

Тема доклада:

***«Мультивременное интерферометрическое измерение
смещений 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 возможностей дифференциальных интерферометрических комплексов РСА для обнаружения и оценки вертикальных смещений поверхности Земли на базе космического многопроходного однопозиционного ИРСА, работающего в режиме бокового мультивременного обзора, потенциально обладающего относительно высокой детальностью, точностью, оперативностью получения информации и простотой реализации.

Способы применения многопроходного РСА-интерферометра с одним КА для получения дифференциальных оценок рельефа поверхности Земли:

- 1) за счёт пролёта мимо объекта исследования при отклонённом луче антенны в сторону от нормали к линии пути (скошенный обзор);
- 2) за счёт пролёта по орбите мимо объекта исследования при боковом обзоре, когда фазоразностные измерения происходят за счёт относительного движения земной поверхности.

Геометрическая модель наблюдения и алгоритм оценки вертикальных смещений земной поверхности

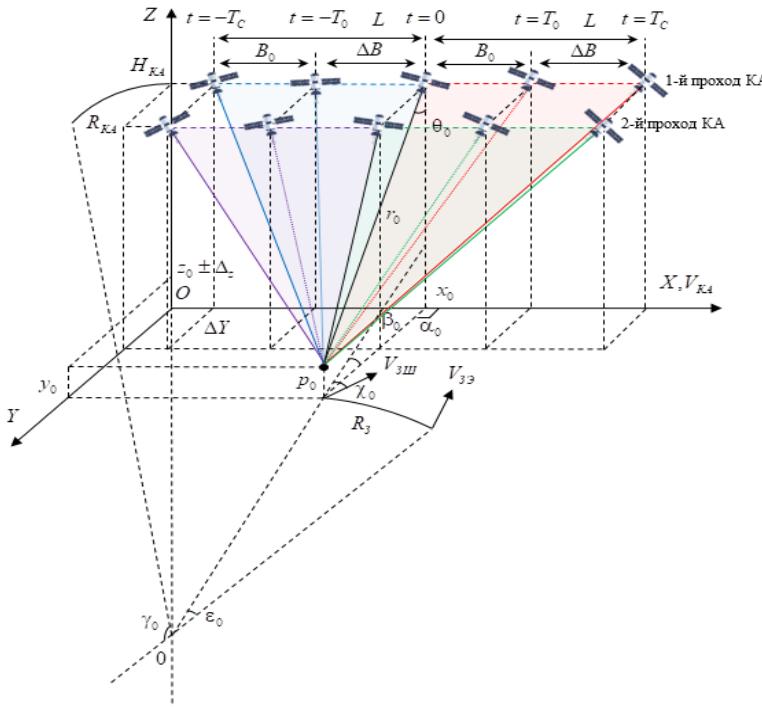


Рисунок 1. Геометрия визирования ДИРСА бокового обзора

Алгоритм оценивания вертикальных смещений земной поверхности:

$$\hat{\Delta}_{mn}^k = \frac{\lambda \sin \theta_m}{4\pi \cos(\theta_m + \beta_0)} \arg \left(\hat{d}_{mn}^{k-1} \hat{d}_{mn}^{*k} \right), \quad \hat{d}_{mn}^{k-1} = \hat{e}_{mn}^{k-1,0} \hat{e}_{mn}^{*k-1,1}, \quad \hat{d}_{mn}^k = \hat{e}_{mn}^{k,0} \hat{e}_{mn}^{*k,1} \quad (1)$$

где m, n – номер элемента разрешения по дальности и азимуту соответственно; λ – длина волны; θ_m – угол падения до центра m -ой полоски дальности на земной поверхности; β_0 – угол скольжения в начальный момент времени; \hat{d}_{mn}^{k-1} , \hat{d}_{mn}^k – две комплексные оценки, полученные ДИРСА в двух смежных проходах одного КА; $\hat{e}_{mn}^{k-1,0}$, $\hat{e}_{mn}^{k-1,1}$, $\hat{e}_{mn}^{k,0}$, $\hat{e}_{mn}^{k,1}$ – комплексные оценки РЛР, полученные РСА интерферометром в двух смежных сеансах наблюдения k и $(k-1)$ -го прохода КА.

Оценка вертикального смещения земной поверхности получается в результате следующих комплексных сопряжений:

- 1) комплексное сопряжение приведённых к одному моменту времени оценок двух сеансов наблюдения первого прохода, в результате чего устраняется фаза переотражения элемента разрешения, среды распространения и набега фазы движения относительно ровной поверхности;
- 2) комплексное сопряжение приведённых к одному моменту времени оценок двух сеансов наблюдения второго прохода, в результате чего устраняется фаза переотражения элемента разрешения, среды распространения и набега фазы движения относительно ровной поверхности;
- 3) комплексное сопряжение результатов первого и второго комплексного сопряжения, в результате чего остаётся разностно-фазовая информация, связанная с величиной вертикальных смещений поверхности Земли.

Потенциальная точность оценки смещений земной поверхности

Потенциальная точность оценивания смещений земной поверхности – минимальное значение среднеквадратичной ошибки:

$$\sigma^\Delta \approx \frac{\lambda \sin \theta_0}{8\pi \cos(\theta_0 + \beta_0)} \sqrt{\frac{1}{q} + \frac{(1 - \Delta r_e) \Delta y}{\Delta y - \delta y}}; \Delta r_e \approx \frac{\sin a_y}{a_y}; a_y = \frac{2\pi\Delta Y(\Delta y - \delta y)}{\lambda r_0} \quad (2)$$

где σ^Δ – СКО оценки смещений поверхности Земли в ДИРСА; q – отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе системы обработки сигналов РСА; Δr_e – коэффициент корреляции дифференциальных парных сигналов в ДИРСА; δy – ошибка относительного позиционирования по земной дальности в смежных проходах.

При подстановке следующих параметров: $H_{KA} \approx 512$ км, $\beta_0 \approx 40^\circ$, $\Delta y \approx 5$ м, $\lambda \approx 9$ см и различных значений ОСШ отобразим зависимость σ от угла падения θ (рисунок 2).

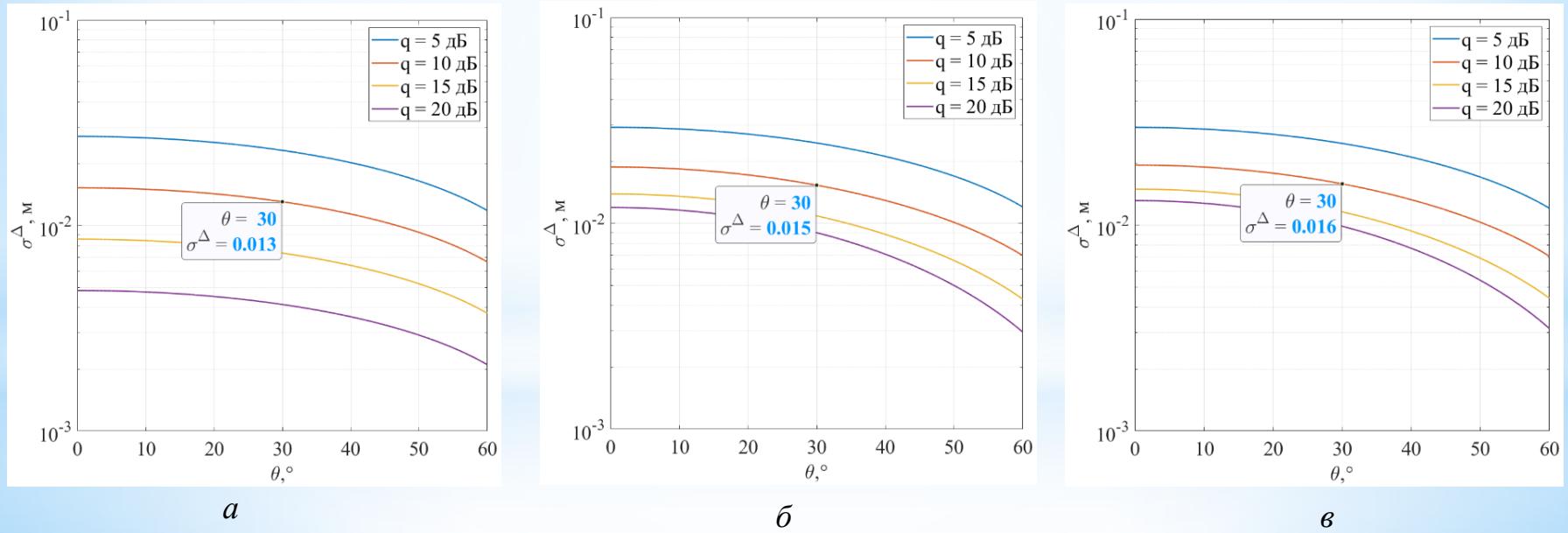


Рисунок 2. Потенциальная точность оценки смещений земной поверхности:

а) – $\Delta Y = \delta y = 0$ м; б) – $\Delta Y = 1$ км и $\delta y = 0$ м ; в) – $\Delta Y = 1$ км и $\delta y = 0,5$ м

Экспериментальная проверка работоспособности

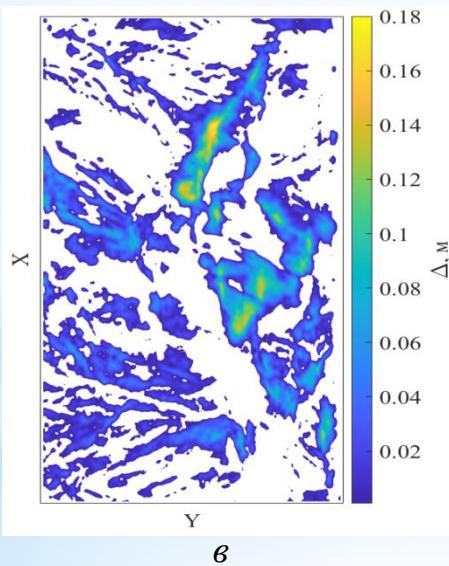
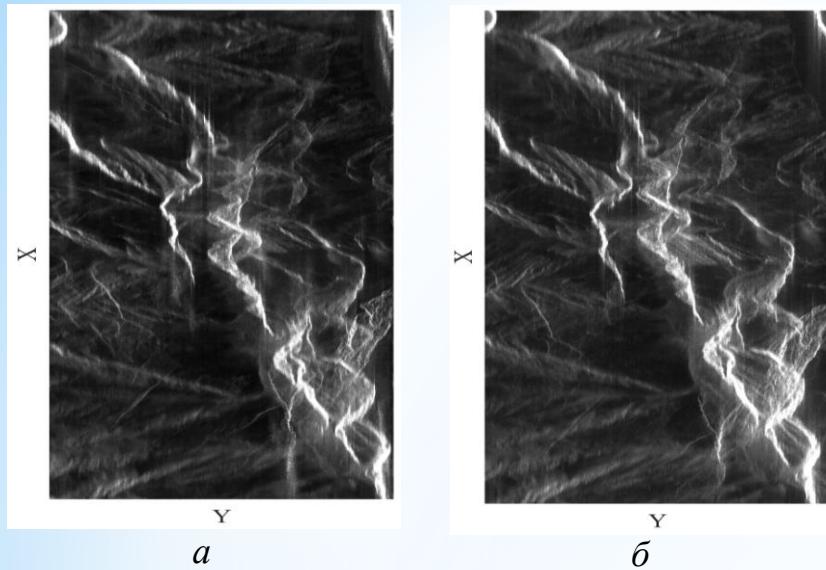


Рисунок 3. Результаты обработки реальных радиоголографм: а – кадр РЛИ от 04.04.2017 г.; б – РЛИ от 20.04.2017 г.; в – оценка вертикальных смещений в кадре РЛИ

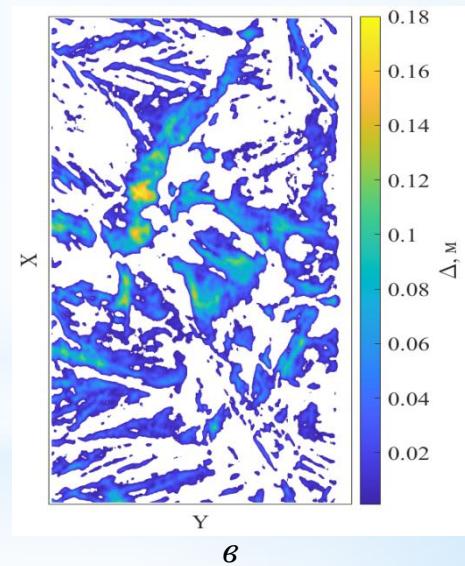
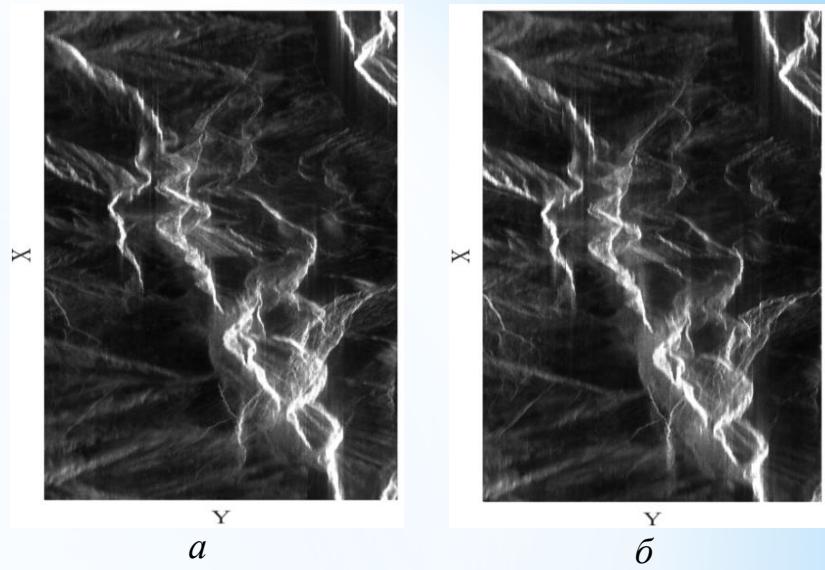


Рисунок 4. Результаты обработки реальных радиоголографм: а – кадр РЛИ от 14.05.2017 г.; б – РЛИ от 30.05.2017 г.; в – оценка вертикальных смещений в кадре РЛИ

Выходы

- Обоснована модель сигнала многопроходного однопозиционного РСА интерферометра бокового обзора при движении Земли.
- Обосновано применение алгоритмов комплексной обработки интерферометрических измерений парных мультивременных сигналов и оценена точность измерения подвижек земной поверхности.
- Представленные экспериментальные результаты показали возможность получения оценки смещений поверхности Земли близкую к потенциальной по точности, применяя однопозиционный ДИРСА бокового обзора в сочетании с реализацией мультивременного наблюдения в многопроходной схеме.

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

БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!