

РАДАРНАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ СНЕЖНЫХ ПОКРОВОВ: МОДЕЛЬ И ЭКСПЕРИМЕНТ

П.Н. Дагуров¹, А.И. Захаров², Т.Н. Чимитдоржиев¹, А.В. Дмитриев¹,
С.И. Добрынин³

¹*Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия*

²*Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, Россия*

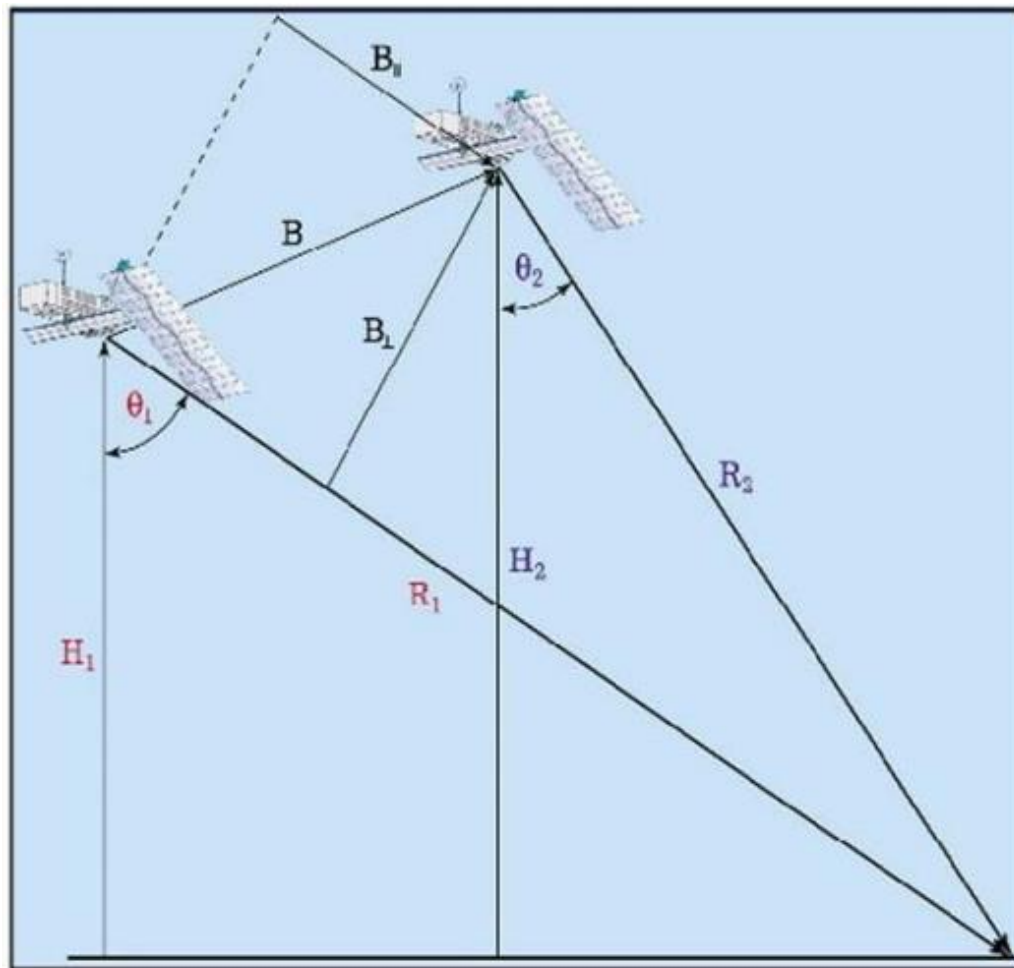
³*Бурятский институт инфокоммуникаций (филиал) СибГУТИ, Улан-Удэ,
Россия*

Москва - 2017

Мотивация и цель

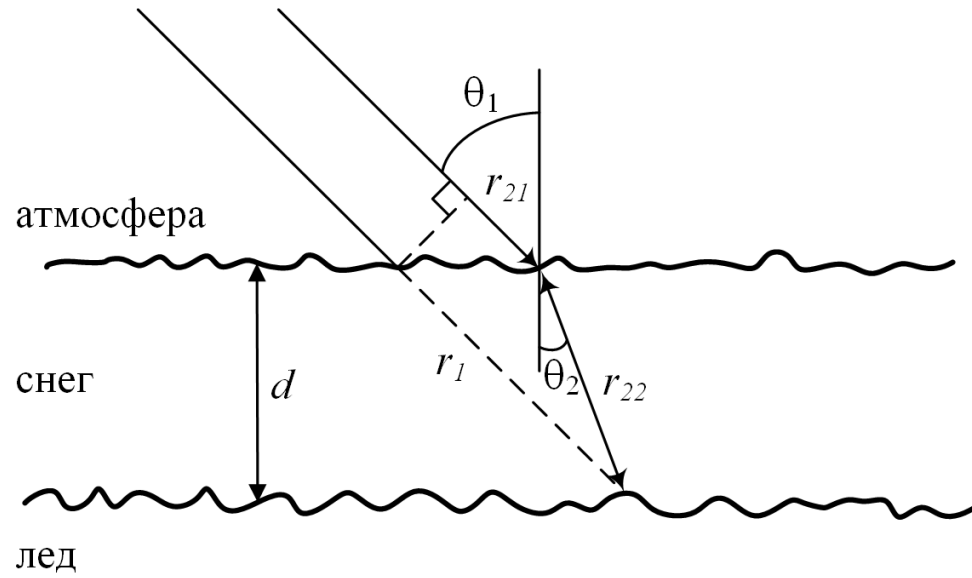
- Определение высоты снежного покрова - актуальная задача дистанционного зондирования
- В настоящее время отсутствует модель

Принцип радиолокационной интерферометрии

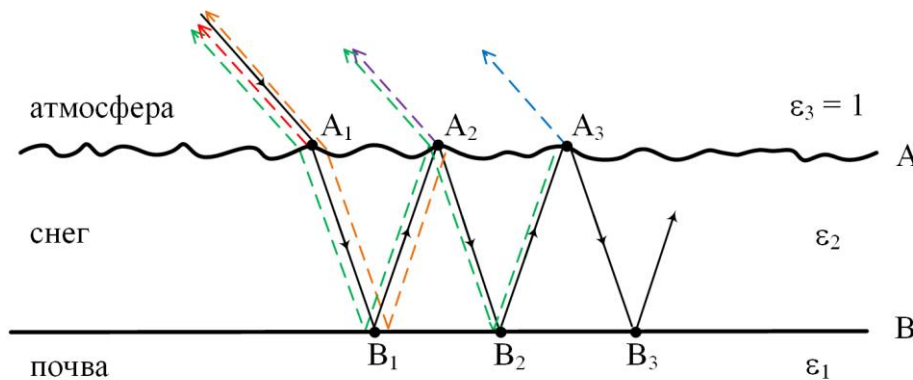


- Съёмка с близких и почти параллельных орбит
- Разность фаз полученных сигналов зависит от разности расстояний до цели $\Delta R = R_1 - R_2$
- Карта разности фаз - интерферограмма

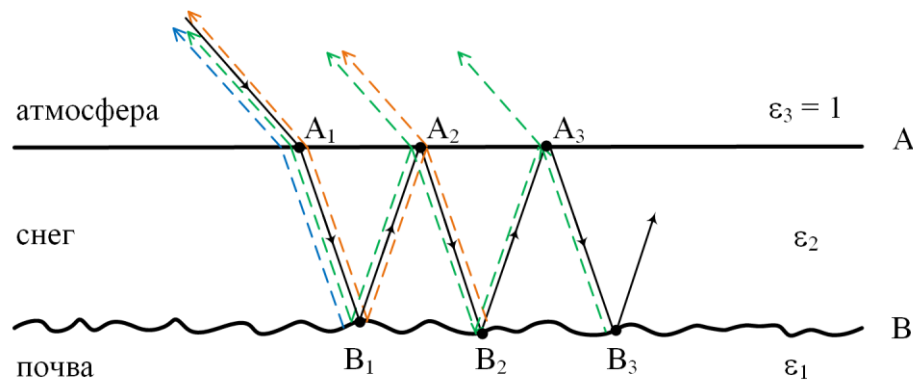
Геометрия задачи



Модель и лучевые картины рассеянных волн



Волны, рассеянные шероховатой поверхностью A



Волны, рассеянные шероховатой поверхностью B

Суммирование рассеянных волн

$$|E|e^{i\Phi} = |E_1|e^{i\Phi_1} + |E_2|e^{i\Phi_2}$$

$$E_s(A_1) = T_{32}T_{23}|E_s(B_1)|e^{i\varphi} + T_{32}T_{23}R_{21}^2R_{23}^2|E_s(B_2)|e^{i3\varphi} + \dots$$

$$\varphi = 2k\sqrt{\varepsilon_2}d / \cos\theta_2.$$

$$E_s(A_2) = T_{32}T_{23}R_{21}R_{23}|E_s(B_2)|e^{i(2\varphi+\psi)} + T_{32}T_{23}R_{21}^3R_{23}^3|E_s(B_3)|e^{i(4\varphi+\psi)} + \dots$$

$$\psi = 2kdtg\theta_2 \sin\theta_1$$

$$E_s(A_j) = T_{32}T_{23}R_{21}^{j-1}R_{23}^{j-1}|E_s(B_j)|e^{i[j\varphi+(j-1)\psi]} + T_{32}T_{23}R_{21}^{j+1}R_{23}^{j+1}|E_s(B_{j+1})|e^{i[(j+2)\varphi+(j-1)\psi]} + \dots$$

$$\langle |E_s(B_1)| \rangle = \langle |E_s(B_2)| \rangle = \langle |E_s(B_3)| \rangle \dots = \langle |E_s(B_j)| \rangle \dots = \langle |E_s(B)| \rangle$$

$$\langle |E_1| \rangle e^{i\Phi_1} = \frac{T_{32}T_{23}\langle |E_s(B)| \rangle e^{i\varphi}}{(1 - R_{21}R_{23}e^{i(\varphi+\psi)})(1 - R_{21}^2R_{23}^2e^{i2\varphi})}$$

$$\langle |E| \rangle e^{i\Phi} = \langle |E_s^0(A)| \rangle + \frac{T_{32}T_{23}e^{i\varphi} [\langle |E_s(B)| \rangle + R_{21}^2 \langle |E_s(A)| \rangle e^{i\varphi}]}{(1 - R_{21}R_{23}e^{i(\varphi+\psi)})(1 - R_{21}^2R_{23}^2e^{i2\varphi})} + \frac{T_{32}R_{21} \langle |E_s^t(A)| \rangle e^{i(\varphi+\psi)}}{(1 - R_{21}R_{23}e^{i(\varphi+\psi)})}$$

$$\sqrt{\sigma^0} e^{i\Delta\Phi} = \sqrt{\sigma^0(A)} e^{-i(\varphi_0+\psi)} + \frac{(1 - R_{23}^2) e^{i\Delta\varphi} [\sqrt{\sigma^0(B)} + R_{21}^2 \sqrt{\sigma_1^0(A)} e^{i\varphi}]}{(1 - R_{21}R_{23}e^{i(\varphi_1+\psi)})(1 - R_{21}^2R_{23}^2e^{i2\varphi})} + \frac{(1 - R_{23})R_{21} \sqrt{\sigma^t(A)} e^{i(\varphi-\varphi_0)}}{(1 - R_{21}R_{23}e^{i(\varphi+\psi)})}$$

Формулы метода малых возмущений

$$\sigma^0 = 8k^4 s^2 \cos^4 \theta |\alpha_p|^2 W(2k \sin \theta, 0) \quad W(2k \sin \theta, 0) = \frac{1}{2} l \exp[-(kl \sin \theta)^2]$$

$$\alpha_h = \frac{\varepsilon - 1}{(\cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta})^2} \quad \alpha_v = (\varepsilon - 1) \frac{(\varepsilon - 1) \sin^2 \theta + \varepsilon}{(\varepsilon \cos \theta + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta})^2}$$

$$\sigma_1^0(A) = 8(k^2 \sqrt{\varepsilon_2} s_A \cos \theta_1 \cos \theta_2)^2 |\alpha_{A,p}|^2 W(k \sin \theta_1 + k \sqrt{\varepsilon_2} \sin \theta_2, 0)$$

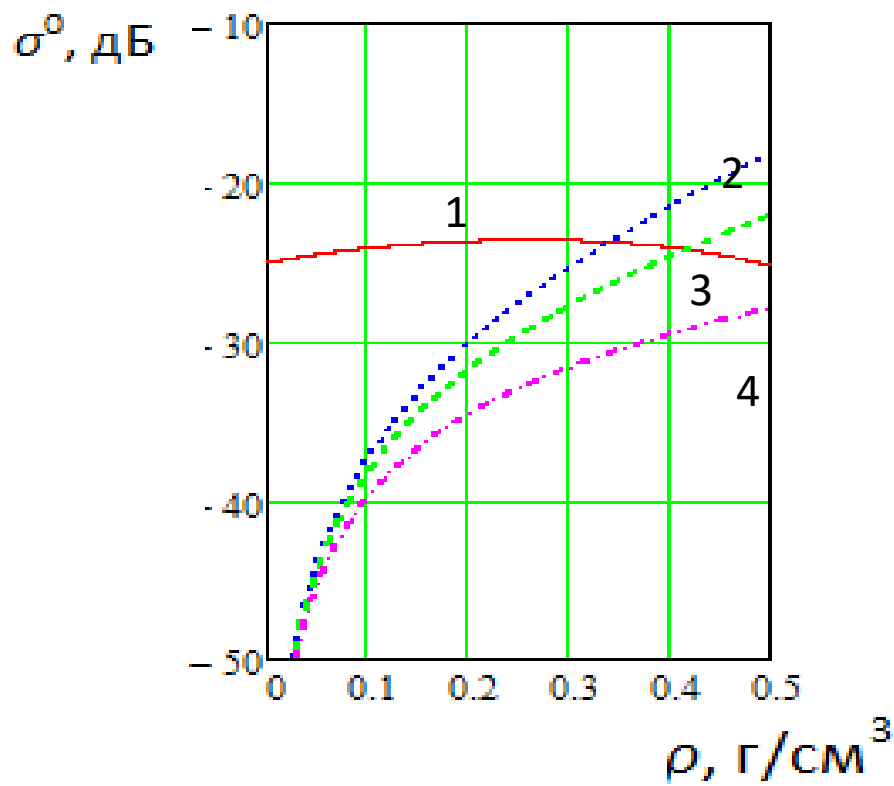
$$\alpha_{A,h} = \frac{(1/\varepsilon_2 - 1)}{(\sqrt{(1 - \sin^2 \theta_1/\varepsilon_2)} + \cos \theta_1/\sqrt{\varepsilon_2})(\cos \theta_2 + \sqrt{1/\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_2})^2}$$

$$\alpha_{A,v} = \frac{(1/\varepsilon_2 - 1) \sqrt{(1 - \sin^2 \theta_1/\varepsilon_2)} (1/\varepsilon_2 - \sin \theta_2)}{(\sqrt{(1 - \sin^2 \theta_1/\varepsilon_2)} + \cos \theta_1/\sqrt{\varepsilon_2})(\cos \theta_2/\varepsilon_2 + \sqrt{1/\varepsilon_2 - \sin^2 \theta_2})^2}$$

Электрические характеристики снега и мерзлой почвы

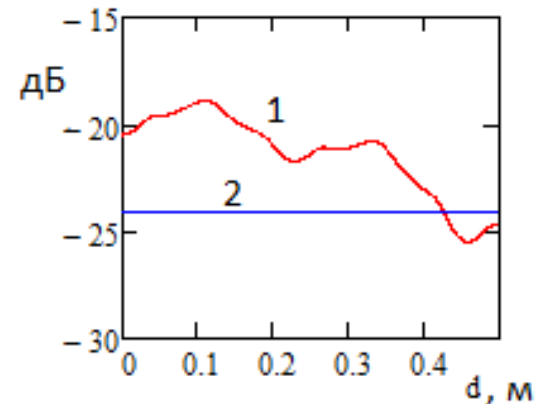
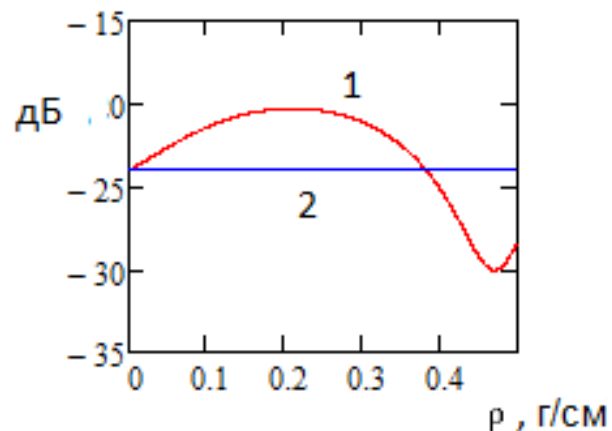
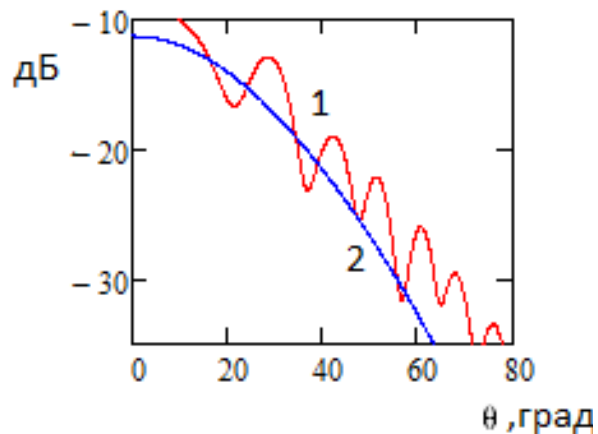
$$\varepsilon_{snow} = 1 + 1.6\rho + 1.86\rho^3 \quad \varepsilon_{soil} = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad \varepsilon' = 4 \quad \varepsilon'' = 0,2$$

Сравнение коэффициентов обратного рассеяния от снега
и почвы



1 - σ^0 (B), 2 - σ_1^0 (A), 3 - σ^t (Φ), 4 - σ^0 (A)

Результаты расчетов результирующего коэффициента обратного рассеяния



- 1 – результирующий коэффициент обратного рассеяния
2 – коэффициент рассеяния от земли в отсутствие снега
 $\lambda = 23$ см

Расчётные соотношения для интерферометрической фазы

Разность оптических путей волн обратного рассеяния в отсутствие снежного покрова и при его наличии

$$\Delta R = 2(\Delta R_a + \sqrt{\varepsilon} \Delta R_r) - 2\Delta R_s$$

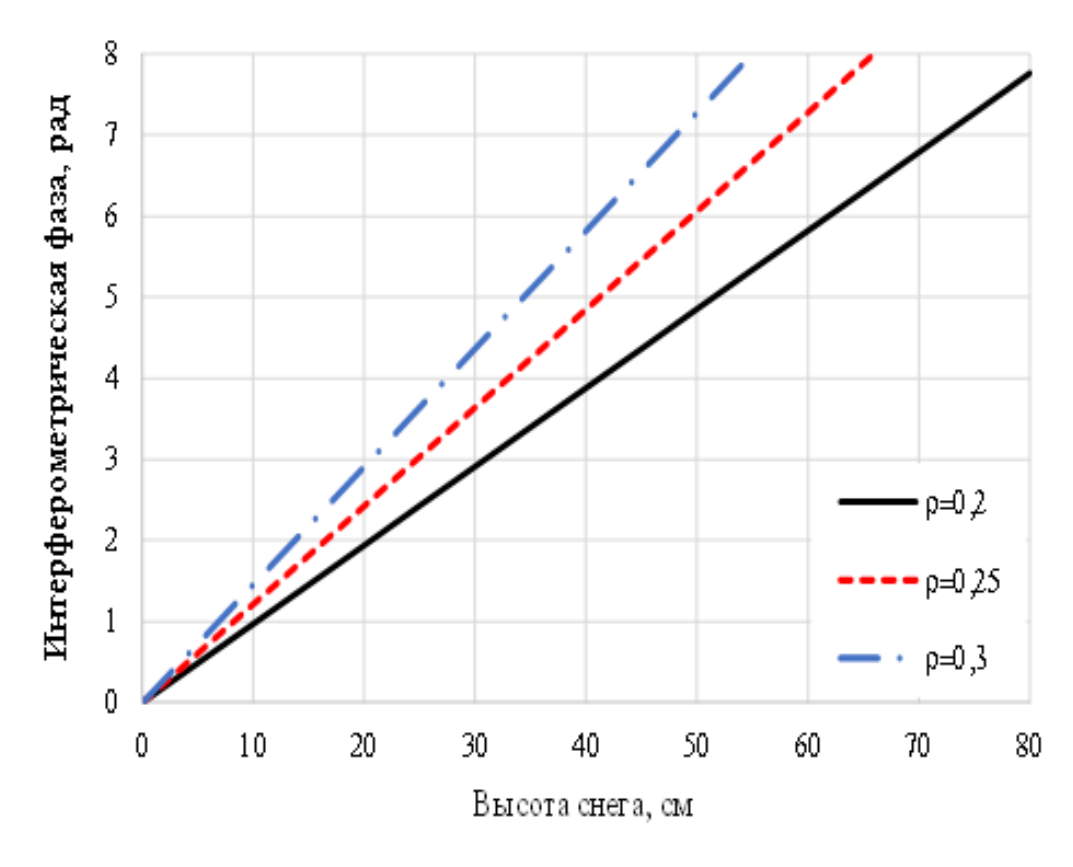
Разность фаз волн обратного рассеяния

$$\Delta\Phi = 2kd(\sqrt{\varepsilon_s - \sin^2 \theta_i} - \cos\theta_i).$$

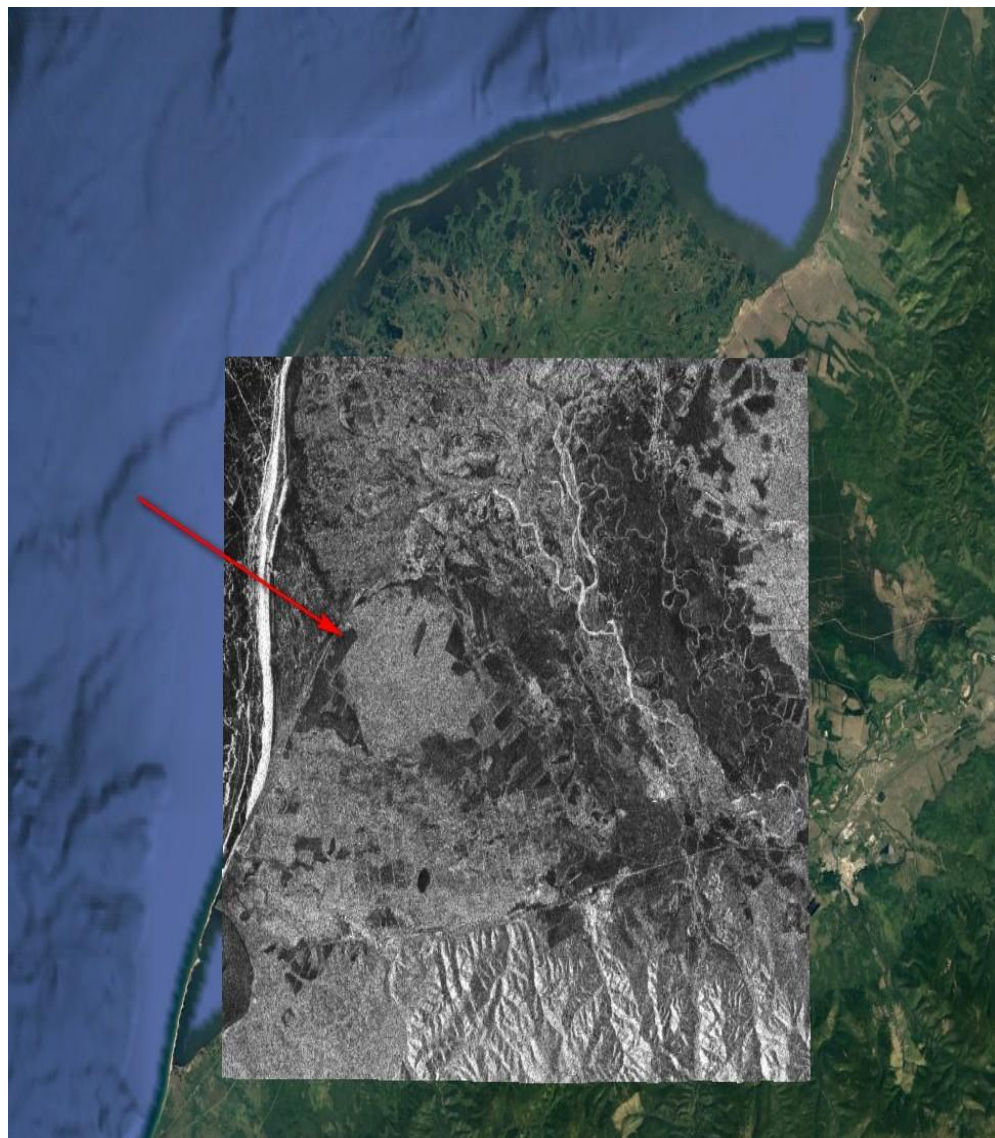
Связь между интерферометрической фазой и водным эквивалентом снега.

$$\Delta\Phi = \frac{1,6kd\rho}{\cos\theta_i} = \frac{1,6k}{\cos\theta_i} W \qquad W = 2,06\Delta\Phi$$

Зависимости интерферометрической фазы от высоты снега при различных значениях плотности снега ρ



Геокодированное амплитудное изображение тестового участка, совмещенное с изображением геопортала Google Earth.



Вид тестового участка без снежного покрова (а) и при наличии снежного покрова с установленным на нем угловым отражателем (б)

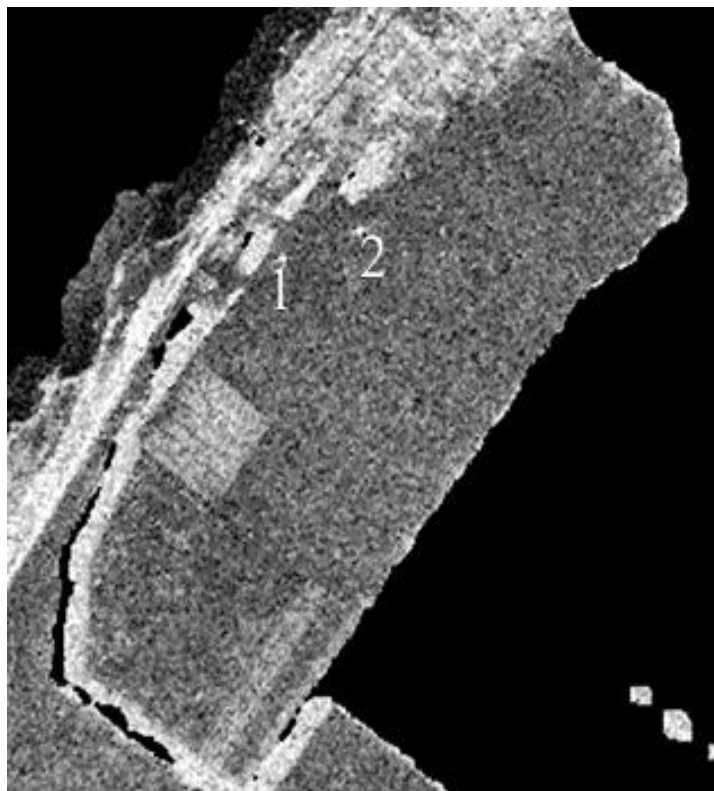


а)

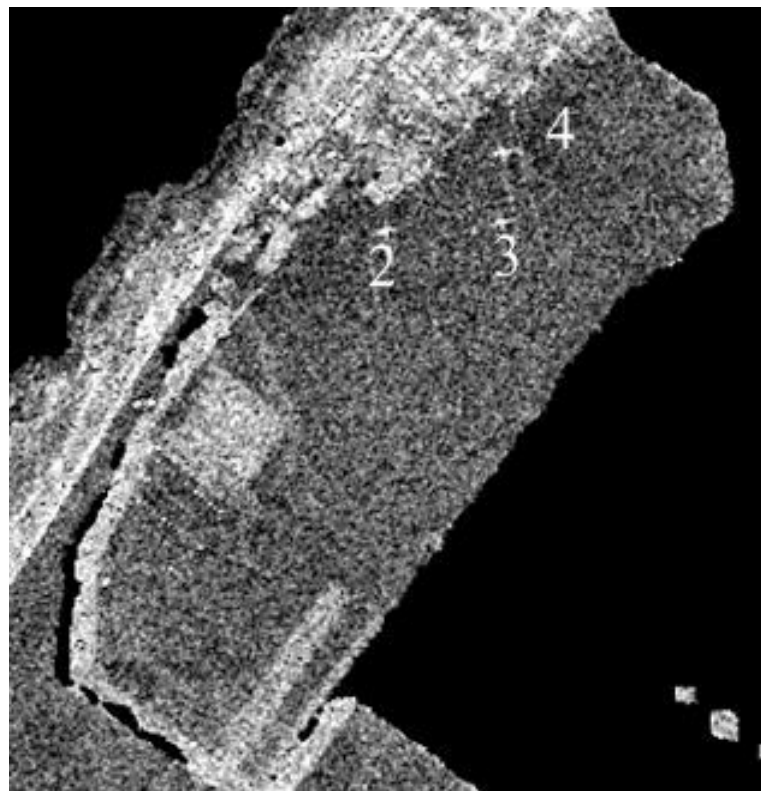


б)

Радиолокационные амплитудные изображения интерферометрической пары: а – 21 сентября 2016 г, б – 8 февраля 2017 г.

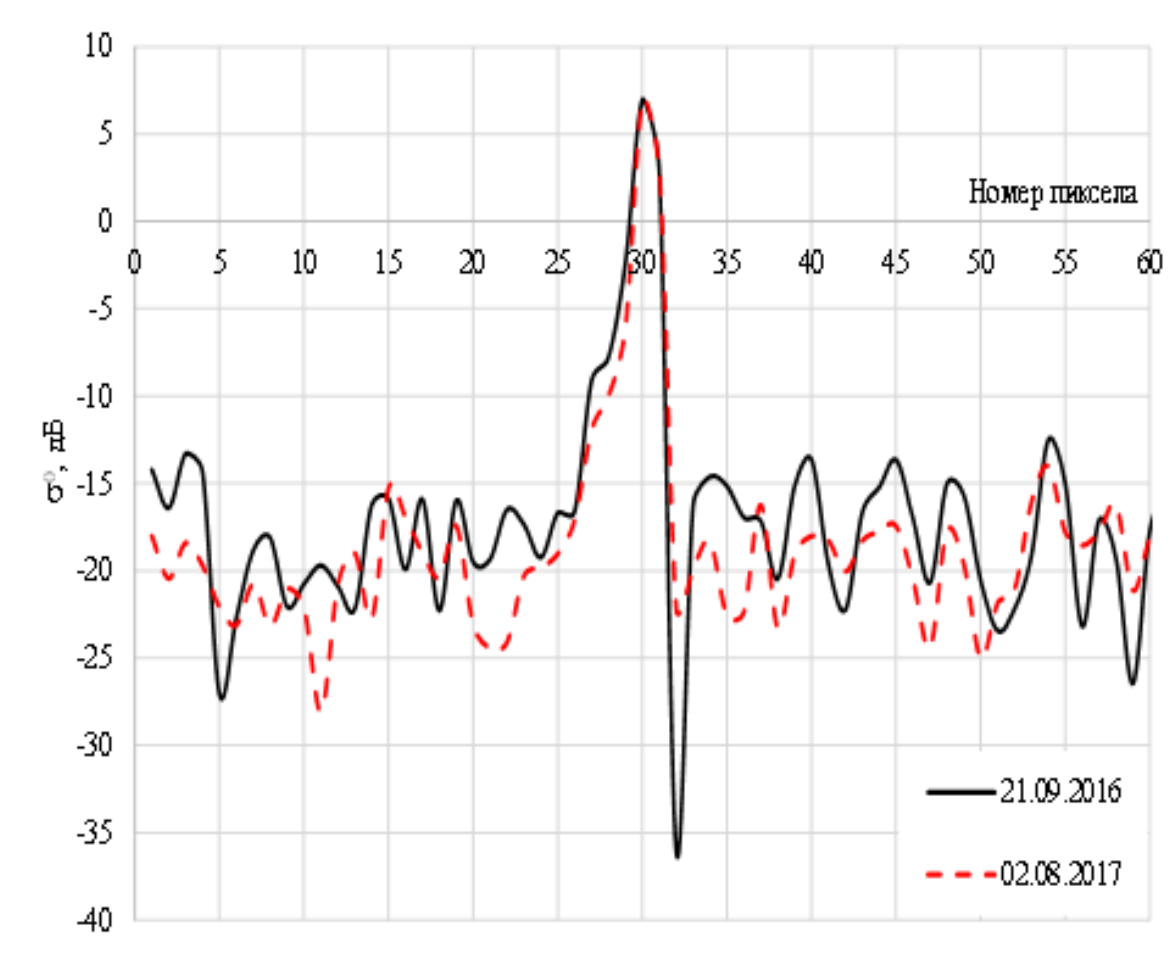


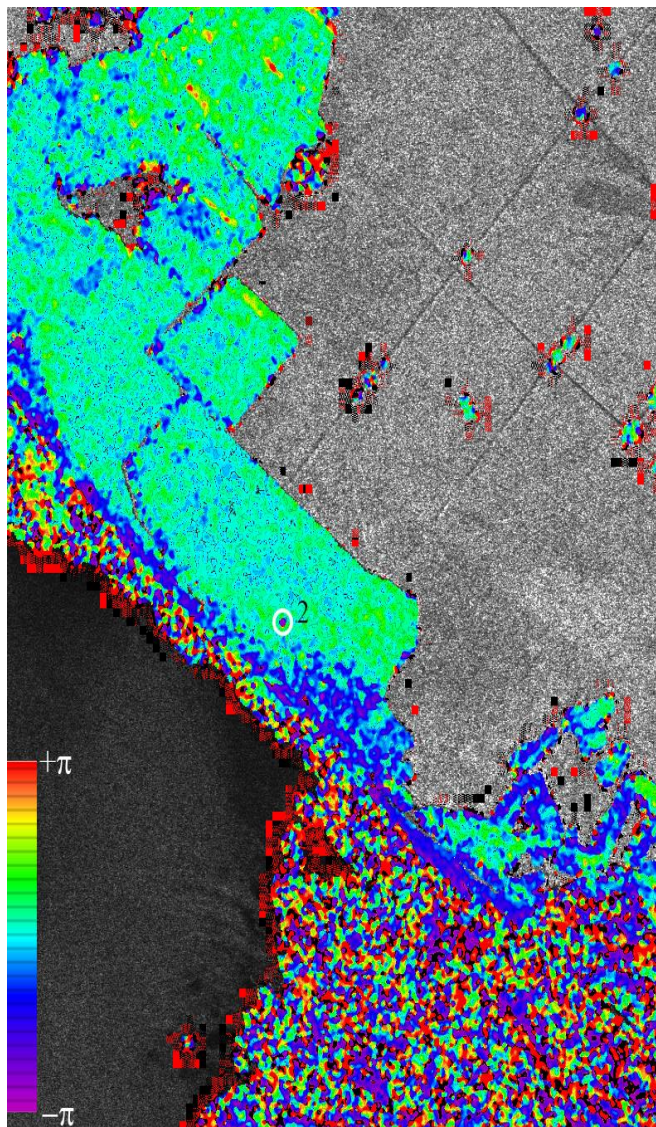
а)



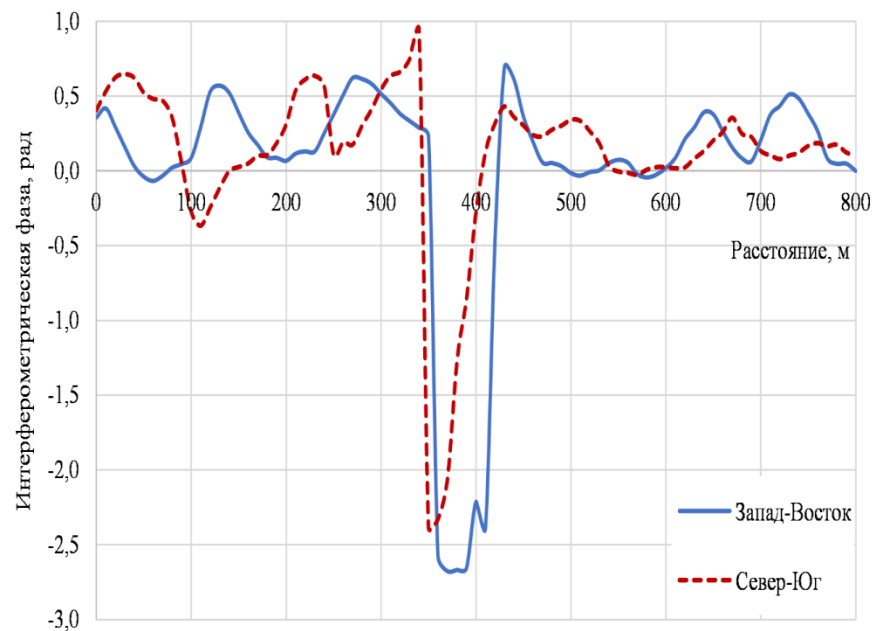
б)

Коэффициенты обратного рассеяния вдоль меридиональной линии, проходящей через точку 2.





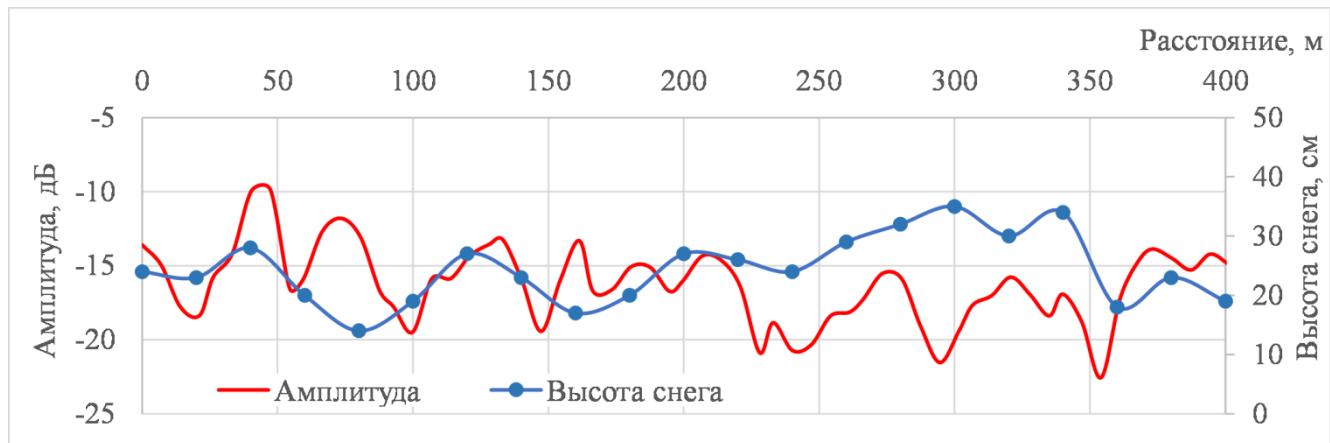
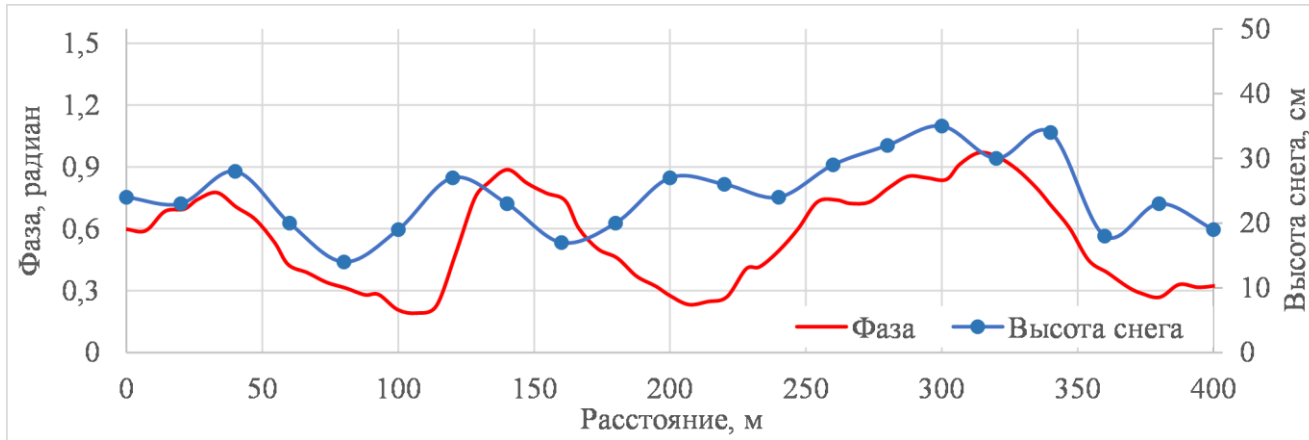
Композит интерферограммы и амплитудного изображения.



Интерферометрическая фаза вдоль линий «Север – Юг» и «Запад – Восток», проходящих через точку 2.

Полевые измерения высоты снега на тестовом участке показали, что высота снега составляет 20 – 30 см при плотности снега 0,2– 0,22 г/см³. Согласно теоретическим результатам эти значения соответствуют изменениям фазы 2 – 3,2 радиана, что хорошо согласуется с измеренными значениями.

Корреляционные зависимости



Коэффициенты корреляции: высота снега-фаза 0,587, высота снега-амплитуда -0,288

ВЫВОДЫ

1. Построена когерентная модель обратного рассеяния от снежного покрова на почве, позволяющая рассчитывать как амплитуду, так и фазу радиолокационного сигнала
2. Установлена возможность определения высоты и водного эквивалента снега методом спутниковой радиолокационной интерферометрии L-диапазона с использованием данных, полученных при двух съемках PCA ALOS PALSAR-2 в бесснежный период и при наличии снежного покрова.
3. В качестве эталонного рассеивателя, обратное рассеяние от которого не зависит от отсутствия и наличия снега, использовался уголкового отражатель.
4. Результаты измерений высоты снега методом дифференциальной интерферометрии и прямые измерения высоты снега на тестовом участке показали хорошее соответствие между спутниковыми и наземными измерениями.

Спасибо за внимание!