



Численное моделирование радиолокационных отражений от рельефных поверхностей

ИЛЮШИН Я.А.
ЧЖАО ХУНЛИ

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова



ВВЕДЕНИЕ

PART 01

ВВЕДЕНИЕ

- Роль радиолокатора с синтезированной апертурой (SAR) в зондировании суши, моря и подповерхности
- Важность численного моделирования в разработке и анализе данных SAR
- Необходимость моделирования эхо-сигналов от статистически шероховатых поверхностей
- Создание эффективной численной модели для расчёта радиолокационных отражений



Гауссовское приближение показательной функции

PART 03

Гауссовское приближение показательной функции

Экспоненциальная

$$C_{\text{exp}}(\rho) = \exp\left(-\frac{\rho}{l}\right)$$

Гауссовская корреляция

$$C_{\text{gauss}}(\rho) = \exp\left(-\frac{\rho^2}{l^2}\right)$$

Гауссовское приближение показательной функции

Аппроксимация суммы Гаусса

$$C(\rho) \approx \sum_{m=1}^M b_m \exp\left(-\frac{\rho^2}{a_m^2 l^2}\right)$$

Процесс оптимизации

$$\Delta = \int_0^\infty \left[\exp(-r) - \sum_{m=1}^M b_m \exp\left(-\frac{r^2}{a_m^2 l^2}\right) \right]$$

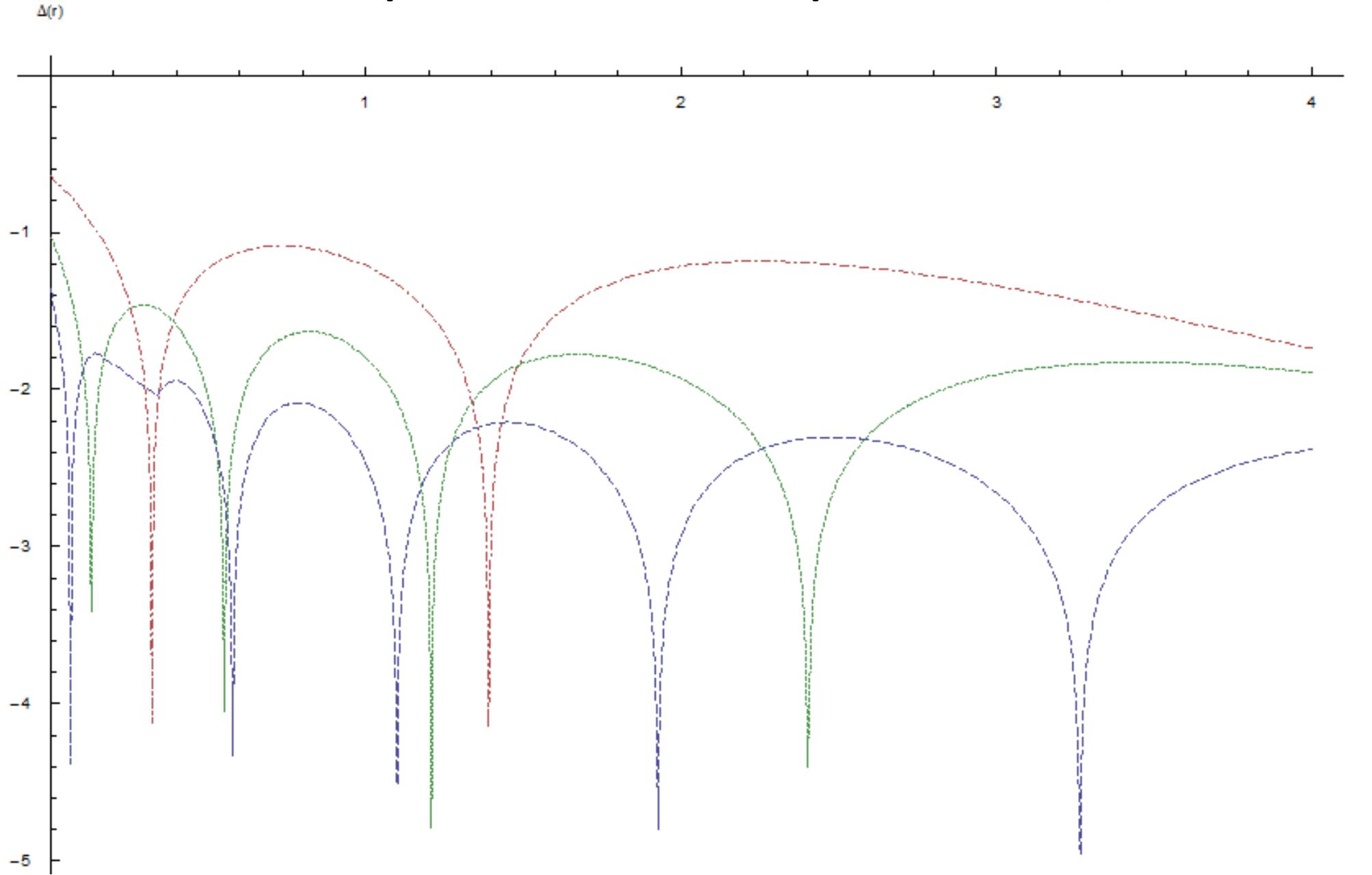
Коэффициенты a_m , b_m до $M = 6$ вычисляются заранее по таблице

Гауссовское приближение показательной функции

M	1	2	3	4	5	6
a_m	1.31	0.5522 1.911	0.27176 0.94494 2.320377	0.146831 0.511386 1.256645 2.639987	0.0845654 0.2946648 0.7250617 1.519446 2.905464	0.05105718 0.17793337 0.43804789 0.91883102 1.74827837 3.13424879
b_m	0.77	0.4651 0.4398	0.242893 0.43380 0.27663	0.133011 0.275621 0.383797 0.182373	0.0768903 0.166041 0.2887471 0.3295345 0.1242777	0.04647752 0.1016832 0.18981578 0.28762211 0.27876577 0.08687598
Δ	0.014	0.0013	0.00017	0.00003	6×10^{-6}	1.5×10^{-6}

Коэффициенты и невязки аппроксимирующих выражений

Погрешность аппроксимации

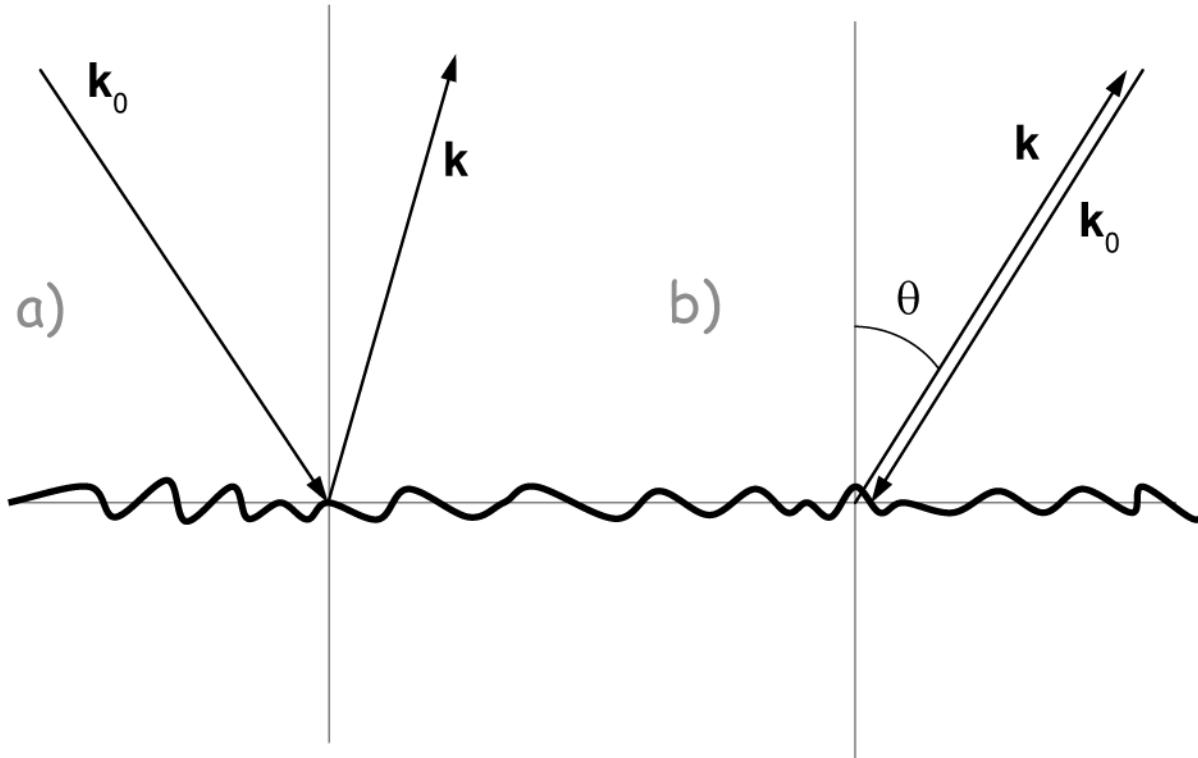




Моделирование обратного рассеяния SAR (приближение Кирхгофа)

PART 02

Радиолокационное сечение обратного рассеяния



Моделирование обратного рассеяния SAR (приближение Кирхгофа)

В приближении Кирхгофа сечение обратного рассеяния для элемента поверхности равно:

$$\sigma = \frac{Q^4 |\Gamma|^2}{4Q_z^2} 2 \int_0^{\infty} \rho d\rho J_0(Q_\rho \rho) \times \left(e^{-Q_z^2 h^2 (1 - C(\rho))} - e^{-Q_z^2 h^2} \right)$$

где:

$$Q = |\vec{k} - \vec{k}_0|$$

$$Q_z = \hat{z} \cdot (\vec{k} - \vec{k}_0)$$

$C(\rho)$: поверхностная корреляционная функция

Радиолокационное сечение обратного рассеяния от экспоненциально коррелированной поверхности

$$\sigma = \frac{Q^4 |\Gamma|^2}{4Q_z^2} 2 \int_0^\infty \rho d\rho J_0(Q_\rho \rho) \times \left(e^{-Q_z^2 h^2 (1 - C(\rho))} - e^{-Q_z^2 h^2} \right)$$

$$C(\rho) = \exp\left(-\frac{\rho}{l}\right)$$

Экспоненциальная корреляционная функция высот

Hagfors law

$$\sigma = \frac{C |\Gamma|^2}{2 (\cos^4 \theta + C \sin^2 \theta)^{3/2}}$$

$$C = \frac{(kl)^2}{4(kh)^4}.$$

Радиолокационное сечение обратного рассеяния от экспоненциально коррелированной поверхности

$$\sigma = \frac{Q^4 |\Gamma|^2}{4Q_z^2} 2 \int_0^\infty \rho d\rho J_0(Q_\rho \rho) \times \left(e^{-Q_z^2 h^2 (1 - C(\rho))} - e^{-Q_z^2 h^2} \right)$$

$$C(\rho) = \exp\left(-\frac{\rho}{l}\right) \approx \sum_{m=1}^M b_m \exp\left(-\frac{\rho^2}{a_m^2 l^2}\right).$$

Экспоненциальная корреляционная функция высот, аппроксимированная суммой Гауссов

$$\sigma = \frac{|\Gamma|^2 (kl)^2}{\cos \theta^2} \sum_{n_1=0}^{\infty} \dots \sum_{n_M=0}^{\infty} \frac{4^{\Sigma_1}}{\Sigma_2} \frac{b_1^{n_1} \dots b_M^{n_M}}{n_1! \dots n_M!} ((kh)^2 \cos^2 \theta)^{\Sigma_1}$$

(15)

$$\exp\left(-4(kh)^2 \cos^2 \theta - \frac{(kl)^2 \sin^2 \theta}{\Sigma_2}\right) sgn(\Sigma_1),$$

$$\Sigma_1 = \sum_{m=1}^M n_m,$$

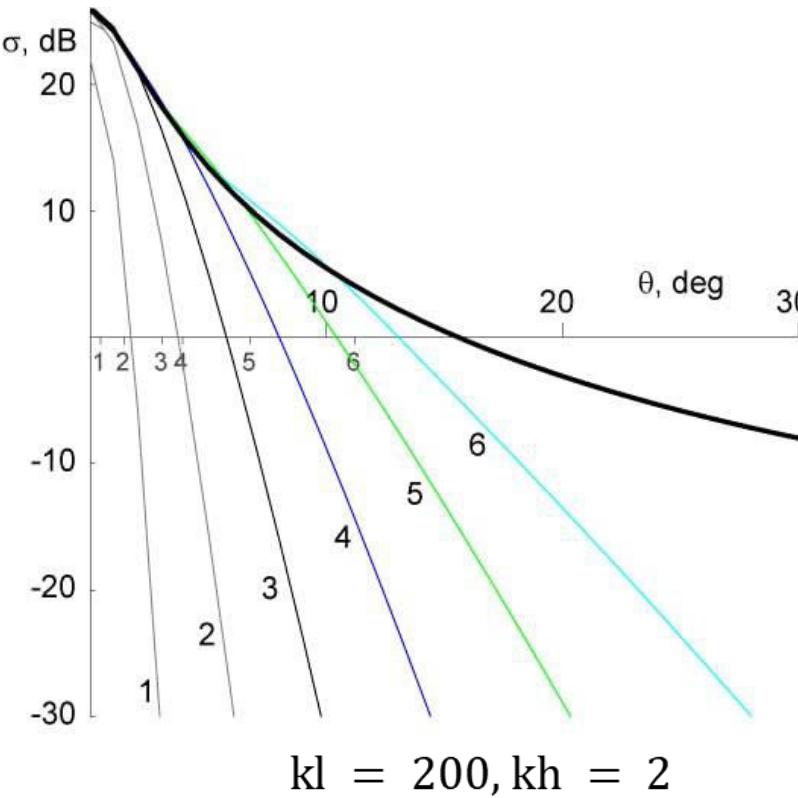
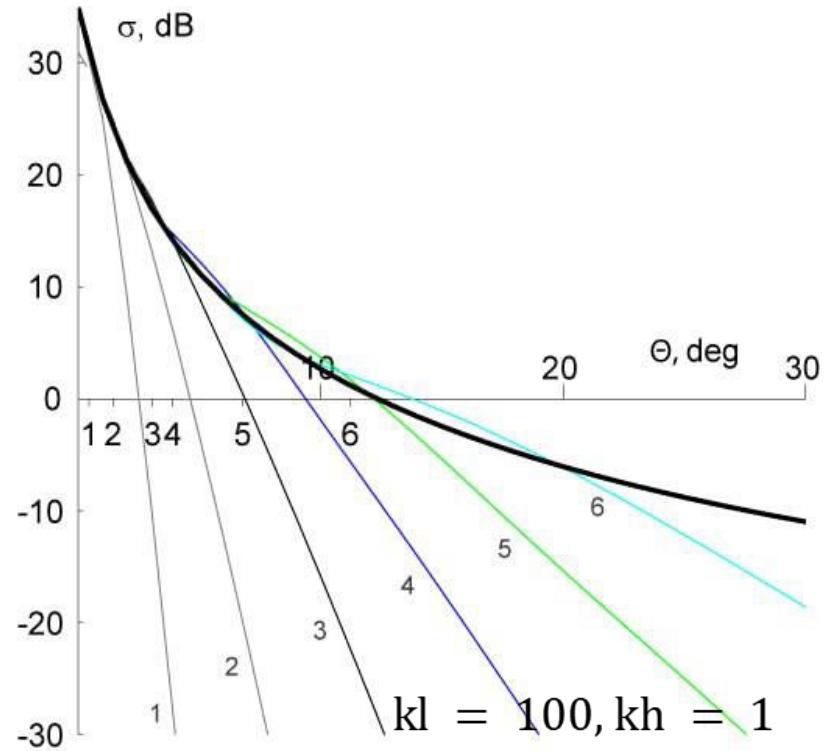
$$\Sigma_2 = \sum_{m=1}^M \frac{n_m}{\alpha_m^2}.$$



Проверка закона обратного рассеяния Хагфорса

PART 04

Проверка закона обратного рассеяния Хагфорса



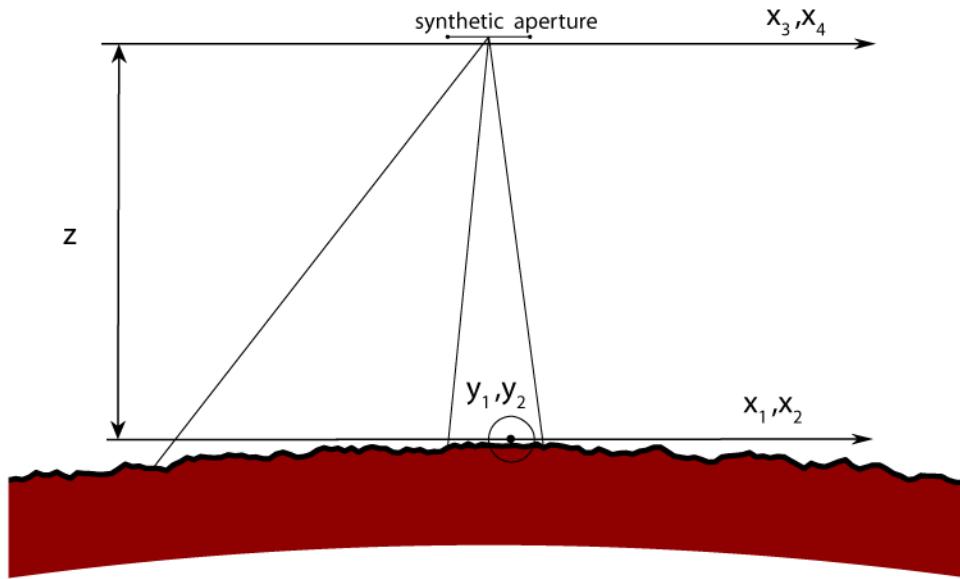
Сечения обратного радиолокационного рассеяния рельефной поверхности σ



Численное моделирование синтеза эхосигнала SAR

PART 05

Численное моделирование синтеза эхосигнала SAR



Схематическое изображение радиолокации рельефной поверхности с синтезом апертуры

Синтез апертуры:

$$2L = \frac{1}{2}\sqrt{\lambda z}$$

Синтезированный сигнал:

$$E_{\omega_I}^{(S)} = \frac{1}{\sqrt{\pi}L} \int \exp\left(-\frac{x_3^2}{L^2}\right) E_{\omega_I}^{(R)}(x_3, 0) dx_3$$

Двухчастотная корреляция:

$$\Gamma(\omega_I, \omega_{II})$$

Окно Хэннинга:

$$H(\omega) = \frac{1}{2} \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{\omega - \omega_-}{\omega_+ - \omega_-} \right) \right)$$

Среднеквадратичная мощность отражения

$$\langle |E(t)|^2 \rangle \propto \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega_I) H(\omega_{II}) \Gamma(\omega_I, \omega_{II}) \exp(i(\omega_I - \omega_{II})t) d\omega_I d\omega_{II},$$

Функция Грина параболического уравнения дифракции

$$G(k, x, y, x', y') = \frac{k}{2\pi iz} \exp \left(ikz + ik \frac{(x - x')^2}{2z} + ik \frac{(y - y')^2}{2z} \right). \quad (18)$$

Интегрирование многомерного Гауссовского распределения

$$\int \exp(-A_{ij}x_i x_j + B_i x_i) d^n x = \sqrt{\frac{\pi^n}{\det A_{ij}}} \exp \left(\frac{\mathbf{B}^T A_{ij}^{-1} \mathbf{B}}{4} \right),$$

Двухчастотная корреляционная функция отражения

$$\Gamma(\omega_I, \omega_{II}) \equiv <\tilde{E}_{\omega_I}^{(S)} E_{\omega_{II}}^{(S)}> = \quad (23)$$

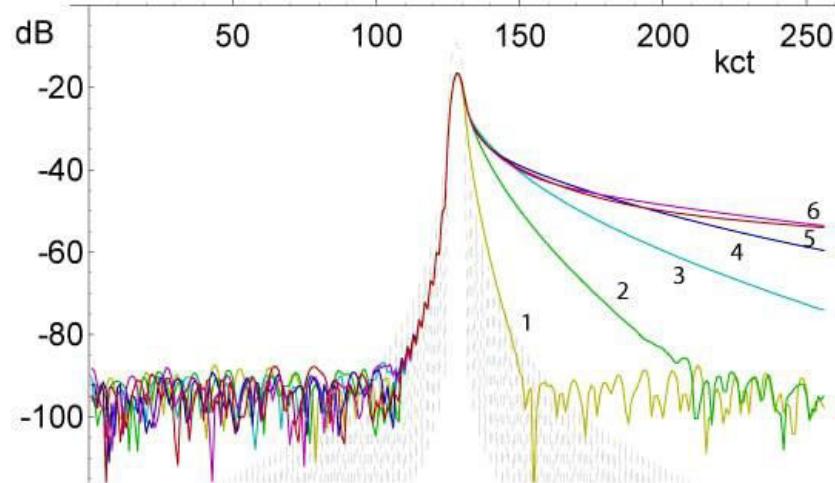
$$\frac{1}{\pi L^2} \int E_{\omega_I}^{(0)}(x_1, y_1) E_{\omega_{II}}^{(0)*}(x_3, y_4)$$

$$G(k_I, x_1, y_1, x_3, 0) G^*(k_{II}, x_2, y_3, x_4, 0)$$

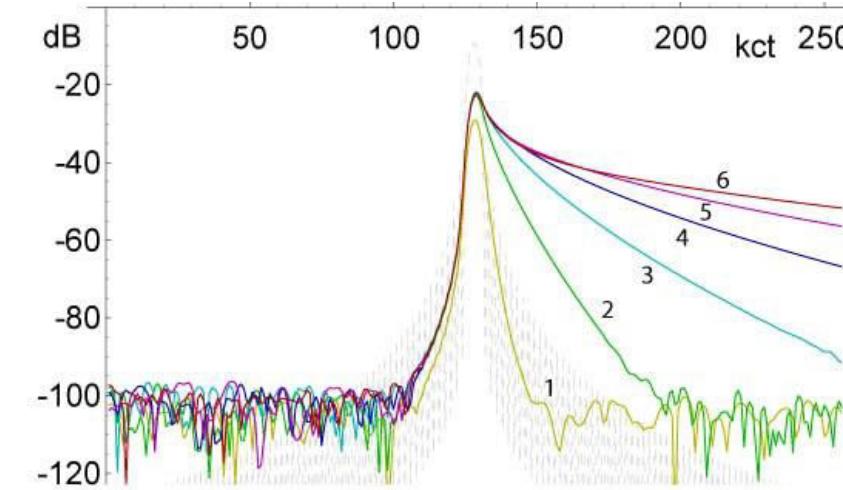
$$\exp\left(-\frac{x_3^2}{L^2} - \frac{x_4^2}{L^2}\right) \langle \exp(-2ik_I h(x_1, y_1) + 2ik_{II} h(x_2, y_2)) \rangle$$

$$dx_1 dx_2 dy_1 dy_2 dx_3 dx_4 .$$

Численное моделирование синтеза эхосигнала SAR



$$k_0l = 100, k_0h = 1, k_0z = 25000, \beta = 0.1$$



$$k_0l = 200, k_0h = 2, k_0z = 25000, \beta = 0.1$$

Радиолокационные отражения ЛЧМ-сигнала от случайного рельефа поверхности при различных гауссовых аппроксимациях экспоненциальной корреляционной функции (номер кривой соответствует значению M).



Заключение

PART 05

Заключение

- Разработан подход к расчёту отражающих свойств рельефа на основе суммы гауссовых функций.
- Проведены расчёты рассеяния и отражений ЛЧМ-сигналов для рельефа с экспоненциальной корреляцией высот.
- Метод применим к другим типам рельефа и задачам, включая расчёт отражений ограниченных пучков.



Спасибо за внимание!

