

Прецизионная радиовысотометрия из космоса



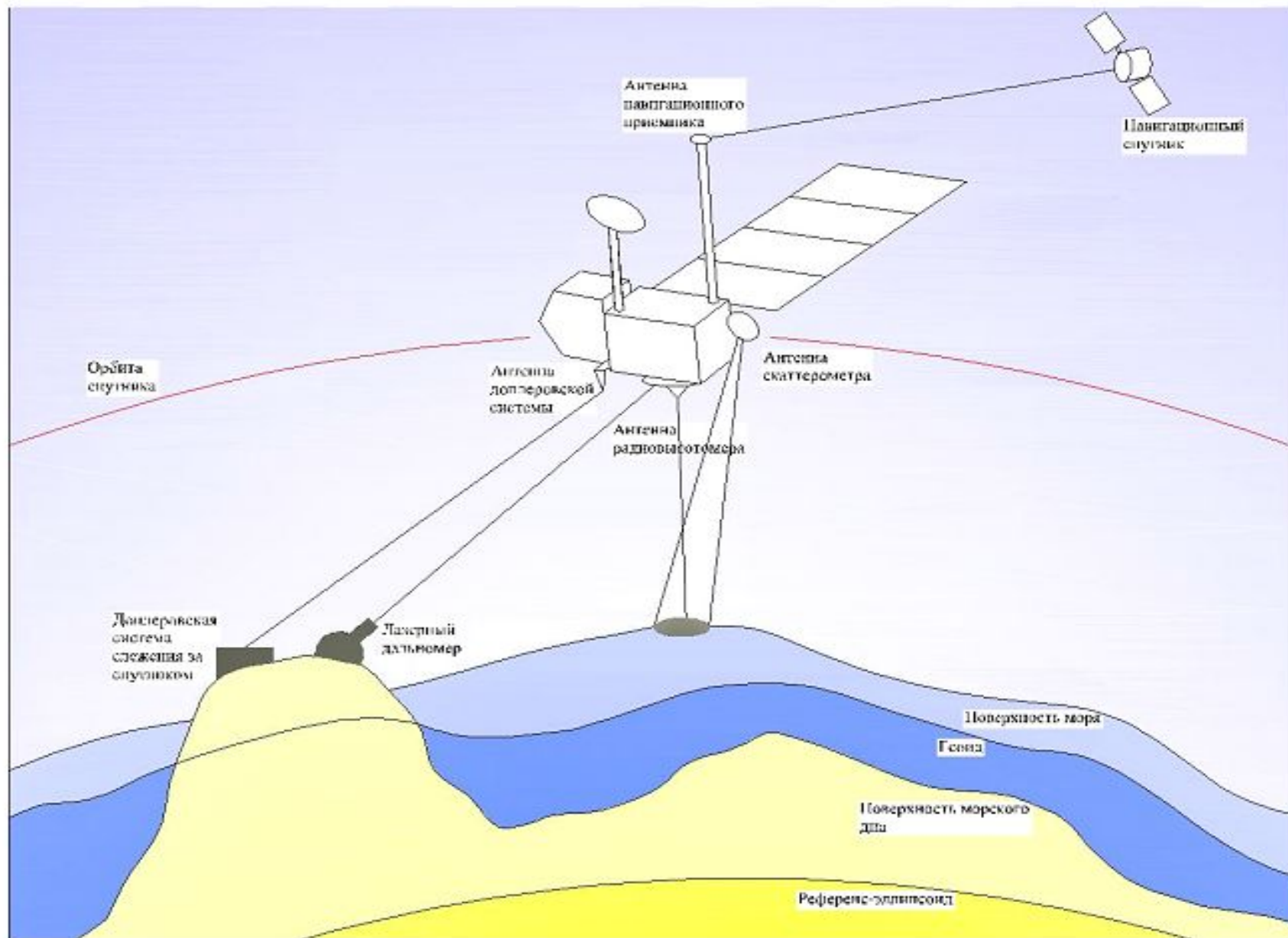
**Задачи, решаемые прецизионным
радиовысотомером и геометрия зондирования**

Одним из наиболее информативных бортовых средств дистанционного зондирования является **высокоточный (прецизионный) радиовысотомер** - альтиметр (ПРВ). ПРВ обеспечивает оперативные прецизионные измерения при работе по большим акваториям Мирового океана, поставляя информацию для решения широкого круга научных и прикладных задач: уточнение морского геоида, картирование гравитационных аномалий и аномалий рельефа дна на шельфах, контроля уровня поверхности (приливов, отливов, штормовых нагонов, вихрей, цунами), контроля морских течений, определения высоты морских волн и скорости поверхностного ветра, а также многих других процессов в Мировом океане, связанных с изменением уровня морской поверхности. Проблема оперативного решения указанных задач, безусловно, **актуальна** для исследования природных ресурсов Земли, экологического мониторинга, метеорологии, океанографии, судовождения и т. д. Одна из основных задач применения ПРВ – это уточнение формы геоида Земли. Под геоидом понимается эквипотенциальная поверхность в гравитационном поле Земли, совпадающая при определенных условиях с невозмущенным средним уровнем моря. По форме геоида можно судить о распределении массы Земли и определить локальные градиенты

Технические характеристики современных спутниковых радиовысотометров

| Параметр | Seasat-A | Geosat-A | Topex | Poseidon | ERS | MOS-2 | Poseidon 2 & 3 (Jason-1,2) |
|----------------------------|----------|----------|-----------|----------|----------|-------|--------------------------------|
| Средняя высота орбиты, км | 800 | 800 | 1300 | 1300 | 800 | 570 | 1336 |
| Несущая частота, ГГц | 13,5 | 13,5 | 13,5//5,3 | 13,65 | 13,5 | 19,8 | 13,6(Ku)/5,3(C) |
| Импульсная мощность, кВт | 2 | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,05 | 1,2 | 0,02/0,03 |
| Длительность импульса, мкс | 3,2 | 102,4 | 102,4 | 102,4 | 20 | 3,2 | 105,6 |
| Полоса модуляции, МГц | 320 | 320 | 320 | 320 | 330/82,5 | 320 | 320/100-320 |
| Частота повторения, КГц | 1,02 | 1,02 | 4/1 | 1,7 | 1,0 | 1,0 | 1,68-1,8/0,3-0,45 |
| Ширина ДНА, град. | 1,6 | 2,1 | 1,1/3,4 | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,3/3,4 |
| Точность (высота), м | 0,1 | 0,04 | 0,035 | 0,1 | 0,1/0,4 | 0,1 | 0,025...0,035 |
| Точность (волны), м | 1,5±10% | 1,0±10% | 0,4±10% | 0,5±10% | 0,5±10% | - | 0,3±10% |
| Потребляемая мощность, Вт | 165 | 130 | 70 | 70 | - | - | 70 |
| Масса, кг | 94 | 86.6 | - | 40 | - | - | 68 with antenna |

Геометрия радиовысотометрии из космоса



Ошибки измерения высоты

| Основные источники ошибок, см | Seasat | Topex/Poseidon |
|---|-----------|----------------|
| <u>Альтиметрия</u> | | |
| Флуктуационная ошибка | 10 | 3...4 |
| <u>Канал распространения</u> | | |
| Ионосферные ошибки | 5 | 1 |
| Ошибки из-за влияния атмосферы (сухая атмосфера) | 3 | 0,7 |
| (влажная атмосфера) | 3 | 1,3 |
| <u>Орбитальные погрешности</u> | | |
| Динамические | 36 | 10 |
| Слежения за орбитой | 15 | 5 |
| Временные отсчеты | 15 | 5 |
| <u>Суммарная ошибка</u> | 45 | 12 |

Требования к точности ПРВ

Для повышения эффективности океанографических исследований необходима высокая точность измерения высоты, при которой среднеквадратическая ошибка соответствует сантиметровым значениям. Высокие требования к точности ПРВ обусловлены тем, что перепады уровня морской поверхности, которые необходимо регистрировать, имеют порядок от единиц метров до нескольких сантиметров. Для этого используется широкополосный СВЧ-радиосигнал, обладающий наносекундной разрешающей способностью. Точность измерения высоты порядка 0,5 м на подспутниковых расстояниях в 100 км (уклоны $<10^{-5}$) дает возможность обнаружения приливов в зонах континентальных шельфов, штормовых нагонов и деформаций уровня, связанных с западными пограничными течениями. Повышение точности радиовысотомерных измерений до 5 см на 100 км подспутниковой трассы (уклон 10^{-6}) позволяет определять отклонения уровенной поверхности моря от геоида, исследовать вихревую структуру общей океанической циркуляции и своевременно обнаруживать разрушительные волны цунами.

Перечислим основные проблемы, которые решаются при создании океанографического ПРВ

1. Уточненная модель отражения СВЧ радиосигналов с наносекундной разрешающей способностью, учитывающая законы распределения ординат и наклонов неровностей МП.
2. Анализ статистических характеристик отраженных радиосигналов ПРВ при широком варьировании исходных данных, связанных с выбором параметров ПРВ, режимом облучения и состоянием МП.
3. Синтез и анализ алгоритмов и устройств оптимальной обработки во временной или частотной области отраженных от МП радиосигналов.
4. Оценки потенциальной точности измерения высоты в зависимости от выбранных параметров ПРВ, режима облучения и состояния МП.
5. Разработка алгоритмов и устройств квазиоптимальной (практически реализуемой) обработки отраженных сигналов ПРВ, позволяющих осуществить одновременную оценку высоты КА над средним уровнем МП и высоты морских волн.

Основные параметры перспективного высокоточного спутникового радиовысотомера:

| | | |
|--|----------|-------------|
| Несущая частота, ГГц ($\lambda=2,2$ см) | | 13,64 |
| Импульсная мощность, Вт | 40 | |
| Длительность импульса (с ЛЧМ), μ с | | 100 |
| Девияция частоты (полоса модуляции), МГц | | 250 (500) |
| Частота повторения (переменная), Гц | | 1000 - 5000 |
| Шум-фактор, дБ | 2 - 3 | |
| Ширина ДНА, град. | | 1 |
| Флуктуационная ошибка (по высоте), см | | 1,5 ... 2 |
| Суммарная ошибка (по высоте), см при высоте орбиты 1000...1200 км | | 3-5 |
| Поляризация | круговая | |
| Время когерентности, мс | | не менее 50 |
| Масса, кг | 40 | |
| Потребляемая мощность, Вт | | 150 |

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

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.

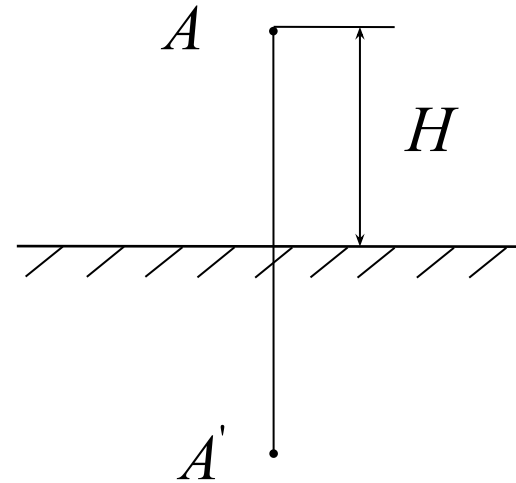
РВ – системы, работающие в сантиметровом диапазоне длин волн.

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

1.2. Отражение волн от гладкой поверхности

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

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



| Вид поверхности | 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 |

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

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

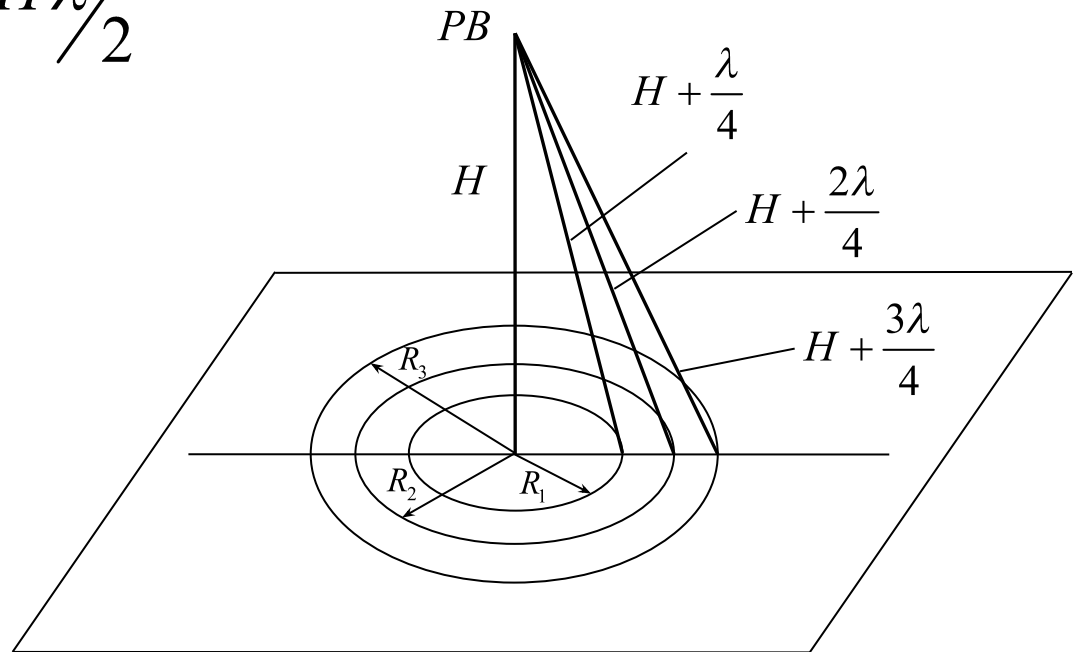
1.2. Отражение волн от гладкой поверхности

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

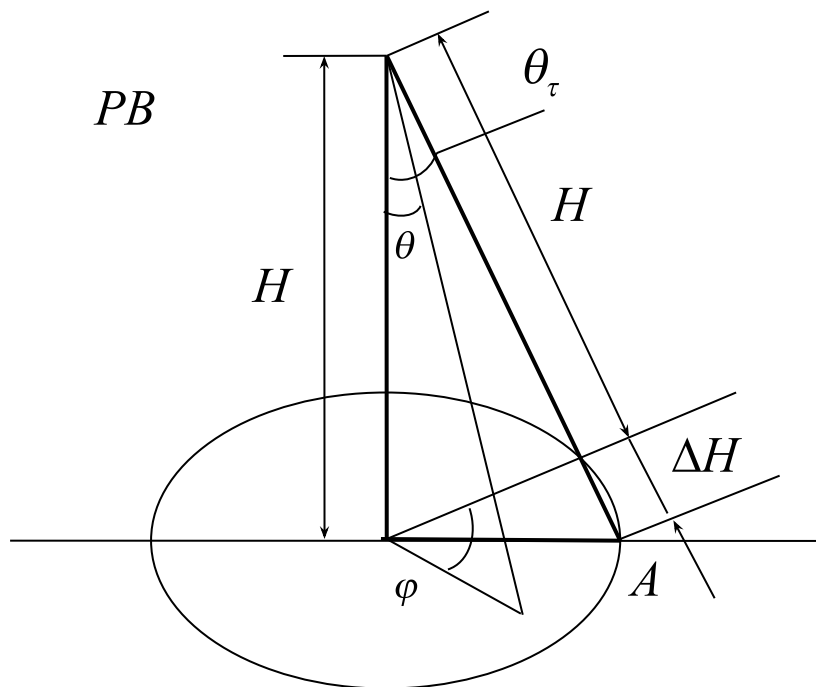
$$R_4 = \sqrt{2H\lambda} \quad R_3 = \sqrt{3H\lambda/2}$$

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

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



1.3. Отражение волн от шероховатой поверхности



$$\Delta H = c\tau_a/2 \quad \tau_a = 1/\Delta f$$

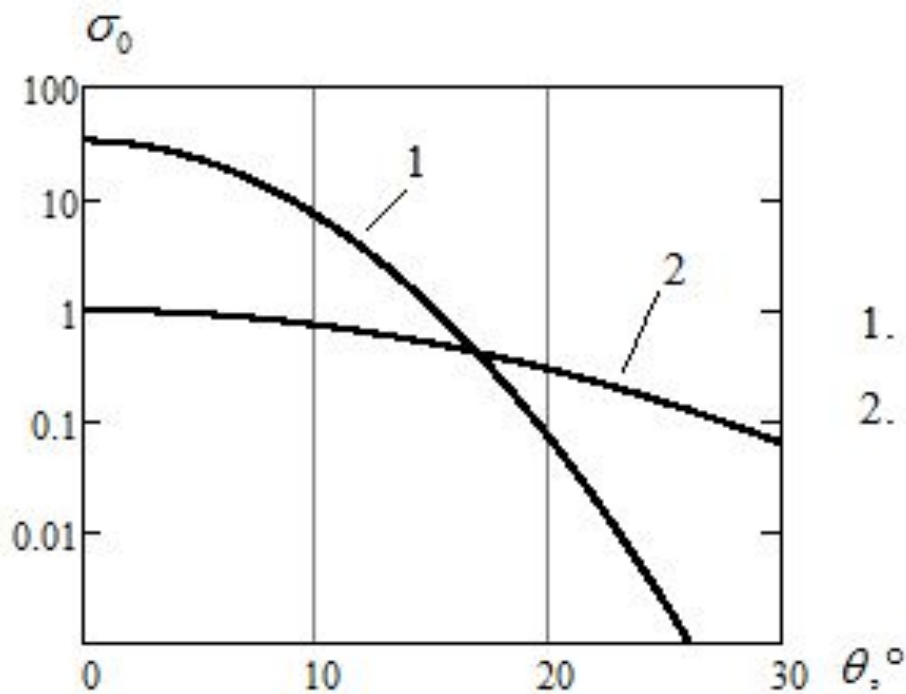
$$R \approx \sqrt{cH\tau_a} \quad S_\tau = \pi R^2 \approx \pi Hc\tau_a$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$P_{\Sigma} = P_{зер} + P_{рас}$$

**МОДЕЛЬ ОТРАЖЕННОГО
СИГНАЛА**

И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО

**СТАТИСТИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК**

Многолетние эксперименты подтверждают, что форму морской поверхности с большой степенью точности можно рассматривать как случайную функцию координат и времени, ординаты которой распределены по закону близкому к нормальному

$$W(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_h}} \exp\left(-\frac{Z^2}{2\sigma_h^2}\right)$$

где σ_h – среднеквадратичная ордината морских волн, для которой известна эмпирическая связь (для полностью развитого, установившегося волнения) со скоростью ветра. В океанологии часто определяют высоту морских волн через высоту волн 3% обеспеченности (три самых высоких волн из последовательно следующих волн), $H_{3\%} \approx 5,2\sigma_h$

Реальные земную и водную поверхности часто невозможно задать в виде реализаций непрерывного случайного процесса. На практике широко используется **феноменологическая модель поверхности** в виде ансамбля отдельных независимых (парциальных) отражателей. Конечное решение легко увязывается с введением в феноменологическую модель статических характеристик, шероховатой поверхности.

Зондирующий сигнал

$$S(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{2 P_{\text{изл}}} \dot{U}(t) \exp(j \omega_0 t) \right\}$$

$$\dot{U}(t) = U_a(t) \exp[j \psi_a(t)]$$

Отраженный парциальный сигнал

$$y_N^c(t) = \operatorname{Re} \left\{ \sqrt{\frac{2 P_{\text{изл}} \lambda^2 G_0^2 \sigma_N}{(4\pi)^3}} \cdot \frac{F(\theta_N, \varphi_n, t) \cdot \dot{U} \left[t - \left(\frac{2R_N}{c} \right) \right]}{R_N^2(\theta_N, \varphi_n, t)} \exp \left[j(\alpha_0 - \alpha_{\text{изл}}) t - j \alpha_0 \left(\frac{2R_N}{c} \right) \right] \right\}$$

Сигнал на входе приемника ПРВ является суперпозицией парциальных сигналов по облучаемой на поверхности моря области

$$y_{\Sigma}^c(t) = \sum_N y_N^c(t)$$

Быстрые флуктуации возникают при пересечении отдельных неровностей МП распространяющимся СВЧ радиоимпульсом и определяются корреляционной функцией

$$R(t_1, t_2) = \overline{y_{\Sigma}^c(t_1) y_{\Sigma}^{c*}(t_2)}$$

Медленные флуктуации $y_{\Sigma}^c(t)$ характеризуются взаимной межпериодной корреляционной функцией

$$R_n(t, t + kT_n) = \overline{y_{\Sigma}^c(t) y_{\Sigma}^{c*}(t + kT_n)}$$

и возникают за счет движения КА с ПРВ относительно поверхности.

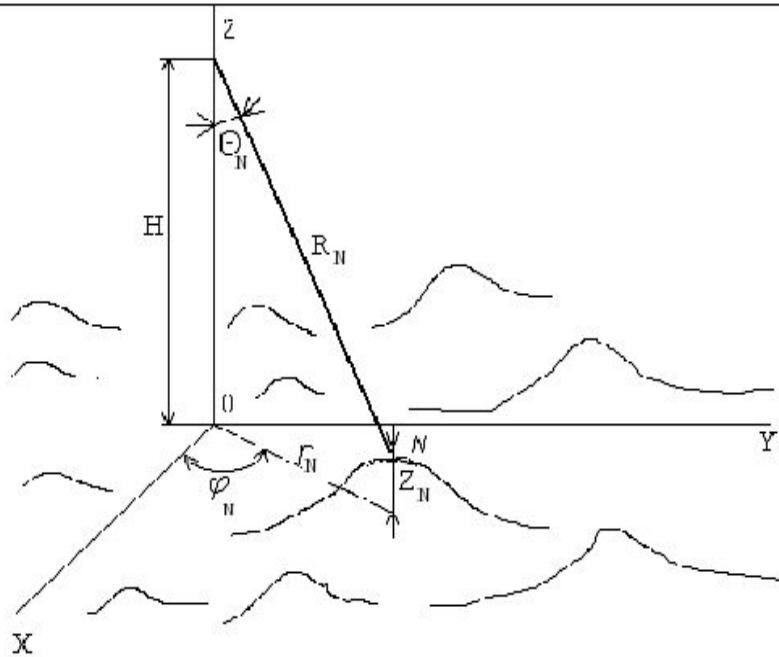
Корреляционная функция полностью определяет статистику отраженного сигнала

$$R(t_1, t_2) = \text{Re} \left\{ \frac{2P_{\text{изл}} \lambda^2 G_0^2}{(4\pi)^3} \left[\sum_N \left(\frac{\sigma_N F^2(\theta_N, \varphi_N)}{R_N^4(\theta_N, \varphi_N)} \right) \dot{U}(t_1 - \tau_N) \dot{U}^*(t_2 - \tau_N) \exp[j\alpha_0(t_1 - t_2)] \right] \right\}$$

Средняя мощность отраженного сигнала определяется по формуле

$$P(t) = R(t, t) = \frac{2P_{\text{изл}} \lambda^2 G_0^2}{(4\pi)^3} \left[\sum_N \left(\frac{\sigma_N F^2(\theta_N, \varphi_N)}{R_N^4(\theta_N, \varphi_N)} \right) \left| \dot{U}(t - \tau_N) \right|^2 \right]$$

$$y_N^c(t) = \text{Re} \left\{ \sqrt{\frac{2P_{\text{изп}} \lambda^2 G_0^2 \sigma_N}{(4\pi)^3}} \cdot \frac{F(\theta_N, \varphi_n, t) \cdot U[t - (\frac{2R_N}{c})]}{R_N^2(\theta_N, \varphi_n, t)} \exp[j(\omega_0 - \omega_{\text{шн}})t - j\omega_0(\frac{2R_N}{c})] \right\}$$



$$R_N = \sqrt{(H - Z_N)^2 + r_N^2} \approx H - Z_N + \frac{r_N^2}{2H},$$

отсюда $\tau_N = \tau_0 + \frac{r_N^2}{cH} + \eta_N$, где $\tau_0 = \frac{2H}{c}$,

$$H \gg r_N, \quad \eta_N = -\frac{2Z_N}{c}, \quad \sigma = \frac{2\sigma_h}{c}.$$

$$y_\Sigma^c(t) = \sum_N y_N^c(t), \quad R(t_1, t_2) = \overline{y_\Sigma^c(t_1) y_\Sigma^{c*}(t_2)}$$

$$R(t_1, t_2) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{2P_{\text{изл}} \lambda^2 G_0^2}{(4\pi)^3} \left[\sum_N \left(\frac{\sigma_N F^2(\theta_N, \varphi_N)}{R_N^4(\theta_N, \varphi_N)} \right) \dot{U}(t_1 - \tau_N) \dot{U}^*(t_2 - \tau_N) \exp[j\omega_0(t_1 - t_2)] \right] \right\}$$

$$P(t) = R(t, t) = \frac{2P_{\text{изл}} \lambda^2 G_0^2}{(4\pi)^3} \left[\sum_N \left(\frac{\sigma_N F^2(\theta_N, \varphi_N)}{R_N^4(\theta_N, \varphi_N)} \right) \left| \dot{U}(t - \tau_N) \right|^2 \right]$$

$$R(t_1, t_2) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{2P_{\text{изл}} \lambda^2 G_0^2 \sigma_0}{(4\pi)^3} \int_S \left[\frac{F^2(\theta, \varphi)}{R^4(\theta, \varphi)} \right] e^{j\omega_0(t_1 - t_2)} \int_{-\infty}^{\infty} W(\eta) \dot{U}(t_1 - \tau_n - \eta) \dot{U}^*(t_2 - \tau_n - \eta) d\eta ds \right\},$$

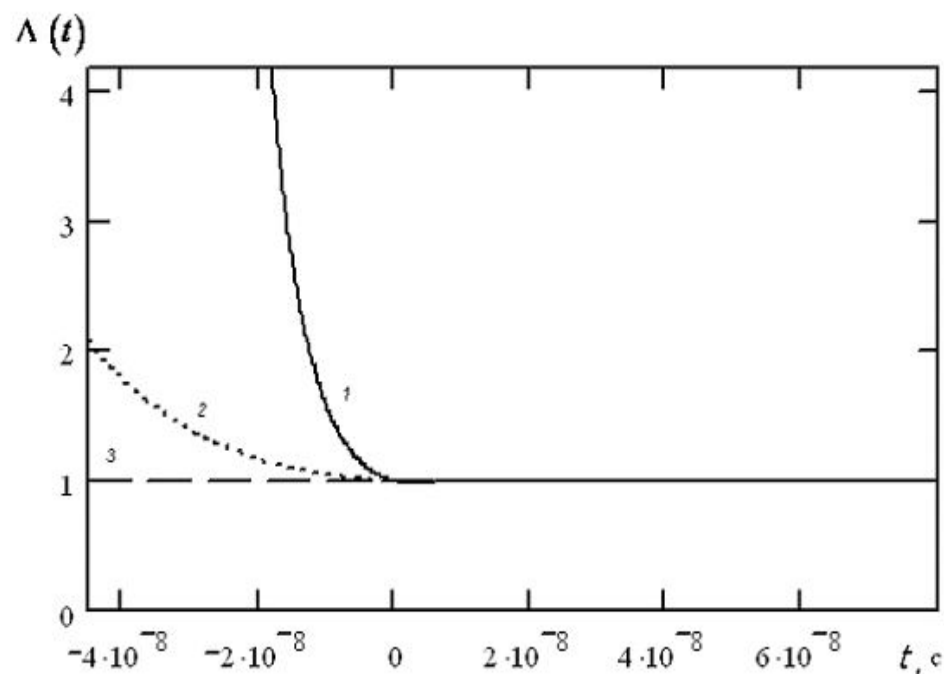
$$F^2(\theta, \varphi) = \exp\left(-\frac{tg^2\theta}{a_{\text{ш}}^2}\right) \exp\left(-5,55 \frac{\theta_s^2}{\theta_0^2} + 11,1 \frac{\theta\theta_s \cos(\varphi)}{\theta_0^2} - 5,55 \frac{\theta^2}{\theta_0^2}\right) \sec^4(\theta)$$

$$P(t + \tau_0) = \frac{2\pi P_1}{H^4} \exp\left(-5,55 \frac{\theta_s^2}{\theta_0^2}\right) \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{r_T^2}{\Psi^2 H^2}\right) I_0\left(\frac{11,1\theta_s r_T}{\theta_0^2 H}\right) \int_{-\infty}^{\infty} W(\eta) \left| \dot{U}\left(t - \frac{r_T^2}{cH} - \eta\right) \right|^2 d\eta r_T dr_T,$$

где $P_1 = \frac{2P_{\text{изл}} \lambda^2 G_0^2 \sigma_0}{(4\pi)^3}$; $\Psi^2 = \frac{\theta_0^2 a_{\text{ш}}^2}{5,55 a_{\text{ш}}^2 + \theta_0^2}$. Зондирующего сигнала с ЛЧМ $\dot{U}(t) = \exp[-(g^2 - jk)t^2]$, где

$$g = \sqrt{\pi} / T_{\text{И}}, \quad k = \pi \cdot \Delta f_c / T_{\text{И}} \quad \text{- крутизна перестройки частоты.}$$

$$\Delta \tau_k(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |R(t+\tau, t)| d\tau \cdot (2|R(t, t)|)^{-1} \quad ; \quad \Lambda(t) = \Delta \tau_k(t) \cdot \Delta f_c$$



Зависимости нормированного интервала корреляции $\Lambda(t) = \Delta \tau_k(t) \cdot \Delta f_c$ для различных случаев взволнованности МП: 1- $\sigma_h = 0,5$ м, $a_w^2 = 0,044$ рад²; 2- $\sigma_h = 1$ м, $a_w^2 = 0,074$ рад²; 3- $\sigma_h = 4$ м, $a_w^2 = 0,141$ рад² (H=800км, $\Delta f_c = 320$ МГц, $\theta_0 = 0,035$ рад, $\theta_s \leq 0,25\theta_0$)

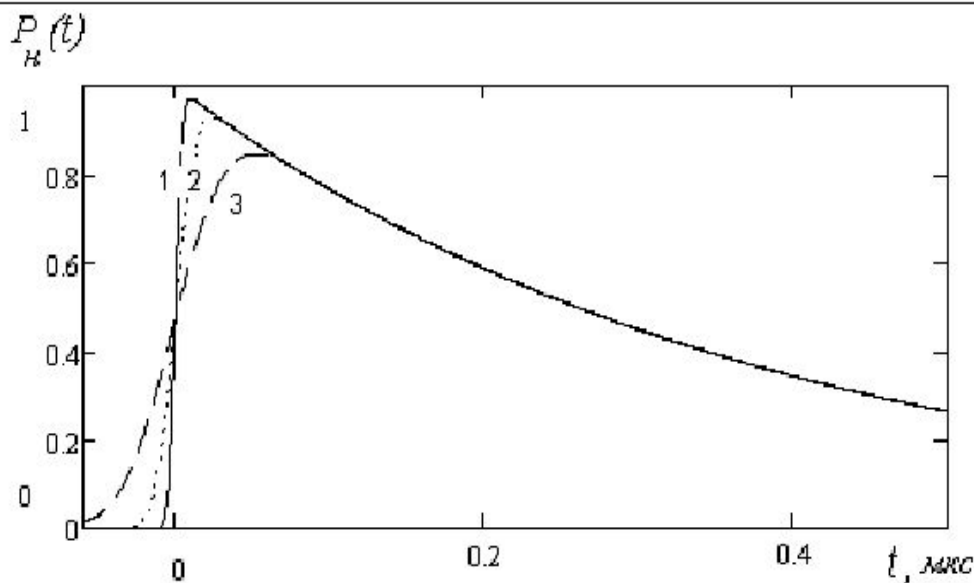
Анализ формы информационного сигнала ПРВ при оптимальной обработке во временной области

$$\dot{K}_\Phi(j\omega) = K_\Phi^* S(j\omega) \exp(-j\omega t_\Phi), \quad \dot{\rho}_c(\tau) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{1 + \frac{k^2}{g^4}} \exp\left(-0,5 \cdot g^2 \left(1 + \frac{k^2}{g^4}\right) \tau^2\right),$$

$$D = \sqrt{1 + \frac{k^2}{g^4}} \approx \Delta f_c \cdot T_{И} - \text{коэффициент сжатия, } g \cdot D = \sqrt{\pi} \cdot \Delta f_c. \quad \theta_s \leq 0,25\theta_0$$

$$R(t+\tau_0, \tau) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{P_{\text{исл}} \lambda^2 G_0^2 K_\Phi^2 |K_0|^2 cD}{64\pi^2 H^3 a_{\text{ш}}^2 \Delta f_c} \cdot \exp \left(-5.55 \frac{\theta_s^2}{\theta_0^2} \right) \cdot \exp(-j\omega_0 \tau) \times \right. \\ \left. \times \exp \left[\frac{b^2 (1+(gD)^2 \sigma^2)}{2(gD)^2} - \frac{(Dg)^2 (\tau + b/(gD)^2)^2}{4} - b(t-t_\Phi) \right] \cdot \left[0.5 - \Phi \left(\frac{b\sqrt{1+2(gD)^2 \sigma^2}}{2gD} - \frac{[2(t-t_\Phi) + \tau] Dg}{2\sqrt{1+2(gD)^2 \sigma^2}} \right) \right] \right\},$$

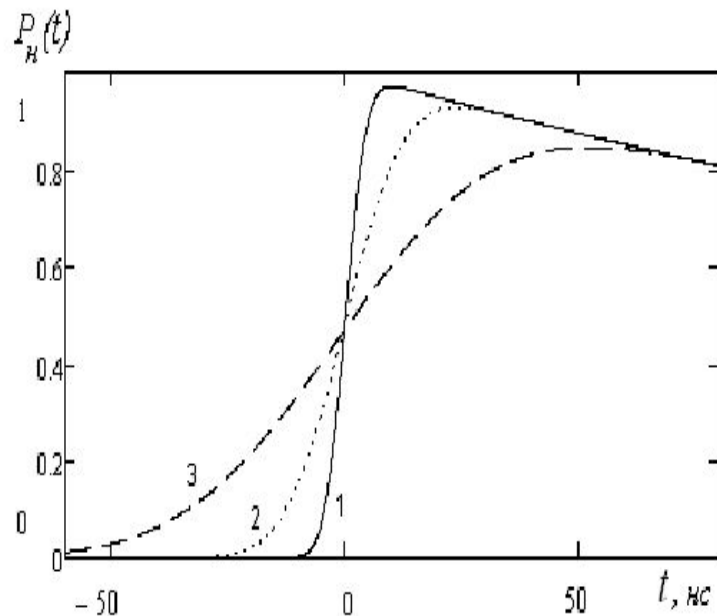
$$P(t) = \frac{P_{\text{исл}} \lambda^2 G_0^2 |K_0|^2 cD}{64\pi^2 H^3 a_{\text{ш}}^2 \Delta f_c} \exp \left(-5.55 \frac{\theta_s^2}{\theta_0^2} \right) \exp \left[\frac{b^2 \mu^2}{4} - b(t-t_\Phi) \right] \cdot \left[0.5 - \Phi \left(\frac{b\mu}{2} - \frac{t-t_\Phi}{\mu} \right) \right]$$



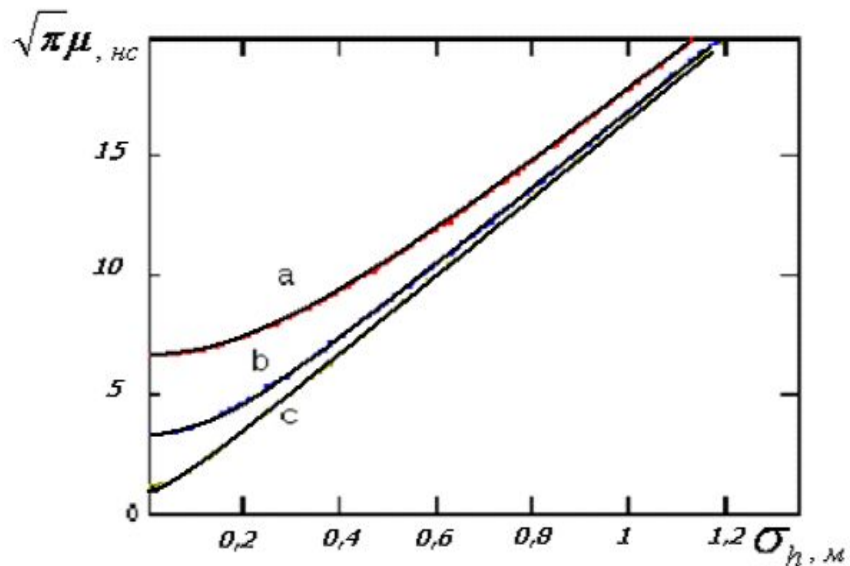
Усредненная нормированная форма отраженного сигнала $P_H(t)$ для различной степени морского волнения: 1) $\sigma_{h1} = 0,5$ м; $a_{ш1}^2 = 0,044$ рад²; 2) $\sigma_{h2} = 1,5$ м; $a_{ш2}^2 = 0,087$ рад²; 3) $\sigma_{h1} = 4$ м; $a_{ш3}^2 = 0,141$ рад²; ($H=800$ км, $\Delta f_c = 320$ МГц, $\theta_0 = 0.035$ рад, $\theta_s = 0$). Момент времени $t=0$ соответствует моменту отражения от среднего уровня МП

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy, \quad b = \frac{c}{HB_{\text{экс}}^2},$$

$$\mu = \sqrt{\left(\frac{1}{\sqrt{\pi} \Delta f_c} \right)^2 + 2\sigma^2}$$

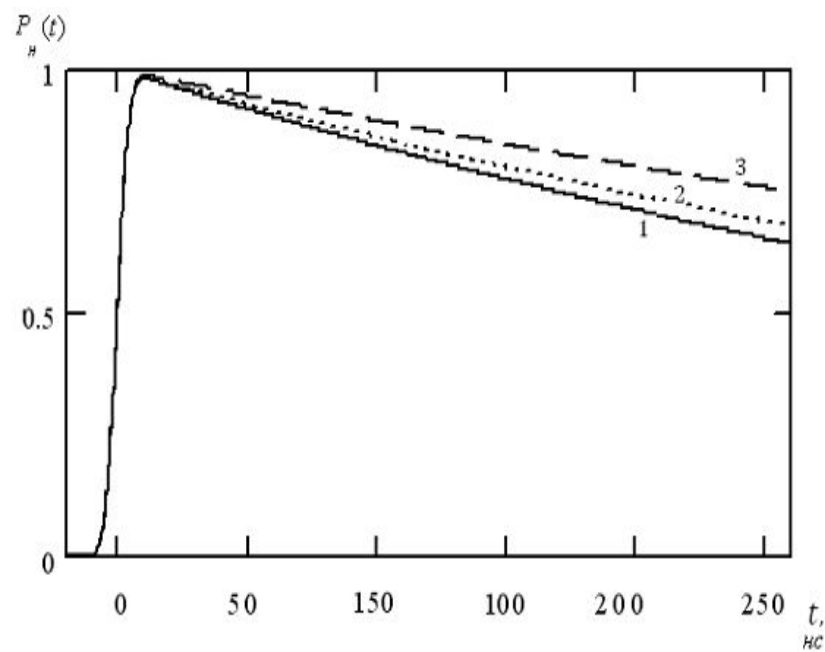


Передний участок нормированной усредненной огибающей по мощности отраженного сигнала $P_H(t)$ при различной степени в зволнованности МП (для тех же исходных данных)



Зависимость параметра $\sqrt{\pi\mu}$ от среднеквадратичных ординат морских волн для различной ширины спектра Δf_c зондирующего сигнала

(a: 150МГц; b: 300МГц; c: 900МГц)



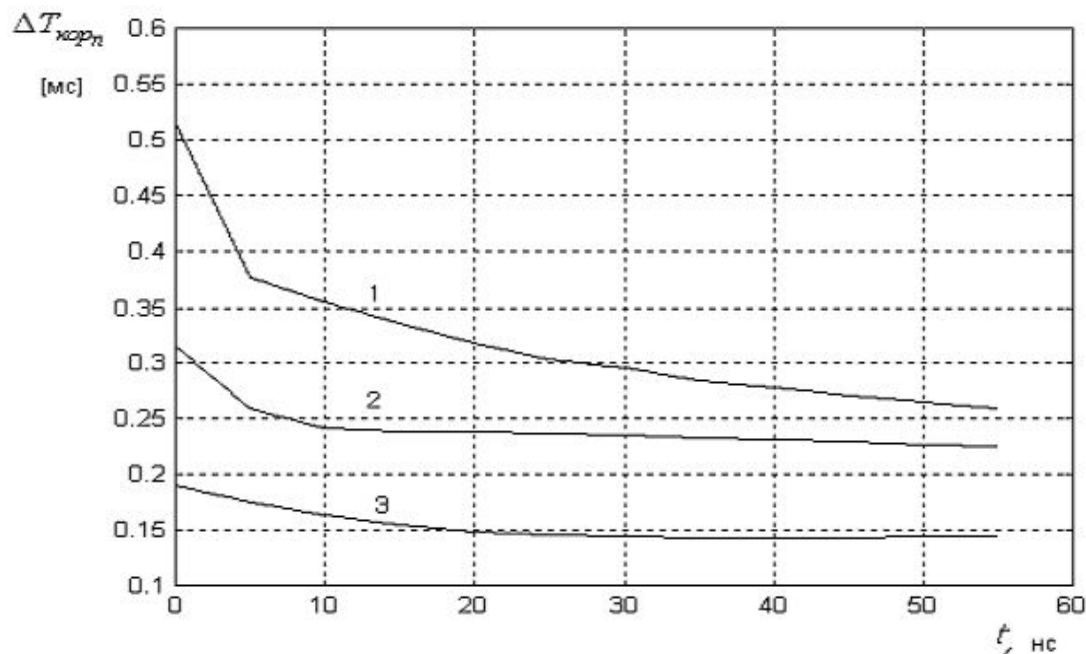
Участок среза нормированной усредненной огибающей по мощности при малой степени морского волнения $\sigma_x = 0.5$ м, $a_w^2 = 0.044$ рад² и различной величине угла отклонения оси ДНА от вертикали $\theta_{s1} = 0$; $\theta_{s2} = 0,15\theta_0$; $\theta_{s3} = 0,25\theta_0$ ($H=800$ км, $\Delta f_c = 320$ МГц, $\theta_0 = 0,035$ рад)

$$R(t, t+T_n) = \frac{2P_1 c \pi^2}{\sqrt{1+4\sigma^2(Dg)^2} H^3} \exp\left(-\frac{2(Dg)^2 t^2}{1+4\sigma^2(Dg)^2}\right) \int_0^\infty \exp\left[\frac{2(Dg)^2 \gamma^2}{1+4\sigma^2(Dg)^2} - \left(b - \frac{4(Dg)^2 t}{1+4\sigma^2(Dg)^2}\right) \gamma\right] \times J_0\left(\frac{4\pi W_H T_n}{\lambda} \sqrt{\frac{c}{H}} \gamma^{\frac{1}{2}}\right) d\gamma \cdot \exp(-j\omega T_n),$$

$\gamma = v_T^2 / cH$; T_n - период повторения зондирующих импульсов, W_H - скорость полета КА с ПРВ. Корреляционного

интервала межпериодных флуктуаций:

$$\Delta T_{\text{копн}}(t) = \int_0^\infty \left| \frac{R(t, T_n)}{R(t, 0)} \right| dT_n$$



Зависимость величины корреляционного интервала $\Delta T_{корр}$ от момента времени t , отсчитываемого от центра фронта отраженного сигнала при $H = 800$ км, $\theta_0 = 1,7^\circ$, $\theta_x = 0$, $\Delta f_c = 320$ МГц, $\lambda = 2$ см, $W_H = 7,5$ км/с, для различных состояний МП: 1) 3 балла; 2) 5 баллов; 3) 7 баллов

Анализ формы информационного сигнала ПРВ при оптимальной обработке в частотной области

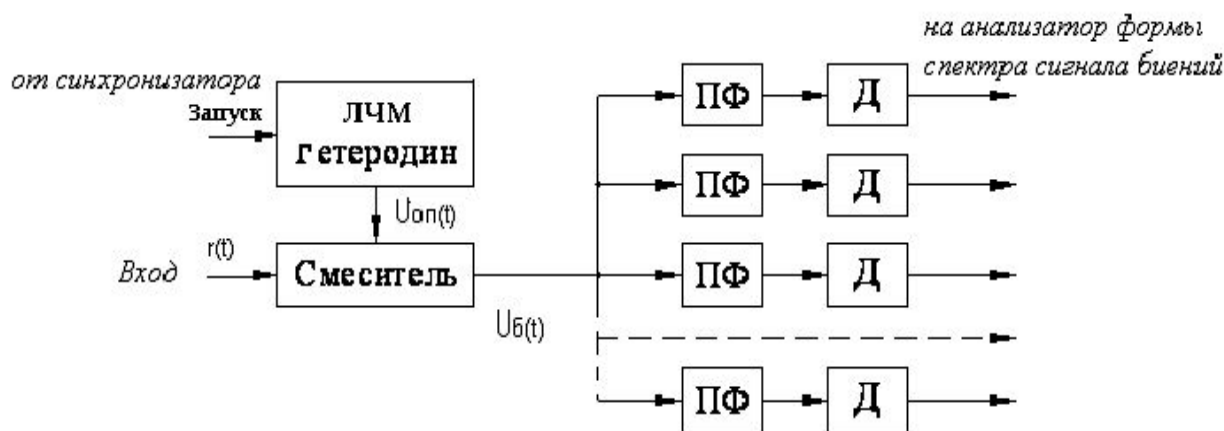


Схема обработки эхо-сигнала в частотной области

$$r(t) = y(t) + n(t), \quad U_{\theta}(t) = r(t) \cdot U_{оп}(t).$$

Корреляционная функция сигнала биений $R_r(t_1, t_2) = \overline{r(t_1)r(t_2)} = R(t_1, t_2) + N_0\delta(t_1 - t_2)$

$R_\sigma(t_1, t_2) = \overline{U_\sigma(t_1)U_\sigma(t_2)} = U_{on}(t_1)U_{on}(t_2)R_r(t_1, t_2)$; $U_{on}(t) = \text{Re}\dot{U}(t)e^{j\omega_2 t}$, то

$$R_\sigma(t_1, t_2) = \text{Re}U_{on}^*(t_1)\dot{U}_{on}(t_2)\dot{R}(t_1, t_2)e^{j(\omega_0 - \omega_2)(t_1 - t_2)} + N_0\delta(t_1 - t_2)\text{Re}U_{on}^*(t_1)\dot{U}_{on}(t_2)e^{-j\omega_2(t_1 - t_2)}$$

$$R_{\sigma_s}(\tau) = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} R_\sigma(t, \tau) dt, \quad S_s(\Omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{\sigma_s}(\tau) e^{-j\Omega\tau} d\tau$$

Средний спектр сигнала биений имеет вид:

$$S_s(\Omega) = \frac{1}{T_n} \text{Re} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_{on}^*(t)\dot{U}_{on}(t+\tau) e^{-j(\omega_0 - \omega_2)\tau} \frac{\pi P_1 c}{H^3} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{c\gamma}{\Psi^2 H}\right) \times$$

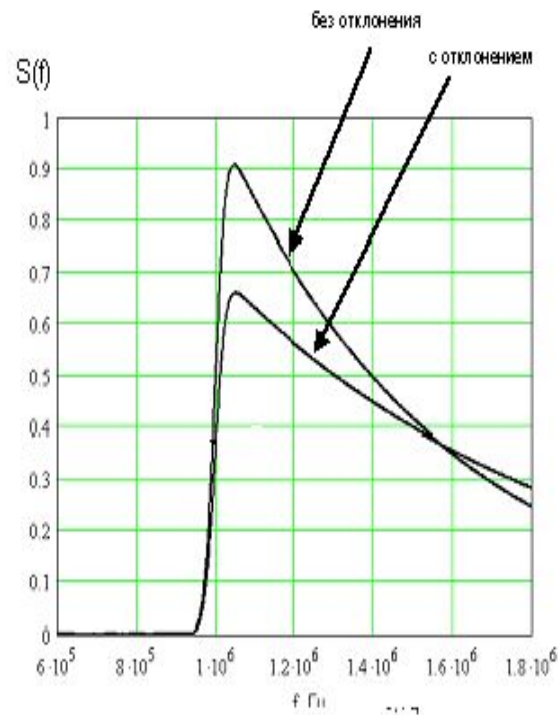
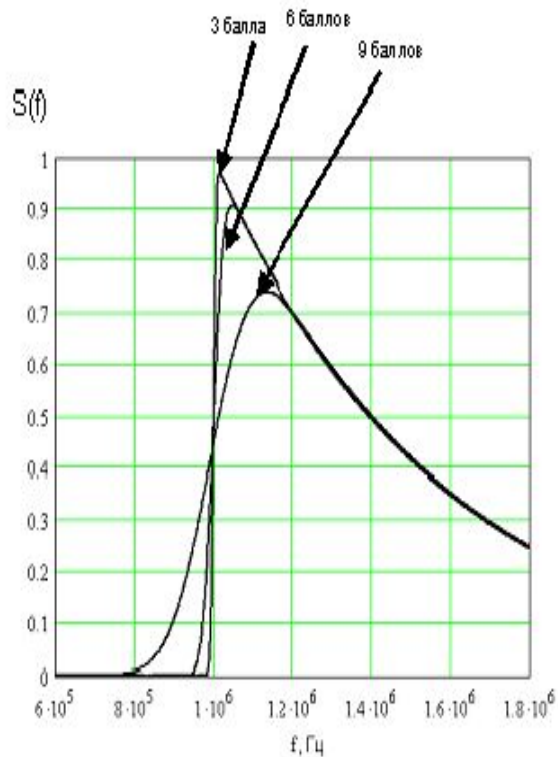
$$I_0\left(\frac{1.11\theta_s}{\theta_0^2} \sqrt{\frac{c}{H}\gamma}\right) \int_{-\infty}^{\infty} W(\eta) \dot{U}(t - \gamma - \eta) \dot{U}^*(t - \gamma - \eta) e^{-j\Omega\tau} d\eta d\gamma d\tau dt =$$

$$= \frac{\pi P_1 c T_n}{H^3} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{c\gamma}{\Psi^2 H}\right) I_0\left(\frac{1.11\theta_s}{\theta_0^2} \sqrt{\frac{c}{H}\gamma}\right) \int_{-\infty}^{\infty} W(\eta) |\dot{C}[-(\gamma + \eta), \Omega]|^2 d\eta d\gamma,$$

$$\dot{C}[-(\gamma + \eta), \Omega] = \frac{1}{T_n} \int_{-\infty}^{\infty} U_{on}^*(t) \cdot \dot{U}[t - (\gamma + \eta)] e^{j\Omega t} dt, \quad t = \frac{f}{k} = \frac{fT_u}{\Delta f_c}$$

Для зондирующего сигнала ЛЧМ с гауссовой огибающей:

$$S_s(f) = \frac{P_{изл} \lambda^2 G_0^2 |K_0|^2 T_u^2 cD}{64\pi^2 H^3 a_{ш}^2 \Delta f_c T_n} \exp\left(-5.55 \frac{\theta_s^2}{\theta_0^2}\right) \exp\left(\frac{b^2 \mu^2}{4} - \frac{bf}{k}\right) \left[0.5 - \Phi\left(\frac{b\mu}{2} - \frac{f}{k\mu}\right)\right]$$



Нормированные усредненные огибающие дальномерного спектра ($H=1000$ км, ширина ДНА 1° , с отклонением оси ДНА $\theta_s = 15'$, длительность зондирующего импульса $102,4$ мкс, ширина спектра 320 МГц, промежуточная частота $f_{пч}=1$ МГц)

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ МОРСКИХ ВОЛН ПО ФОРМЕ ФРОНТА ИНФОРМАЦИОННОГО СИГНАЛА

Определение высоты МВ по форме фронта информационного сигнала с использованием аппроксимирующего полинома

$$U_{\text{д.вых}}(t) = \mathfrak{Z}(t - \tau_0) \left| \int_{-\infty}^t r(\tau) e^{j\omega_0 \tau} h_{\Phi}(t - \tau) d\tau \right|^2, \quad \mathfrak{Z}(t - \tau_i) = \sum_{i=1}^n c_i \delta(t - \tau_i) - \mathfrak{Z}(t) \text{ - весовая функция}$$

последетекторной обработки:



Расположение следящих стробов относительно усредненной огибающей отраженного сигнала

$$P_0(\tau) = a_0 + a_1 \tau + a_2 \tau^2 + a_3 \tau^3,$$

$$E_1 = \sum_{i=-\frac{n-1}{2}}^{+\frac{n-1}{2}} [P_0(\tau_i) - P(iT_k)]^2 = \sum_{i=-\frac{n-1}{2}}^{+\frac{n-1}{2}} \left[\sum_{l=0}^3 a_l \tau_i^l - P(iT_k) \right]^2 = \min.$$

Для $n=5$

$$a_0 = \frac{1}{11,66} [-y_{-2} + 4y_{-1} + 5,66y_0 + 4y_1 - y_2];$$

$$a_1 = \frac{1}{12T_k} [y_{-2} - 8y_{-1} + 8y_1 - y_2];$$

$$a_2 = \frac{1}{14T_k^2} [2y_{-2} - y_{-1} - 2y_0 - y_1 + 2y_2];$$

$$a_3 = \frac{1}{12T_k^3} [-y_{-2} + 2y_{-1} - 2y_1 + y_2].$$

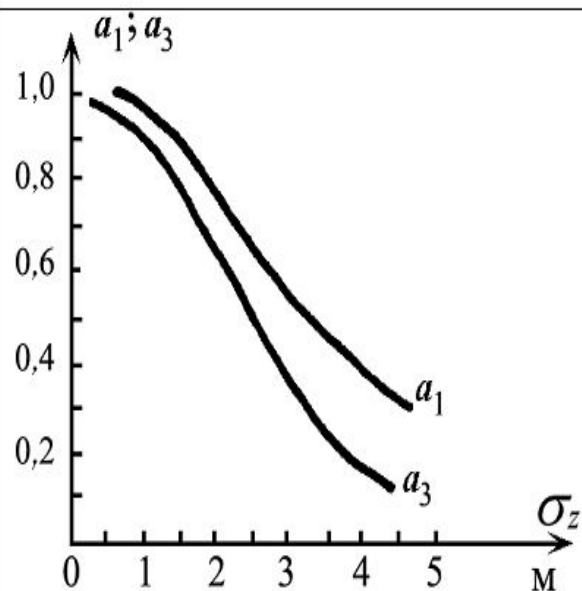
Для $n=7$

$$a_0 = \frac{1}{21} [-2(y_{-3} + y_3) + 3(y_{-2} + y_2) + 6(y_{-1} + y_1) + 7y_0];$$

$$a_1 = \frac{1}{252T_k} [22(y_{-3} - y_3) - 67(y_{-2} - y_2) - 58(y_{-1} - y_1)];$$

$$a_2 = \frac{1}{84T_k^2} [5(y_{-3} + y_3) - 3(y_{-1} + y_1) - 4y_0];$$

$$a_3 = \frac{1}{36T_k^3} [-(y_{-3} - y_3) + (y_{-2} - y_2) + (y_{-1} - y_1)],$$



$$\{P_0(\tau)\}'' = 2a_2 + 6a_3\tau = 0; \quad \hat{\tau}(\Delta) = -\frac{a_2}{3a_3};$$

$$\sigma_{\tau\phi n}^2 = \frac{T_k^2}{49a_3^2} \left(A + \frac{2B}{q} + \frac{84}{q^2} \right); \quad q = \frac{P_m T_k}{2N_0};$$

$$KB\mathcal{L} = \frac{a_3}{a_0};$$

$H=350\text{км}, \theta = 2^\circ, \theta_s = 0^\circ, \Delta f_c = 80 \text{ МГц}$

Синтез оптимальных алгоритмов обработки отраженных сигналов ПРВ космического базирования

Синтез оптимального дискриминатора

Логарифм функции правдоподобия:

$$\Lambda[\xi(t)/\tau_0] = C_0 - \frac{1}{2N_0} \int_0^T \xi^2(t) dt + \frac{1}{2N_0} \int_0^T \frac{q(t)}{1+q(t)} \overline{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \xi(\tau) e^{j\omega_0 \tau} \dot{h}_{\hat{\phi}}(t-\tau) d\tau \right|^2} dt$$

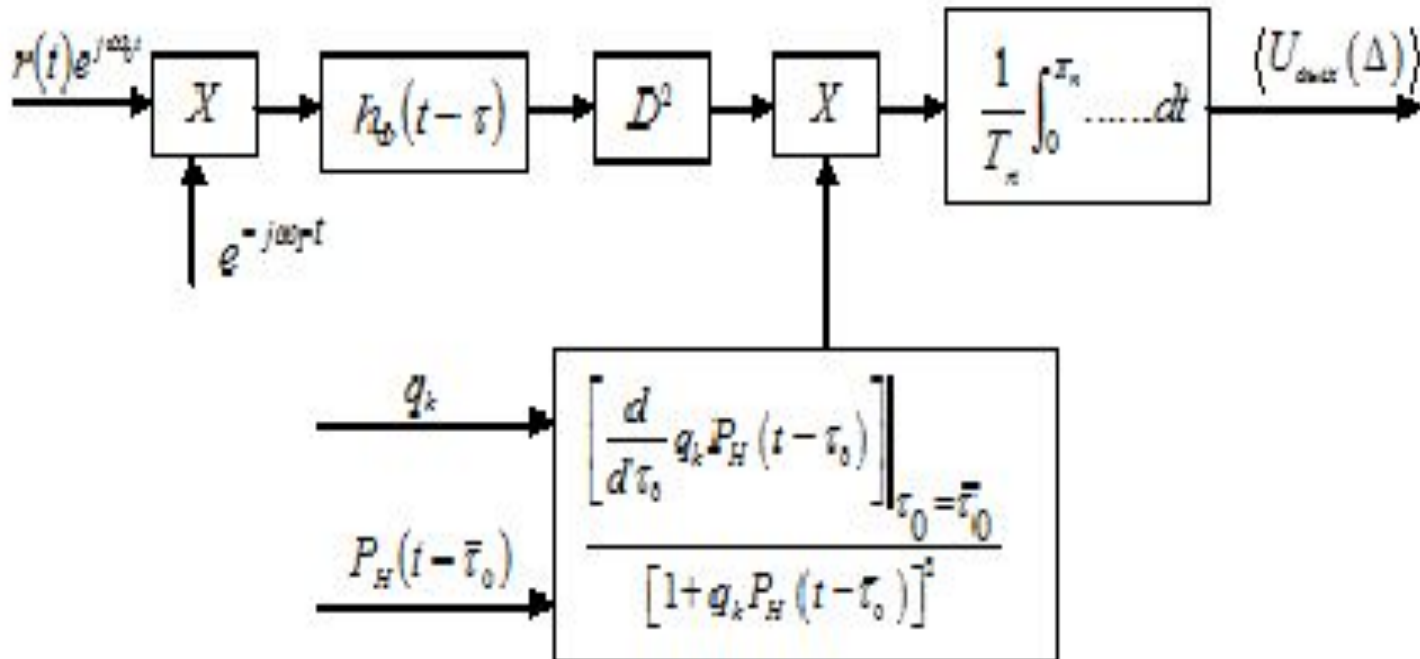
Оптимальный дискриминатор:

$$\overline{z_{\hat{a}}[\hat{p}(t) - p(t)]} = \frac{\partial}{\partial p} \left[\frac{1}{2N_0} \int_0^T \frac{q(t)}{1+q(t)} \overline{\left| \int_{-\infty}^{\infty} \xi(\tau) e^{j\omega_0 \tau} \dot{h}_{\hat{\phi}}(t-\tau) d\tau \right|^2} dt \right] \Bigg|_{p(t)=\hat{p}(t)}$$

Дискриминационная характеристика после компенсации шумового компонента

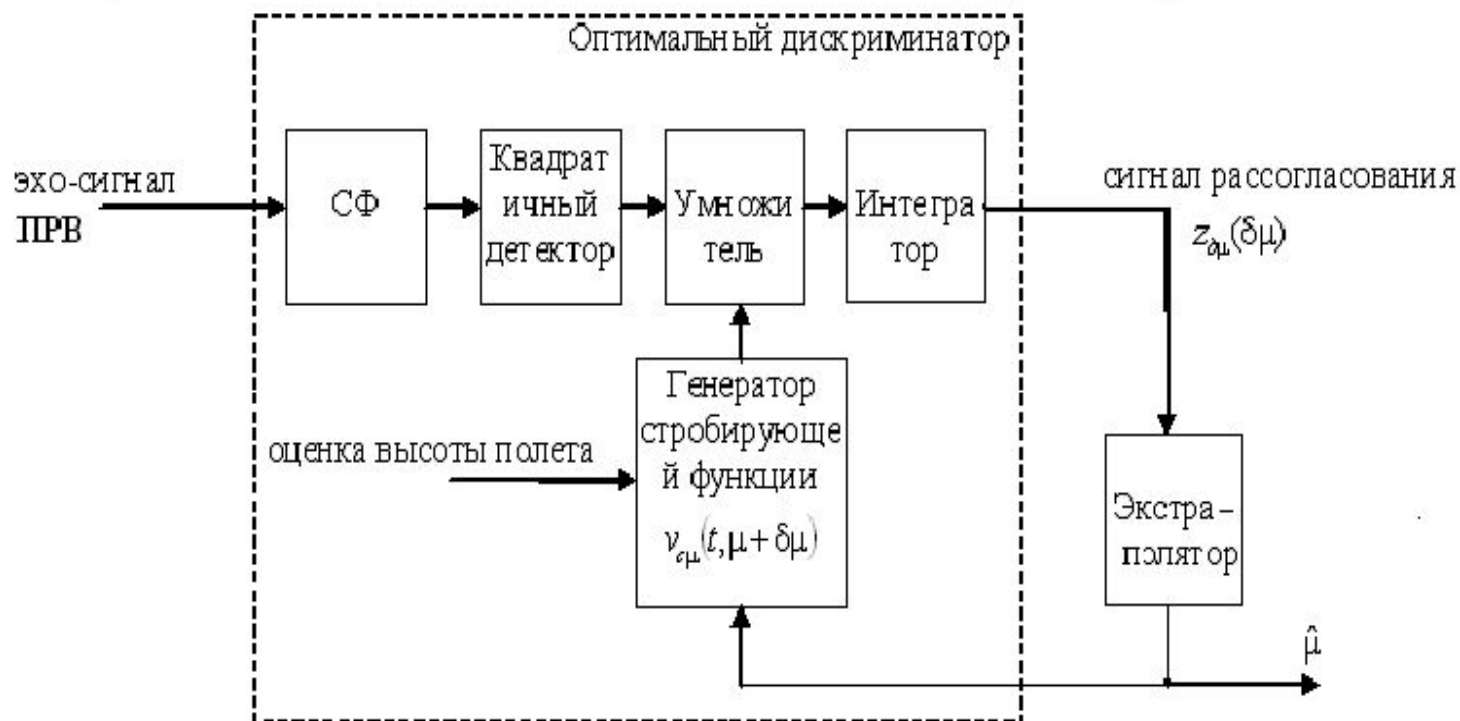
$$\overline{U_{\partial \mu}(\delta \mu)} = P_m \int_{-\infty}^{\infty} P_{\kappa}(t, \mu) v_{c\mu}(t, \mu + \delta \mu) dt,$$

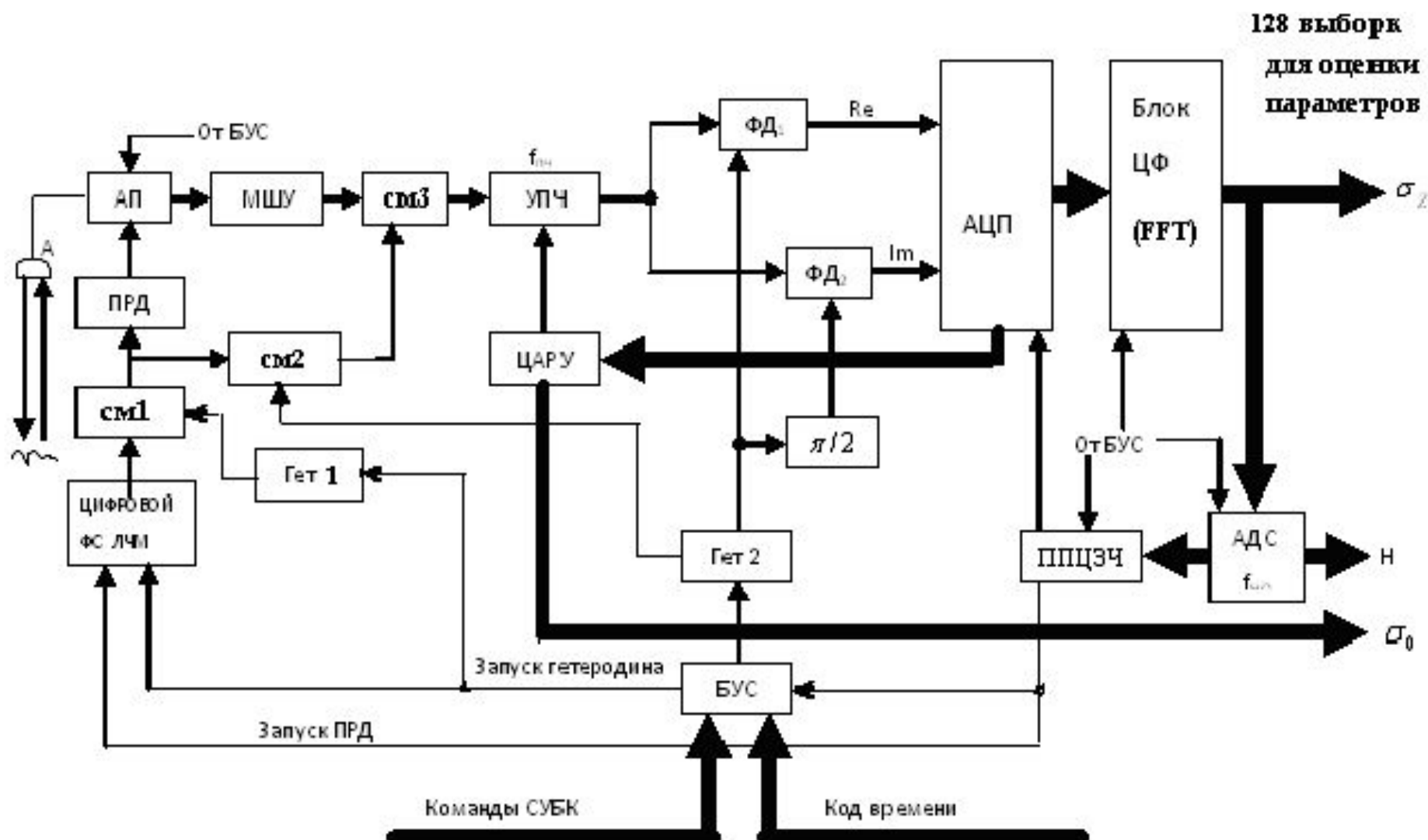
Структура оптимального дискриминатора при обработке отраженного сигнала ПРВ во временной области



$$v_{c\mu}(t, \mu + \delta\mu) = \frac{b^2 (\mu + \delta\mu) P_{\kappa}(t, \mu + \delta\mu)}{q_k \left[\frac{1}{q_k} + P_{\kappa}(t, \mu + \delta\mu) \right]^2} \cdot \frac{\exp \left[\frac{b^2 (\mu + \delta\mu)^2}{4} - bt \right] \cdot \exp \left[- \left(\frac{b(\mu + \delta\mu)}{2} - \frac{t}{\mu + \delta\mu} \right)^2 \right] \cdot \left[\frac{b}{2} + \frac{t}{(\mu + \delta\mu)^2} \right]}{\sqrt{\pi} q_k \left[\frac{1}{q_k} + P_{\kappa}(t, \mu + \delta\mu) \right]^2}$$

Блок-схема измерительной системы ПРВ на основе оптимального дискриминатора степени взволнованности

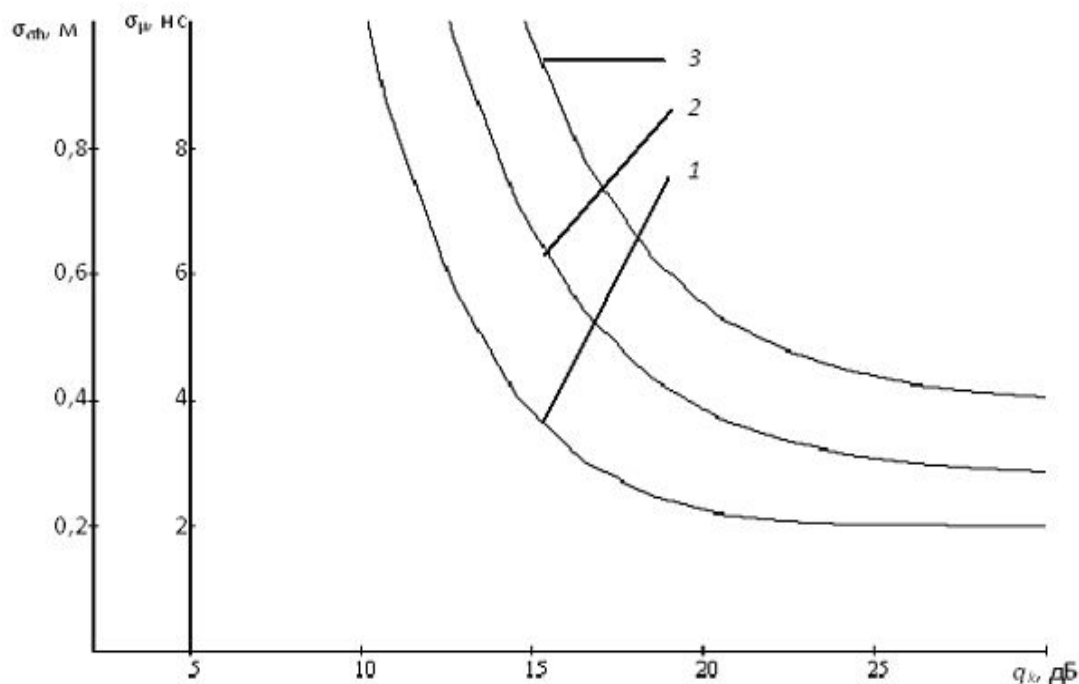




Структурная схема ВРВ с обработкой в частотной области
(СУБК - система управления бортовым комплексом)

Типовая структурная схема радиовысотомера с обработкой в частотной области показана на рис. Данный прибор должен обеспечивать измерение высоты с флуктуационной погрешностью не хуже 3-5 см, $\Delta f_c = 320$ МГц, длительность зондирующего импульса $T_u = 105,6$ мкс, частота повторения $F_n = 1,8$ КГц. При этом, каждому метру перепада расстояний δH соответствует интервал дальномерных частот $\delta f_n = (2 \cdot \delta H / c) \cdot (\Delta f_c / T_u) = 20,2$ КГц.

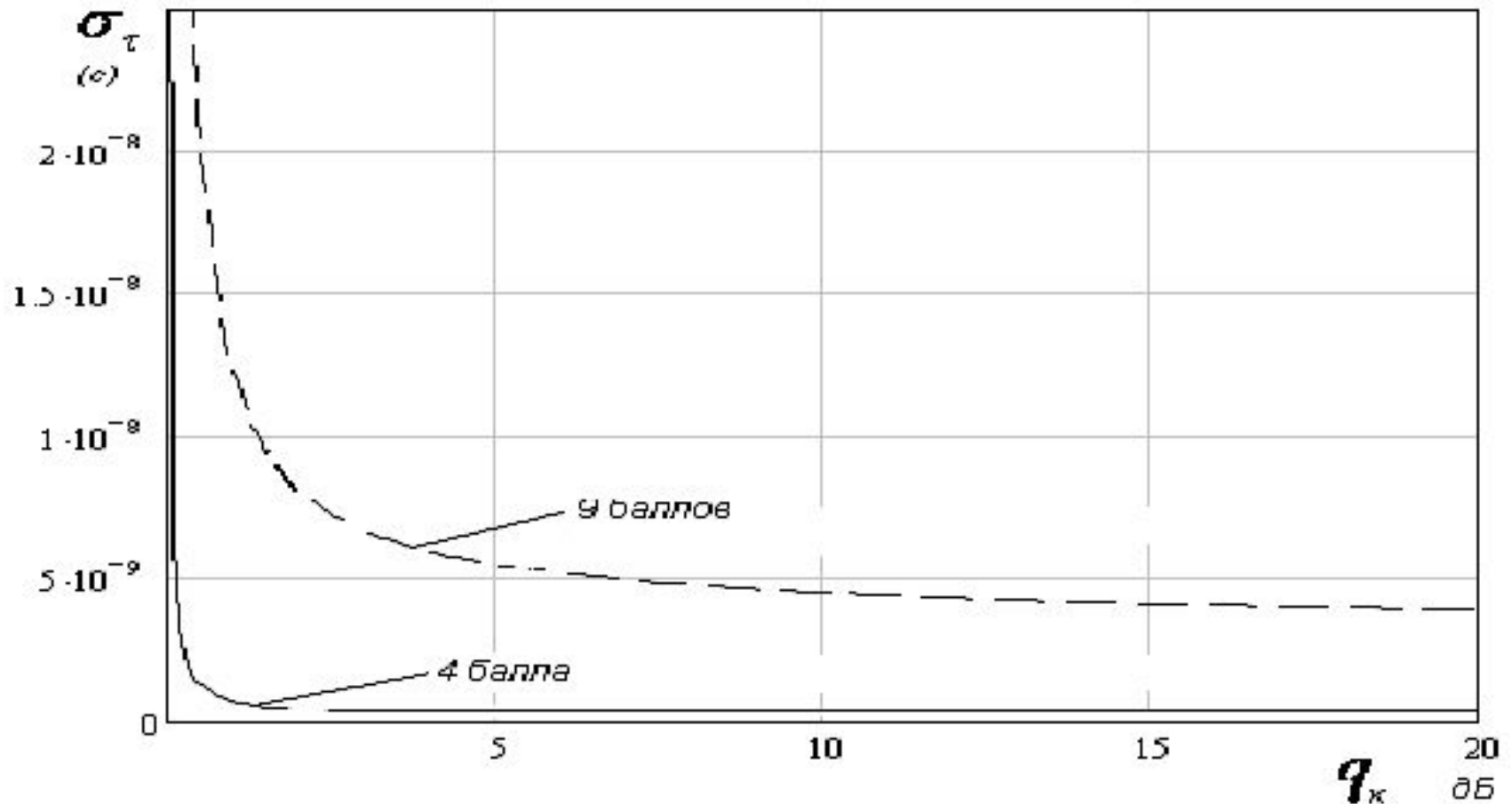
$$\delta f_n = (2 \cdot \delta H / c) \cdot (\Delta f_c / T_u)$$



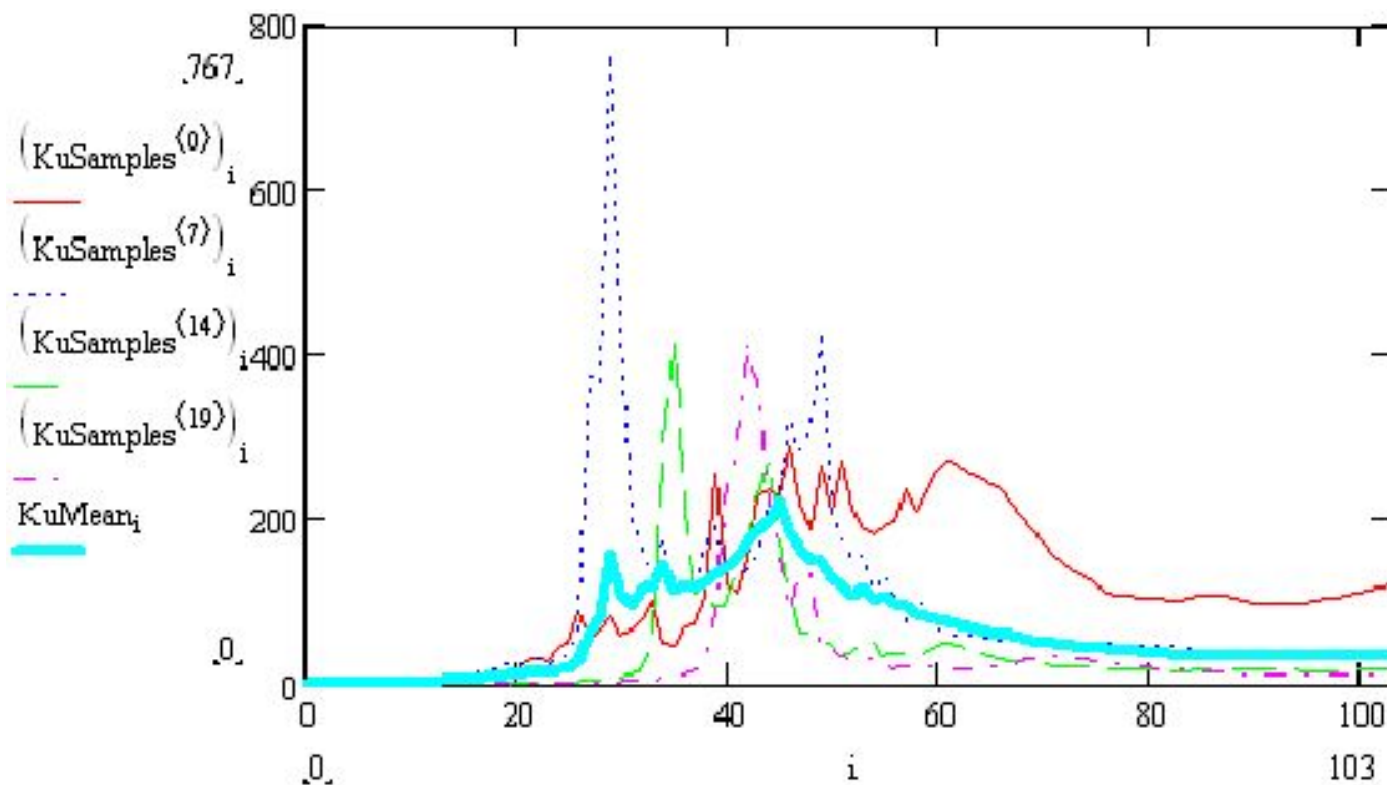
Потенциальная точность единичного измерения параметра μ и ординат морских волн: 1 - $\sigma_{h_{ист}} = 1$ м ($\mu_{ист} = 10$ нс); 2 - $\sigma_{h_{ист}} = 2$ м ($\mu_{ист} = 20$ нс); 3 - $\sigma_{h_{ист}} = 4$ м ($\mu_{ист} = 40$ нс)

Зависимость потенциальной точности единичного измерения времени запаздывания (высоты) от отношения с/ш при средней (4 балла) и сильной (9 баллов) степени взволнованности Δ МП ($H=1000\text{км}$, $f=320\text{ МГц}$, $Q=1$)

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{S_{\text{зхе}}(0)}{T_n}}$$



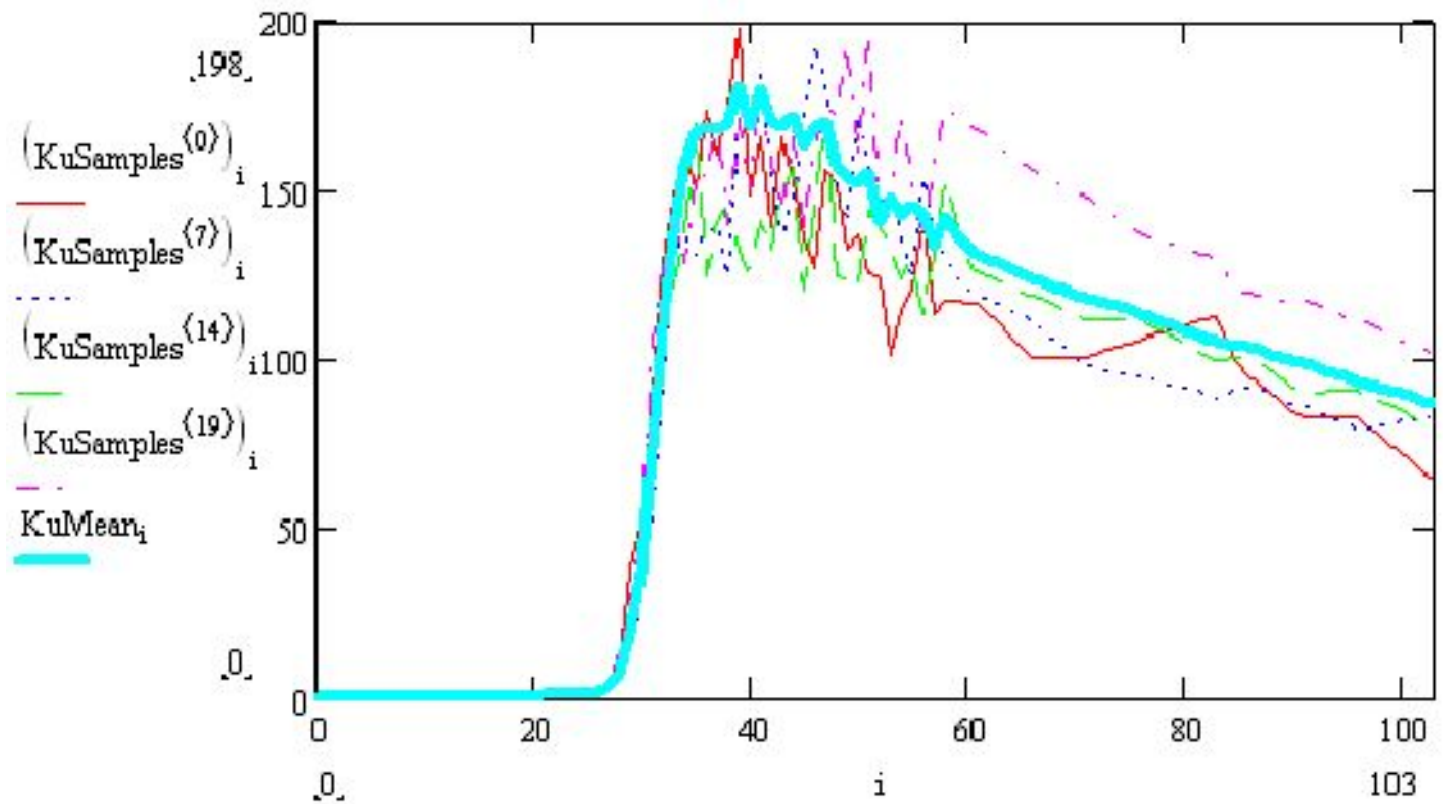
Экспериментально полученные с ПРВ сигналы для режима работы над морской поверхностью и над участками суши, осредненные за 50мс и за 1с.



RecNumber := 2132

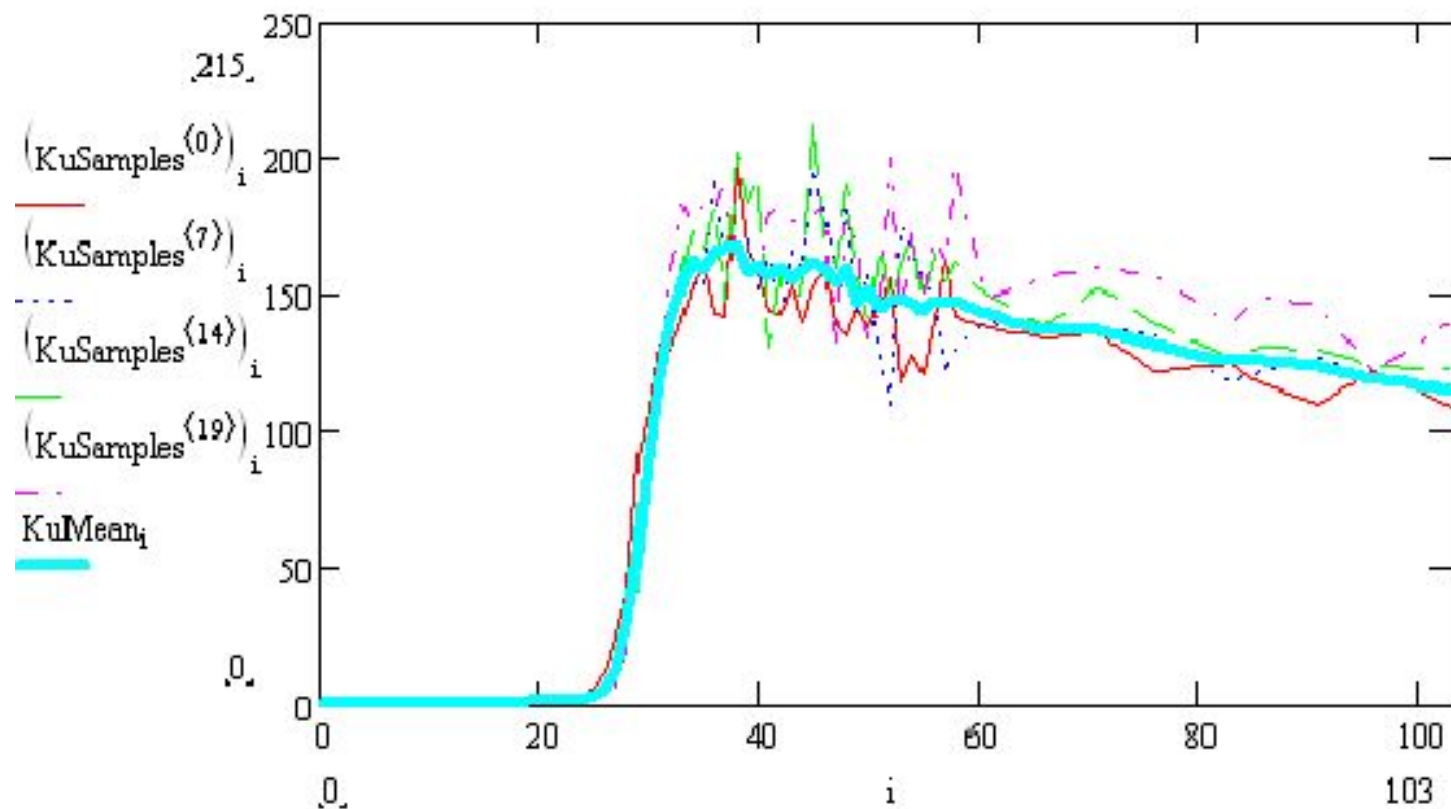
- номер секундной записи в файле

Считывание отсчетов спектра из файла SGDR, участок над сушей



RecNumber := 1025 - номер секундной записи в файле

Считывание отсчетов спектра из файла SGDR, участок над морем



RecNumber := 1055 - номер секундной записи в файле

Считывание отсчетов спектра из файла SGDR, участок над морем

Контрольные вопросы

- 1. Объясните назначение прецизионного радиовысотомера космического базирования.
- 2. Какие основные проблемы необходимо решить при создании океанографического ПРВ?
- 3. Что из себя представляет модель радиосигнала, отраженного от морской поверхности?
- 4. Поясните зависимость усредненной формы отраженного от МП ЛЧМ радиоимпульса при различных параметрах локатора, режимах облучения и состояниях МП.
- 5. Чем объясняется выбор ширины спектра зондирующего сигнала?
- 6. Поясните влияние степени взволнованности морской поверхности на форму информационного сигнала ПРВ.
- 7. Поясните влияние отклонения оси ДНА ПРВ от вертикали на форму информационного сигнала.
- 8. Как объясняется зависимость корреляционных интервалов быстрых и медленных флуктуаций отраженных радиосигналов от состояния МП?
- 9. В чем отличия оптимального приема отраженного сигнала в частотной области от оптимального приема во временной области?
- 10. Какой сигнал называют информационным и почему?
- 11. Поясните структуру оптимального дискриминатора следящего измерителя ПРВ?
- 12. От чего зависят систематические погрешности определения высоты?
- 13. От чего зависят случайные погрешности определения высоты?
- 14. Поясните зависимость потенциальной точности единичного измерения высоты от отношения с/ш.
- 15. Из каких блоков состоят структурные схемы ПРВ с обработкой отраженного сигнала во временной и частотной области.