

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 синтеза);
- 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.

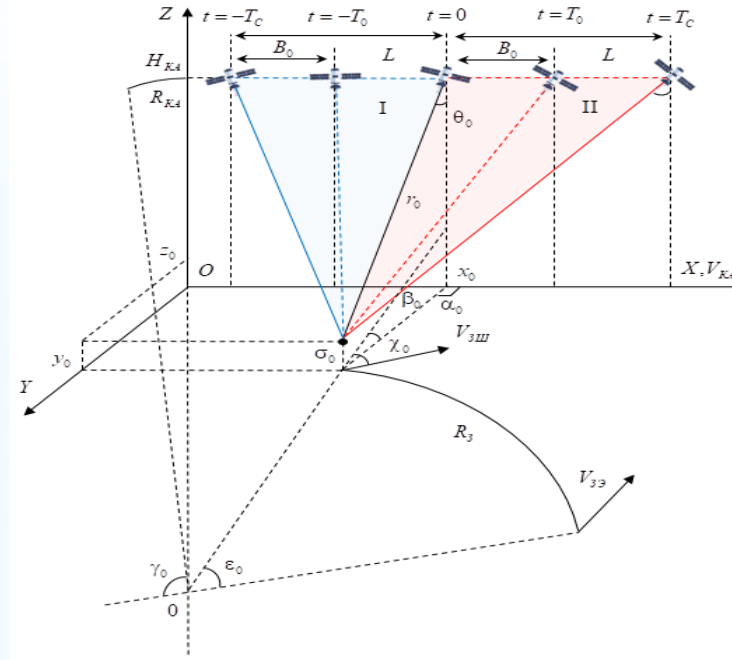


Рисунок 1. Геометрия визирования однократного РСА бокового обзора

Алгоритм оценивания местного рельефа:

$$\hat{z}_{mn} \approx \frac{\lambda R_3}{4\pi \sin \beta_0 \tan \theta_m V_{3z} \cos \chi_0 \cos \varepsilon_0 T_0} \arg(\hat{e}_{mn}^0 \hat{e}_{mn}^{*1}) \quad (1)$$

где m, n – номер элемента разрешения по дальности и азимуту соответственно; λ – длина волны; $R_3 \approx 6371$ – радиус Земли на широте объекта наблюдения; β_0 – угол скольжения в начальный момент времени; θ_m – угол падения до центра m -ой полосы дальности на земной поверхности; V_{3z} – скорость вращения Земли на экваторе; χ_0 – угол между вектором движения земной поверхности и проекцией направления визирования РСА; ε_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 $q = 2T_C |\hat{e}_{mm}|^2 / N_0$ – 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; Δx – 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 σ от θ (рисунок 2).

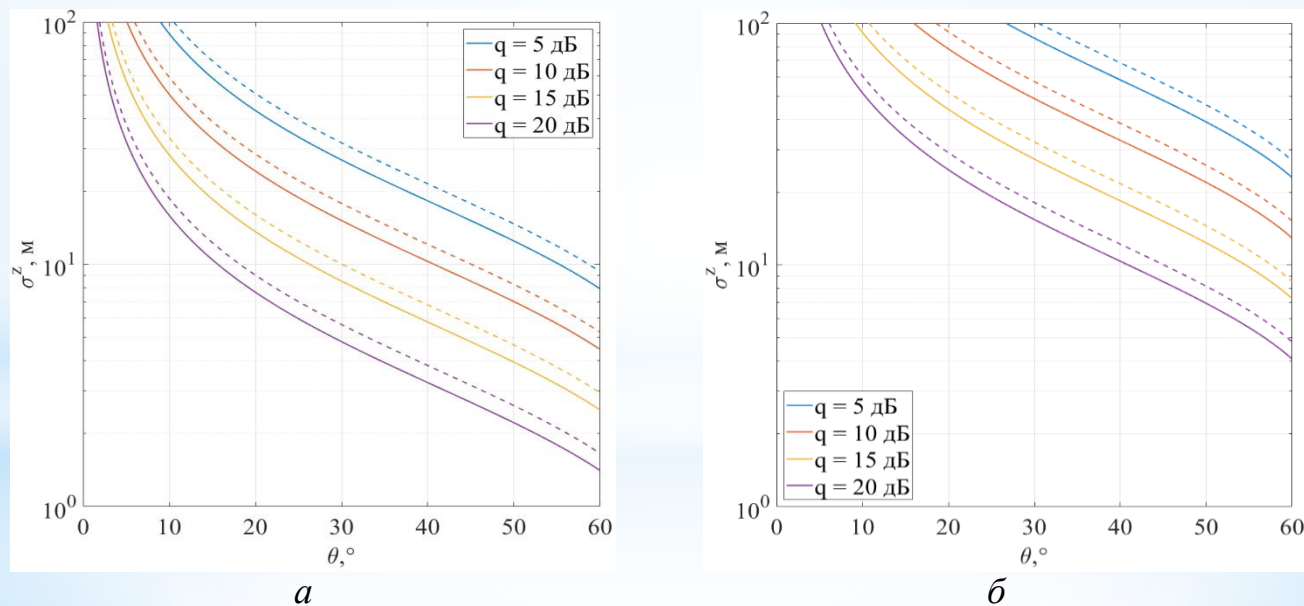


Рисунок 2. Потенциальная точность оценки рельефа земной поверхности:

а) – $H_{KA} \approx 512$ 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 мультिवременной съёмке

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

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

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

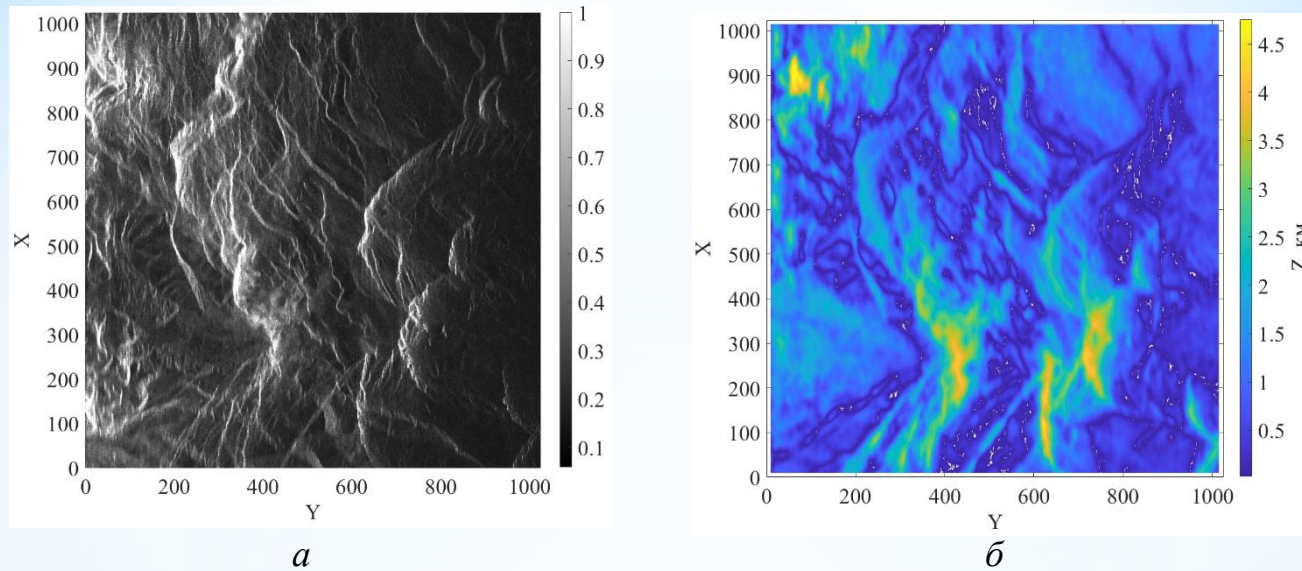


Рисунок 3. Район Ключевской Сопки: а – кадр РЛИ, б – оценка рельефа в кадре РЛИ

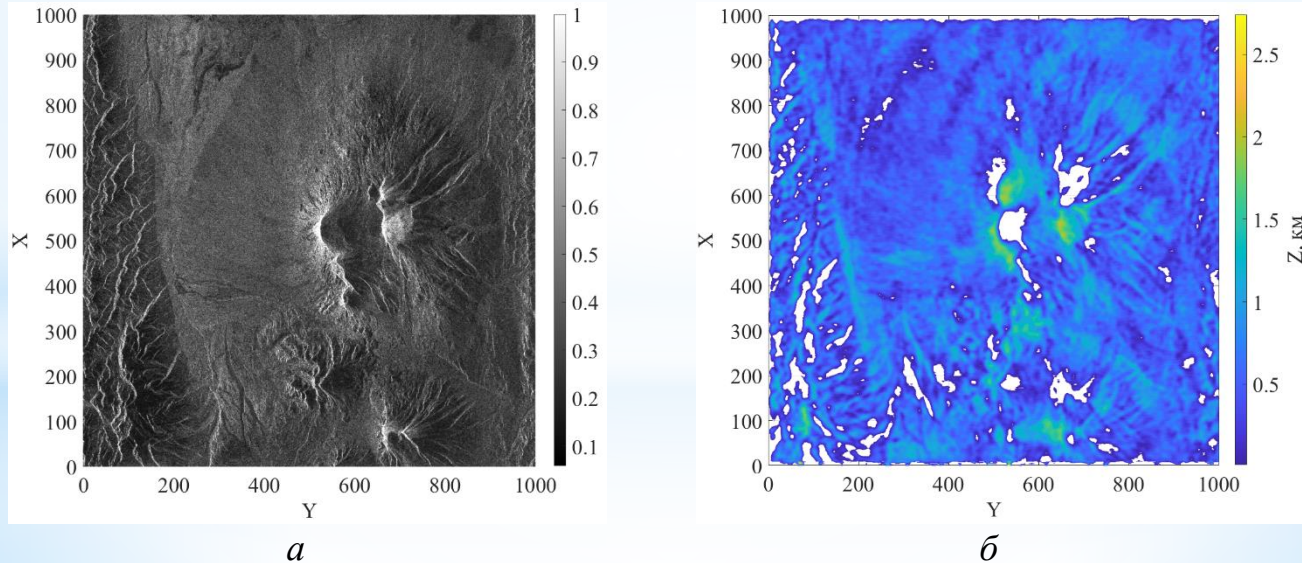


Рисунок 4. Район Авачинской Сопки: а – кадр РЛИ, б – оценка рельефа в кадре РЛИ

Выводы

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!