \frac{2}{\lambda_0} v_{r01} = \frac{2}{\lambda_0} (V_x \cos \beta_0 \sin h_0 - V_y \cos h_0 + V_z \sin \beta_0 \sin h_0);$$

$$F_{A02} = \frac{2}{\lambda_0} v_{r02} = \frac{2}{\lambda_0} (-V_x \cos \beta_0 \sin h_0 - V_y \cos h_0 + V_z \sin \beta_0 \sin h_0); \quad (3.2)$$

$$F_{A03} = \frac{2}{\lambda_0} v_{r03} = \frac{2}{\lambda_0} (-V_x \cos \beta_0 \sin h_0 - V_y \cos h_0 - V_z \sin \beta_0 \sin h_0),$$

где  $v_{r01}$ ,  $v_{r02}$ ,  $v_{r03}$  - радиальные скорости центров облучаемых площадок;  $\beta_0$ ,  $h_0$  - углы ориентирования лучей 1, 2, 3 соответственно в горизонтальной и вертикальной плоскости ЛЛ

$$V_x = (F_{A01} - F_{A02}) \frac{\lambda_0}{4} \frac{1}{\cos \beta_0 \sin h_0} = (F_{A01} - F_{A02}) k_1;$$

$$V_y = (F_{A01} + F_{A03}) \frac{\lambda_0}{4} \frac{1}{\cos h_0} = -(F_{A01} + F_{A03}) k_2;$$

$$V_z = (F_{A02} - F_{A03}) \frac{\lambda_0}{4} \frac{1}{\sin \beta_0 \sin h_0} = (F_{A02} - F_{A03}) k_3.$$

$$\sigma_f^2 = \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{1 + Q\tau_k}{Q \cdot T_H} \cdot \frac{1}{\tau_k^2} \left\{ 1 + \frac{1}{\sqrt{1 + Q\tau_k}} \right\}^4 \left\{ 1 + \frac{1}{2\sqrt{1 + Q\tau_k}} \right\};$$

при  $Q\tau_k \gg 1$   $\sigma_{f \min}^2 \approx \frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{\Delta f_g}{T_H}$

Учитывая соотношения

$$\Delta f_A = \Delta \gamma \frac{2V}{\lambda_0} \sin \gamma_0; \quad F_{A0} \approx \frac{2V}{\lambda_0} \cos \gamma_0,$$

можно получить выражение минимально достижимого значения относительной величины флуктуирующей составляющей измерения частоты и скорости:

$$\frac{\sigma_f}{F_{A0}} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{F_{A0} T_H}} \sqrt{\frac{\Delta f_g}{F_{A0}}};$$

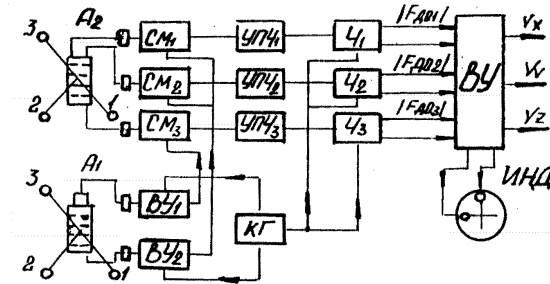
$$\frac{\sigma_v}{V} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{2}} \frac{t g \gamma_0}{\sqrt{T_H V}} \cdot \frac{\lambda_0}{\sqrt{D_T}},$$

где  $V$  - модуль вектора скорости;  $D_T$  - размер апертуры антенны в плоскости угла  $\gamma_0$

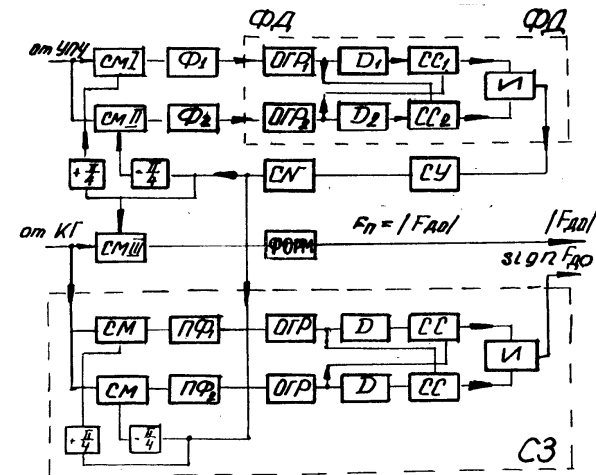
Относительная величина медленно меняющейся компоненты погрешности ("ошибки смещения") определяется соотношением

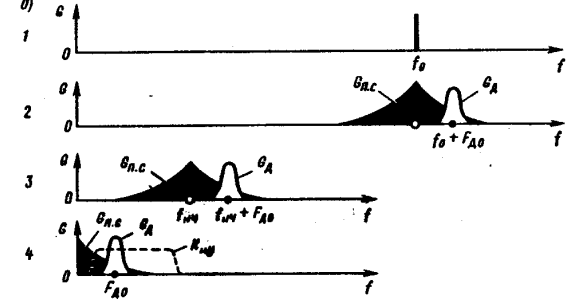
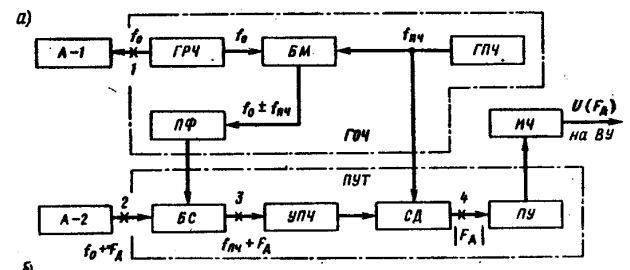
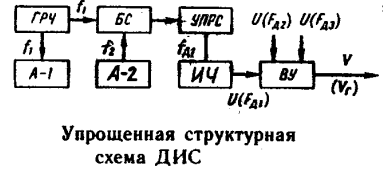
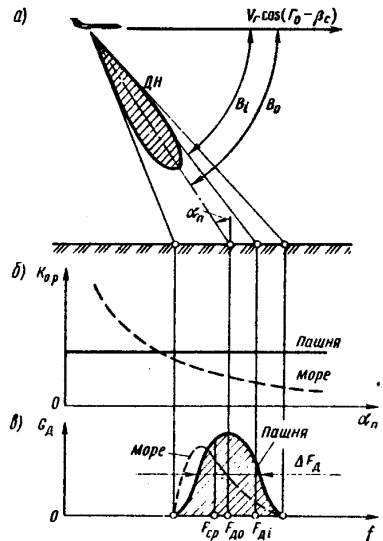
$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta F}{F_{A0}} = \frac{\Delta \theta^2}{2\pi} \cdot \frac{f'(\theta_0)}{f(\theta_0)} \cdot t g \rho = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{f'(\theta_0)}{f(\theta_0)} t g \rho \cdot \frac{\lambda_0^2}{D_g^2},$$

где  $\Delta F$  - смещение центра тяжести доплеровского спектра, вызванное его асимметрией;  $f(\theta_0)$  и  $f'(\theta_0)$  - значения соответственно ДОР и ее производной в направлении угла падения  $\theta_0$  центрального луча антенны;  $\Delta \theta$  - ширина ДН антенны в плоскости угла  $\theta_0$ ;  $D_g$  - размер апертуры антенны в плоскости угла  $\theta_0$ ;  $t g \rho$  - множитель, зависящий от взаимного ориентирования вектора скорости и направления максимума ДН.



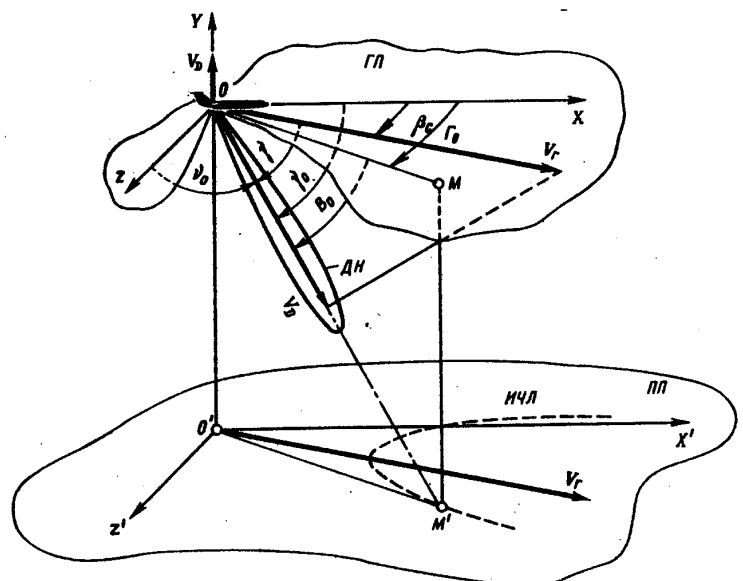
Функциональная схема доплеровского датчика скорости



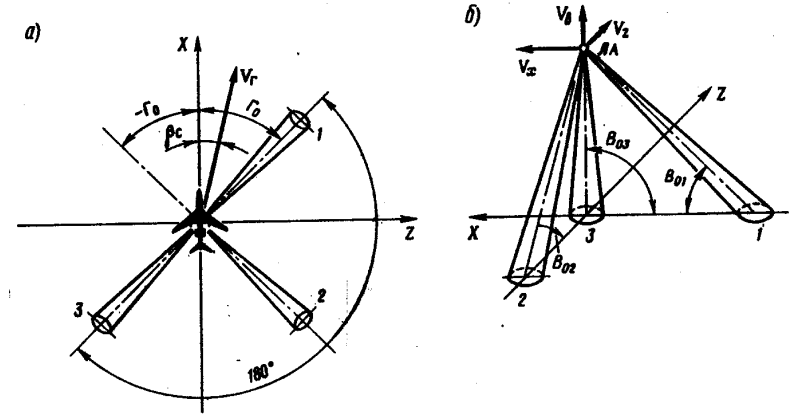


Формирование спектра ПРС в ДИСС при подстилающей поверхности типа «пашня» и «море»:  
 а — диаграмма направленности антенны;  
 б — зависимость коэффициента обратного рассеяния от угла падения радиоволны;  
 в — спектр ПРС

Структурная схема ДИСС НМ (а) и спектры сигналов в характерных точках (б)



Пространственная ориентация одного из лучей антенны ДИСС



Варианты расположения лучей ДИСС:  
 а — самолетный ДИСС (проекция лучей на горизонтальную плоскость); б — вертолетный ДИСС

## Квадратурно-фазовый измеритель частоты

Входной сигнал:  $u_{\text{вх}} = U_{\text{мвх}} \cos(\omega_{\text{пч}} + \Omega_{\text{д}})t$

Опорные сигналы квадратурных смесителей:

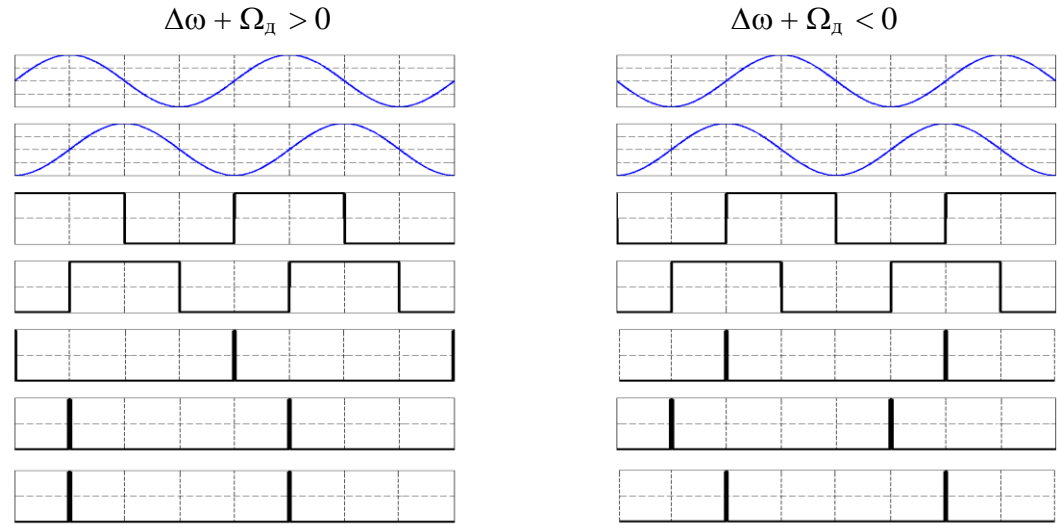
$$\begin{cases} u_{O1} = U_{mO} \cos(\omega_{\text{ур}}t + \pi/2) \\ u_{O2} = U_{mO} \cos(\omega_{\text{ур}}t) \end{cases}$$

Обозначим  $\Delta\omega = \omega_{\text{пч}} - \omega_{\text{ур}}$ .

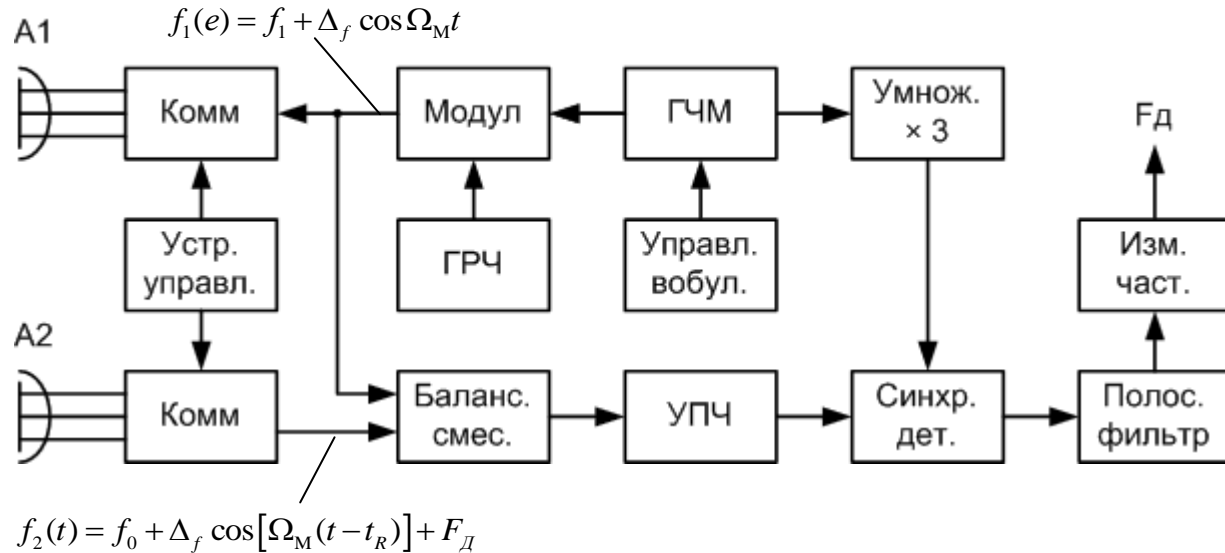
Сигнал на выходе первого смесителя:

$$u_1 = \begin{cases} U_m \cos[(\Delta\omega + \Omega_{\text{д}})t - \pi/2], & \text{при } \Delta\omega + \Omega_{\text{д}} > 0 \\ U_m \cos[(\Delta\omega + \Omega_{\text{д}})t + \pi/2], & \text{при } \Delta\omega + \Omega_{\text{д}} < 0 \end{cases}$$

Сигнал на выходе второго смесителя:

$$u_2 = U_m \cos(\Delta\omega + \Omega_{\text{д}})t$$


## ДИС с ЧМ сигналом



Частота зондирующего сигнала  $f_1(t) = f_0 + \Delta f \cos \Omega_M t$ ,  
 $\Delta f$  — девиация частоты;  $\Omega_M$  — частота модуляции.

Частота принимаемого сигнала  $f_2(t) = f_0 + \Delta f \cos \Omega_M (t - t_R) + F_d$ ,  
 где  $t_R$  — задержка отраженного сигнала.

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin[(\alpha + \beta)/2] \sin[(\alpha - \beta)/2]$$

Частота полученного преобразованного сигнала

$$\Delta F = f_2 - f_1 = F_d - 2\Delta f \sin \Omega_M (t_R/2) \sin \Omega_M (t - t_R/2).$$

Преобразованный сигнал

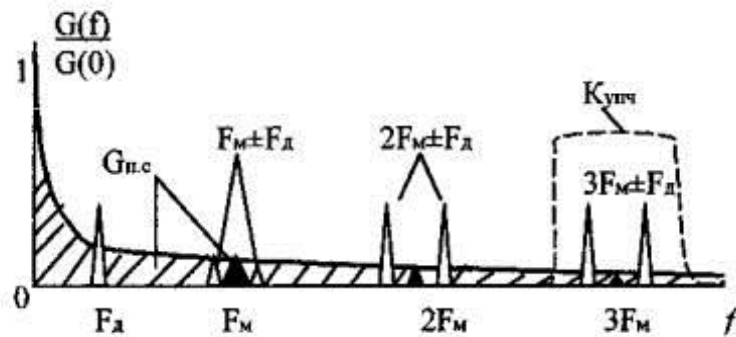
$$u_{\text{пр}}(t) = U_{\text{м пр}} \cos[\Omega_d t - 2m_{\text{чм1}} \sin \Omega_M (t_R/2) \sin \Omega_M (t - t_R/2)] = \\ = U_{\text{м пр}} \cos[\Omega_d t + m_{\text{чм}} \sin \Omega_M (t - t_R/2)],$$

где  $m_{\text{чм1}} = \Delta f / F_M$  — индекс ЧМ излучаемого сигнала,  
 $m_{\text{чм}} = 2m_{\text{чм1}} \sin 0,5 \Omega_M t_R$  — индекс ЧМ преобразованного сигнала.

Спектр преобразованного сигнала при  $U_{\text{м пр}} = 1$  имеет вид

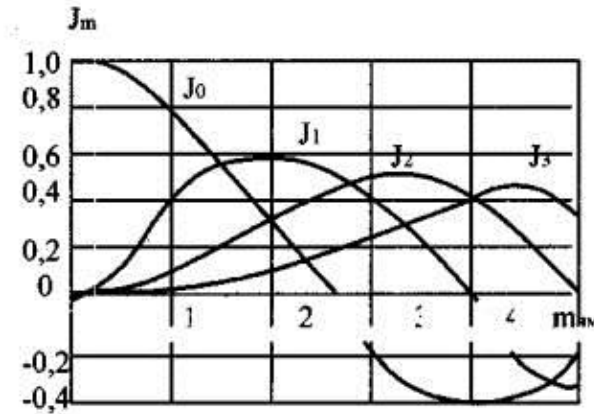
$$u_{\text{пр}}(t) = J_0(m_{\text{чм}}) \cos \Omega_d t + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(m_{\text{чм}}) \{ \cos[(n\Omega_M + \Omega_d)t - \\ - 0,5n\Omega_M t_R] + (-1)^n \cos[(n\Omega_M - \Omega_d)t - 0,5n\Omega_M t_R] \},$$

где  $J_n(m_{\text{чм}})$  функция Бесселя, первого рода n-го порядка



Спектр преобразованного сигнала в ДИС ЧМ

Зависимость амплитуд гармоник частоты модуляции от индекса модуляции преобразованного сигнала



Оптимальное значение  $n = 3$ , максимальная амплитуда  $n$ -ой гармоники достигается при индексе ЧМ излучаемого сигнала

$$(m_{\text{чм1}})_{\text{опт}} = 0,5(n+2).$$

Условие однозначности измерения  $F_d$ , т.е.  $F_M > 2|F_{\text{дmax}}|$ , где  $F_{\text{дmax}}$  — доплеровская частота, соответствующая максимальной скорости

### Слепые высоты в ДИС ЧМ

Мощность преобразованного сигнала

$$P_c(t_R) = J_n^2 \cos[2m_{\text{чм}} \sin(0,5 \Omega_M t_R)] \sin^2(0,5n \Omega_M t_R),$$

Эта функция равна нулю при  $t_R = kT_M n^{-1}$ , где  $T_M$  — период ЧМ, а  $k = 1, 2, \dots$

Следовательно, на высотах

$$H_{\text{п}} = H_{\text{сл}} = 0,5ct_R \sin B_0 = 0,5kn^{-1}cT_M \sin B_0$$

сигнал, принимаемый под углом  $B_0$ , будет отсутствовать.

Если  $F_M = 1 \text{ МГц}$ ,  $n = 3$  и  $B_0 = 65^\circ$ , слепые высоты повторяются через каждые  $\Delta H = 45,3 \text{ м}$ .