

*Тема доклада:*  
*«Оценка рельефа поверхности Земли однопозиционным РСА  
бокового обзора»*

Коллектив авторов «НИУ «МЭИ»:  
д.т.н. Бабокин М.И., к.т.н., доц. Шимкин П.Е.,  
н.с. Степин В.Г., вед. инж. Харлампьев К.С.

Докладчик:  
научный сотрудник  
Степин Виталий Григорьевич

г. Москва  
ноябрь 2025

**Цель работы** – обоснование возможности оценки рельефа поверхности Земли с помощью космического однопроходного РСА интерферометра, работающего в режиме бокового обзора.

**Особенности однопроходного РСА-интерферометра бокового обзора:**

- 1) парные сигналы с пространственным смещением формируются за один проход одним КА с одной РСА;
- 2) парные сигналы формируются за счёт естественного пролёта КА одновременно (задержка получения сигналов сопоставима с долей интервала синтезирования);
- 3) сброс информации на «землю» осуществляется парными сигналами одновременно и оперативно;
- 4) для повышенной точности оценивания местного рельефа или его подвижек формируется ряд парных сигналов за проход ( временные ряды с малым базовым параметром);
- 5) оценка рельефа местности в одном проходе минимизирует влияние временных и пространственных искажений среды распространения и ошибок навигационно-баллистического обеспечения;
- 6) простота реализации.

# Математическая модель наблюдения и алгоритм оценивания местного рельефа

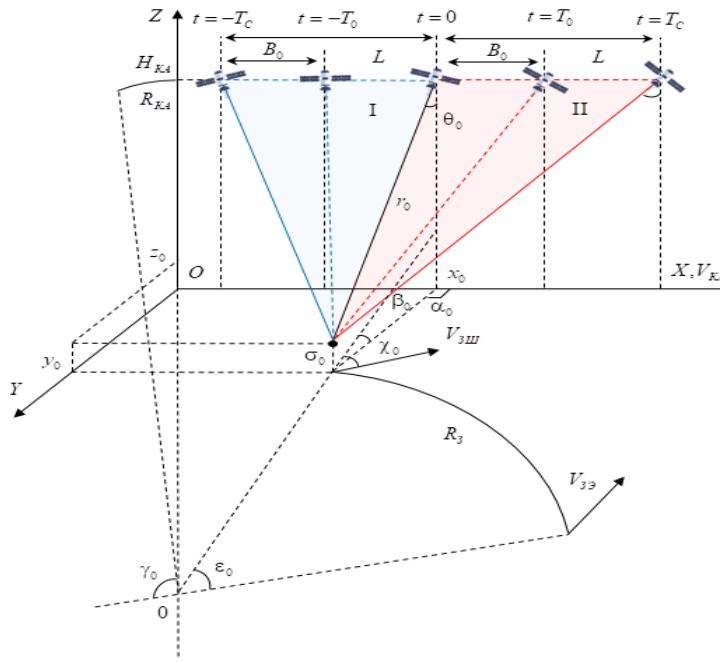


Рисунок 1. Геометрия визирования однопроходного РСА бокового обзора

Алгоритм оценивания местного рельефа:

$$\hat{z}_{mn} \approx \frac{\lambda R_3}{4\pi \sin \beta_0 \tan \theta_m V_{3e} \cos \chi_0 \cos \epsilon_0 T_0} \arg(\hat{e}_{mn}^0 \hat{e}_{mn}^{*1}) \quad (1)$$

где  $m, n$  – номер элемента разрешения по дальности и азимуту соответственно;  $\lambda$  – длина волны;  $R_3 \approx 6371$  – радиус Земли на широте объекта наблюдения;  $\beta_0$  – угол скольжения в начальный момент времени;  $\theta_m$  – угол падения до центра  $m$ -ой полоски дальности на земной поверхности;  $V_{3e}$  – скорость вращения Земли на экваторе;  $\chi_0$  – угол между вектором движения земной поверхности и проекцией направления визирования РСА;  $\epsilon_0$  – широта объекта наблюдения в начальный момент времени;  $T_0$  – время между сеансами;  $\hat{e}_{mn}^0, \hat{e}_{mn}^1$  – комплексные РЛИ, полученные в первом и втором сеансах наблюдения.

## Потенциальная точность оценивания относительного рельефа

Потенциальная точность оценивания относительного рельефа – минимальное значение среднеквадратичной ошибки:

$$\sigma_m^z \approx \frac{\lambda R_3}{\sqrt{qn_H} 4\pi T_0 V_3 \cos \beta_0} = \frac{\Delta x V_{KA} R_3}{\sqrt{qn_H} \pi r_m V_3 \cos \beta_0} \quad (2)$$

где  $q = 2T_C |\hat{e}_{mn}|^2 / N_0$  – отношение сигнал/шум (ОСШ);  $n_H$  – кратность некогерентного накопления (размер двумерного окна фильтрации) по дальности и азимуту;  $T_0 = T_C / 2 = \lambda r_m / (4V_{KA} \Delta x)$  – в предельном случае;  $\Delta x$  – величина разрешающей способности по азимуту;  $r_m$  – дальность от ФЦА до точки исследуемого участка.

При подстановке следующих параметров:  $V_{KA} \approx 7$  км/с,  $\beta_0 \approx 40^\circ$ ,  $n_H = 100$ , при  $V_3 = 200$  м/с – серия сплошных линий, при  $V_3 = 170$  м/с – серия штриховых линий отобразим зависимость  $\sigma$  от  $\theta$  (рисунок 2).

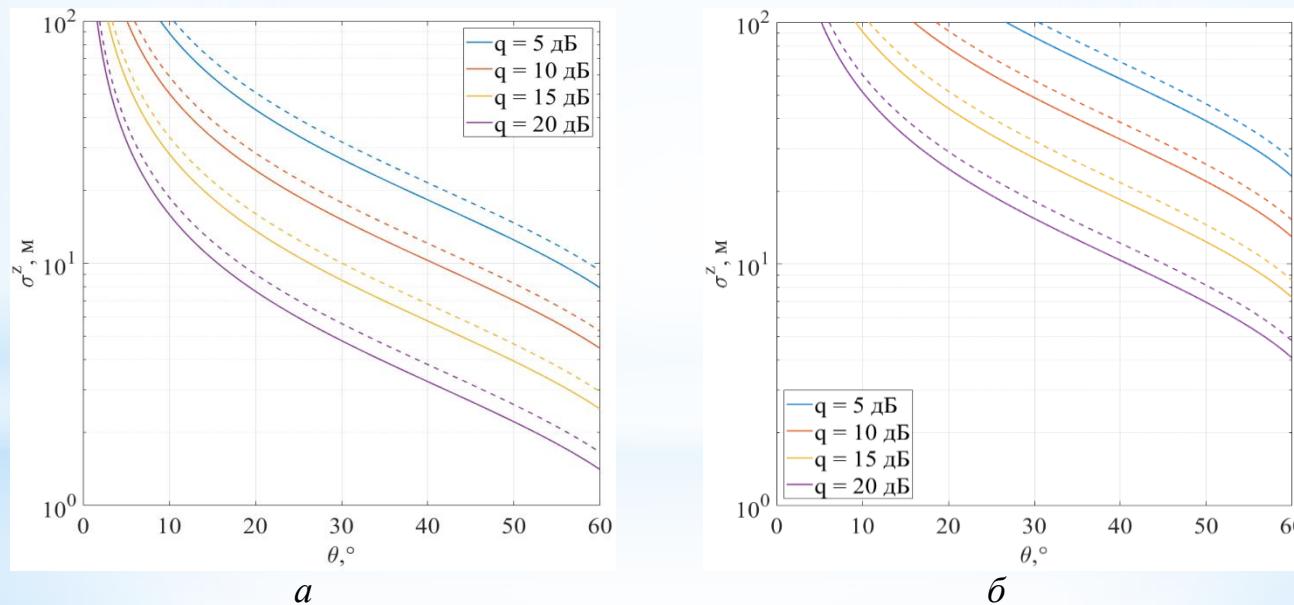


Рисунок 2. Потенциальная точность оценки рельефа земной поверхности:

a) –  $H_{KA} \approx 512$  км,  $\Delta x \approx 2$  м,  $\lambda \approx 9$  см; б) –  $H_{KA} \approx 758$  км,  $\Delta x \approx 10$  м,  $\lambda \approx 6$  см

## *Оценка относительного рельефа при мультивременной съёмке*

Алгоритм оценивания относительного рельефа при фазовой коррекции нескольких интерферометрических измерений ( $k=0 \dots K-1$ ):

$$\hat{z}_{mn}^k \approx \left( \frac{\lambda R_3}{4\pi B_0 \sin \theta_m \sin \alpha_k} \right) \arg \left[ \hat{e}_{mn}^k \hat{e}_{mn}^{k-1} \exp \left( j\Delta\hat{\phi}_{mn}^k \right) \right]; \quad (3)$$

где  $\alpha_k = \arcsin \left[ (k\Delta B) / (r_m^k \sin \theta_m) \right]$  – угол отклонения синтезированного луча от нормали к линии пути при смещении базы  $\Delta B \geq B_0$ ;  $\Delta\hat{\phi}_{mn}^k \approx \hat{z}_{mn}^{k-1} 4\pi B k \Delta B / (\lambda R_3 r_m^k)$ , – оценка текущего (на  $k$ -ый цикл) корректирующего фазового набега;  $\hat{z}_{mn}^{k-1}$  – предыдущая (на  $k-1$ -ый цикл) оценка рельефа поверхности Земли.

## Экспериментальная проверка работоспособности

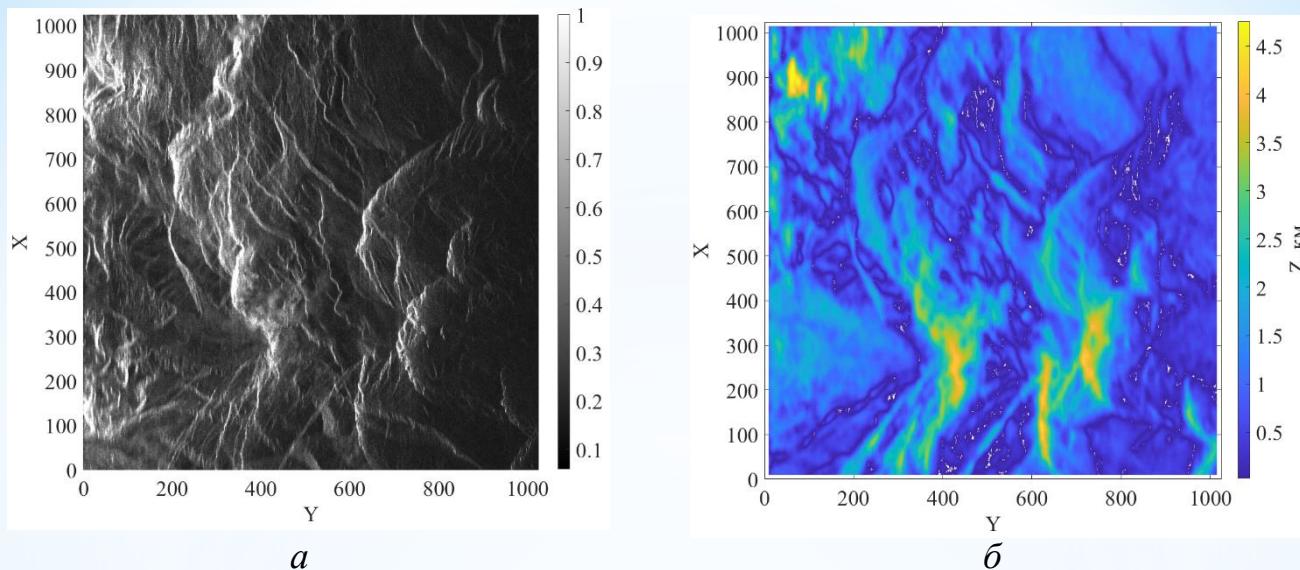


Рисунок 3. Район Ключевской Сопки: а – кадр РЛИ, б – оценка рельефа в кадре РЛИ

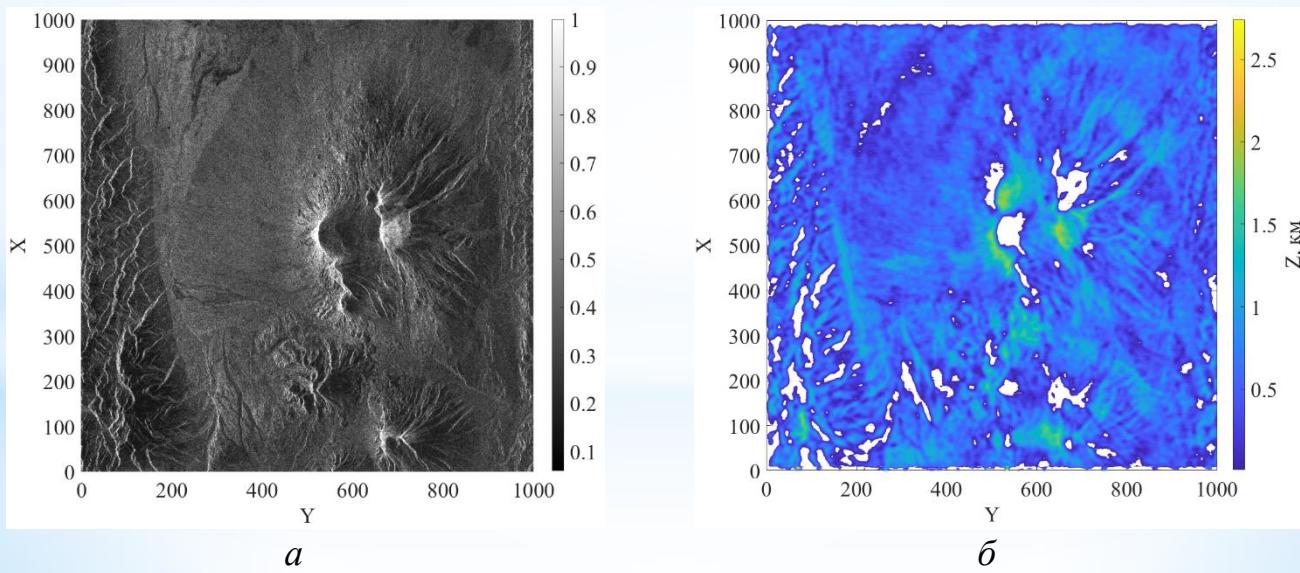


Рисунок 4. Район Авачинской Сопки: а – кадр РЛИ, б – оценка рельефа в кадре РЛИ

## *Выходы*

Представленные экспериментальные результаты показали возможность получения оценки рельефа поверхности Земли близкую к потенциальной по точности, применяя однопозиционный РСА бокового обзора в сочетании и использованием мультивременных рядов с малым базовым параметром при организации однопроходного интерферометра.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00507.

**БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!**