

***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

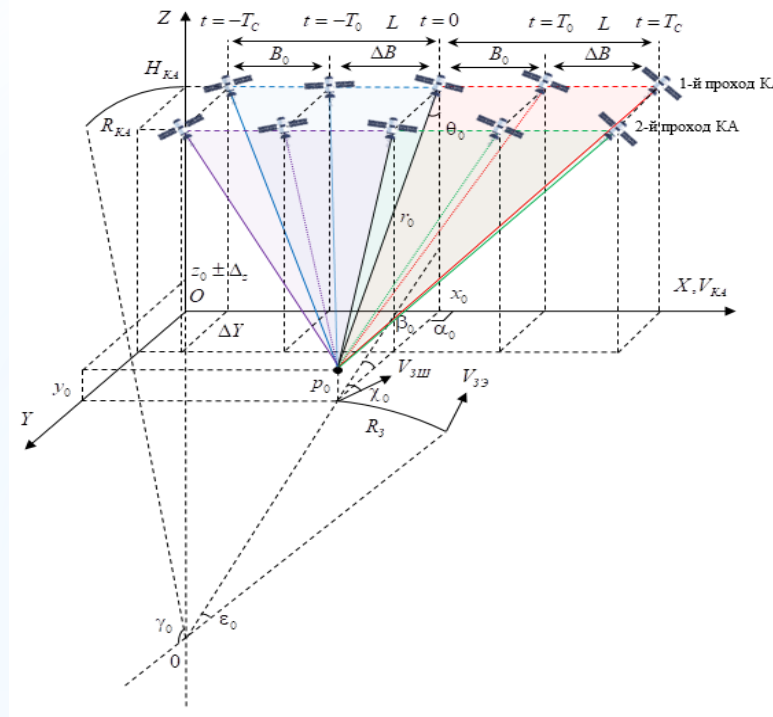


Рисунок 1. Геометрия визирования ДИРСА бокового обзора

Алгоритм оценивания вертикальных смещений земной поверхности:

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

где  $m, n$  – номер элемента разрешения по дальности и азимуту соответственно;  $\lambda$  – длина волны;  $\theta_m$  – угол падения до центра  $m$ -ой полосы дальности на земной поверхности;  $\beta_0$  – 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:

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

где  $\sigma^{\Delta}$  – СКО оценки смещений поверхности Земли в ДИРСА;  $q$  – отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе системы обработки сигналов РСА;  $\Delta r_e$  – коэффициент корреляции дифференциальных парных сигналов в ДИРСА;  $\partial y$  – 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  $\sigma$  от угла падения  $\theta$  (рисунок 2).

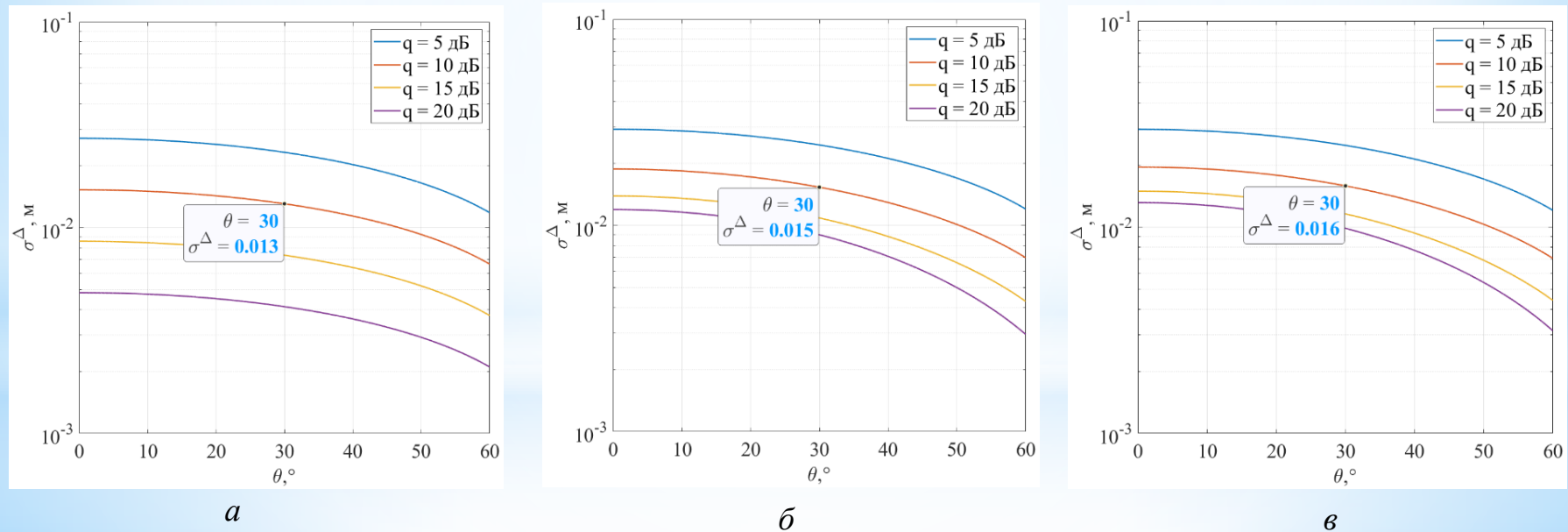


Рисунок 2. Потенциальная точность оценки смещений земной поверхности:

а) –  $\Delta Y = \partial y = 0$  м; б) –  $\Delta Y = 1$  км и  $\partial y = 0$  м ; в) –  $\Delta Y = 1$  км и  $\partial y = 0.5$  м



## Экспериментальная проверка работоспособности

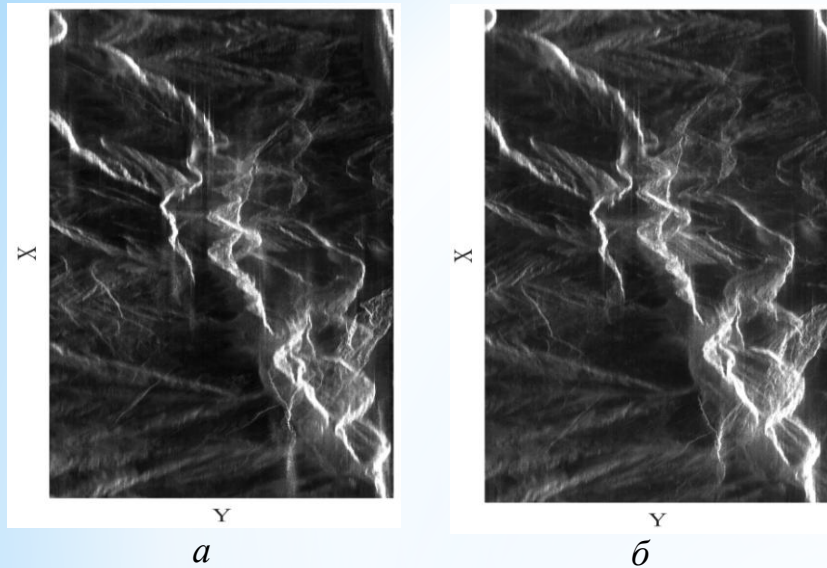


Рисунок 3. Результаты обработки реальных радиоголограмм: а – кадр РЛИ от 04.04.2017 г.; б – РЛИ от 20.04.2017 г.; в – оценка вертикальных смещений в кадре РЛИ

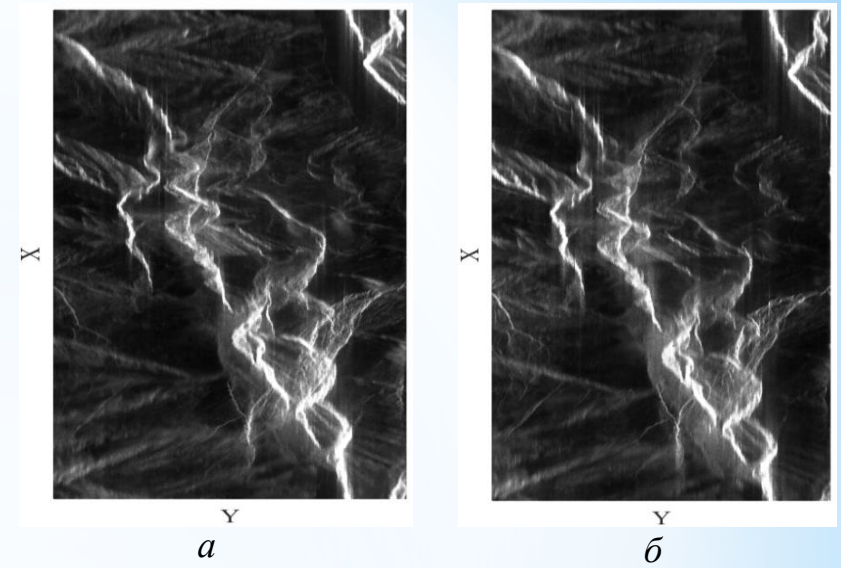


Рисунок 4. Результаты обработки реальных радиоголограмм: а – кадр РЛИ от 14.05.2017 г.; б – РЛИ от 30.05.2017 г.; в – оценка вертикальных смещений в кадре РЛИ

## ***Выводы***

- Обоснована модель сигнала многопроходного однопозиционного РСА интерферометра бокового обзора при движении Земли.
- Обосновано применение алгоритмов комплексной обработки интерферометрических измерений парных мультिवременных 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 мультिवременного наблюдения в многопроходной схеме.

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

***БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!***