

Применение многопроходного однопозиционного РСА бокового обзора для интерферометрической оценки смещений поверхности Земли

М. И. Бабокин^{1,2}, П. Е. Шимкин², В. Г. Степин²

¹ АО «АЭРОКОН», Жуковский, Московская обл., 140180, Россия
E-mail: m.baboki57@mail.ru

² Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 111250, Россия
E-mails: shimkinpy@mpei.ru, stepin.vitalii@mail.ru

Рассмотрены особенности построения и основные характеристики радиолокационного интерферометрического комплекса дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на базе однопозиционного многопроходного космического радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА), работающего в режиме бокового обзора. Определены условия функционирования и требования к информационному обеспечению системы дифференциальной разностно-фазовой обработки сигналов, полученных по данным интерферометрического РСА (ИРСА). Проверена работоспособность предложенного подхода к построению комплекса для обнаружения вертикальных смещений поверхности Земли по реальным радиолограммам, созданным по открытым данным ДЗЗ. Приведены экспериментальные результаты по отображению вертикальных смещений подстилающей поверхности Земли посредством применения мультिवременной разностно-фазовой обработки парных сигналов методом дифференциальной интерферометрии с помощью однопозиционного многопроходного космического РСА, работающего в режиме бокового обзора. Представленный в работе радиолокационный метод дифференциальной интерферометрии с помощью дифференциального ИРСА позволяет относительно детально и точно измерять вертикальные смещения земной поверхности при мультिवременной организации наблюдения.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой антенны, РСА, дифференциальный интерферометрический РСА, ДИРСА, метод разностно-фазовой интерферометрии, результаты эксперимента

Одобрена к печати: 24.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-89-99

Введение

Радиолокационный мониторинг с применением аэрокосмических комплексов с установленными на борту радиолокаторами с синтезированной апертурой антенны (РСА), в частности интерферометрическими (ИРСА), в целях дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) активно развивается, открывая новые возможности многомерной обработки сигналов с извлечением пространственно-разностно-фазовой информации, заключённой в отражённых от Земли эхосигналах (Верба и др., 2010; Волосюк, Кравченко, 2008; Школьный и др., 2008; Fornaro, Pascasio, 2014; Moreira et al., 2013; Ouchi, 2013).

Особенно важным практическим применением является обследование больших площадей с целью обнаружения термокарстовых подвижек грунтов и просадок в местах интенсивной добычи углеводородов, шахтной добычи полезных ископаемых, представляющих потенциальную опасность для трубопроводов, дорог, жилых и промышленных объектов, что позволит предотвратить экологический ущерб от нефтезагрязнений, сократить производственные затраты и т.п. При подобной организации радионаблюдения даже смещения величиной в доли длины волны передатчика РСА могут быть устойчиво обнаружены и идентифицированы.

Применение РСА многопроходного интерферометра с одним космическим аппаратом (КА) на орбите для решения вышеуказанных задач с целью получения дифференциальных оценок рельефа поверхности Земли может быть реализовано различным образом: а) за счёт

пролёта мимо объекта исследования при отклонённом луче антенны в сторону от нормали к линии пути (скошенное наблюдение); б) за счёт пролёта по орбите мимо объекта исследования при боковом обзоре, когда фазоразностные измерения происходят посредством относительного движения земной поверхности.

По причине простоты и реализуемости, особого внимания заслуживает второй вариант интерферометрической космической системы: один носитель с РСА бокового обзора формирует наблюдение в разных сеансах, следующих в пространстве со смещением вдоль линии пути, используя относительное движение земной поверхности. Затем применяется метод дифференциальной интерферометрии для получения оценок вертикальных смещений рельефа поверхности Земли в разных проходах.

Реализация первого варианта, т. е. построение схемы однопозиционного интерферометра со скошенным углом наблюдения, усложняет баллистическое управление при отвороте луча диаграммы направленности антенны и дополнительно искажает сигнал, в отличие от второго варианта, т. е. при боковом обзоре за счёт относительного движения Земли, который не затрудняет обработку и не вносит дополнительных искажений. При этом разовая точность интерферометра при боковом обзоре ниже, но благодаря мультिवременной обработкекратно повышается.

Цель настоящей работы заключается в обосновании возможностей дифференциальных интерферометрических комплексов РСА для обнаружения и оценки вертикальных смещений поверхности Земли на базе космического многопроходного однопозиционного ИРСА, работающего в режиме бокового мультिवременного обзора (Бабокин, 2010; Бабокин и др., 2024, 2025), потенциально обладающего относительно высокой детальностью, точностью, оперативностью получения информации и простотой реализации.

Геометрическая модель наблюдения

Однопозиционный способ построения РСА дифференциального интерферометра (ДИРСА) реализуется при мультिवременной многопроходной съёмке Земли с применением одного КА с РСА при боковом обзоре, когда комплексное изображение одного участка формируется несколько раз в каждом проходе в пределах одного рабочего участка орбиты. Излучение и приём сигналов на одном борту позволяет значительно снизить требования к навигационному обеспечению и синхронизации, что в случае применения ДИРСА имеет принципиальное значение.

Таким образом, КА с РСА на борту осуществляет наблюдение земной поверхности в зоне обзора, представленной в виде участка поверхности с начального момента времени $t = 0$ до момента окончания времени синтеза $t = T_C$ (рис. 1, см. с. 91, красная и зелёная заливка). Возможна организация мультिवременного наблюдения при оценке рельефа поверхности Земли при смещённом времени отсчёта, т. е. от $t = -T_C$ до $t = 0$ (см. рис. 1, синяя и фиолетовая заливка). При этом база однопозиционного интерферометра, необходимая для проведения частных оценок рельефа поверхности Земли в смежных сеансах наблюдения через время T_0 , организуется за счёт естественного пролёта носителя РСА от $t = -T_C$ до $t = -T_0$ либо от $t = 0$ до $t = T_0$ в зависимости от варианта реализации мультिवременного наблюдения.

На рис. 1 приняты следующие условные обозначения: $OXYZ$ — прямоугольная подвижная путевая локальная система координат; $R_{КА}$ — радиус орбиты КА в начальный момент времени, $R_{КА} = R_3 + H_{КА}$; R_3 — радиус Земли на широте объекта наблюдения; $H_{КА}$ — высота орбиты КА над поверхностью Земли в начальный момент времени; $V_{КА}$ — линейная скорость движения КА, $V_{КА} = \Omega_{КА} R_{КА}$; $\Omega_{КА}$ — угловая скорость движения КА; $V_{3э}$ — скорость вращения Земли на экваторе; $V_{3ш}$ — скорость вращения поверхности Земли на широте объекта наблюдения; ε_0 — широта объекта наблюдения в начальный момент времени; γ_0 — угол наклона орбиты, определяемый между плоскостью экватора и плоскостью орбиты КА в начальный момент времени; χ_0 — угол между вектором движения земной поверхности и проекцией направления визирования РСА; β_0 — угол скольжения в начальный момент

времени; p_0 — точечная цель с координатами x_0, y_0, z_0 ; α_0 — азимут относительно точечной цели в начальный момент времени; θ_0 — угол между направлением на точечную цель и направлением в нади́р (угол падения) в начальный момент времени; r_0 — наклонная дальность до точечной цели в начальный момент времени; L — размер интервала синтеза́рования апертуры; B_0 — размер базы интерферометра; ΔB — смещение носителя КА в парные сеансы мультivременного наблюдения при оценке рельефа поверхности Земли; ΔY — смещение орбиты КА во втором проходе; $\pm \Delta_z$ — вертикальное смещение поверхности Земли.

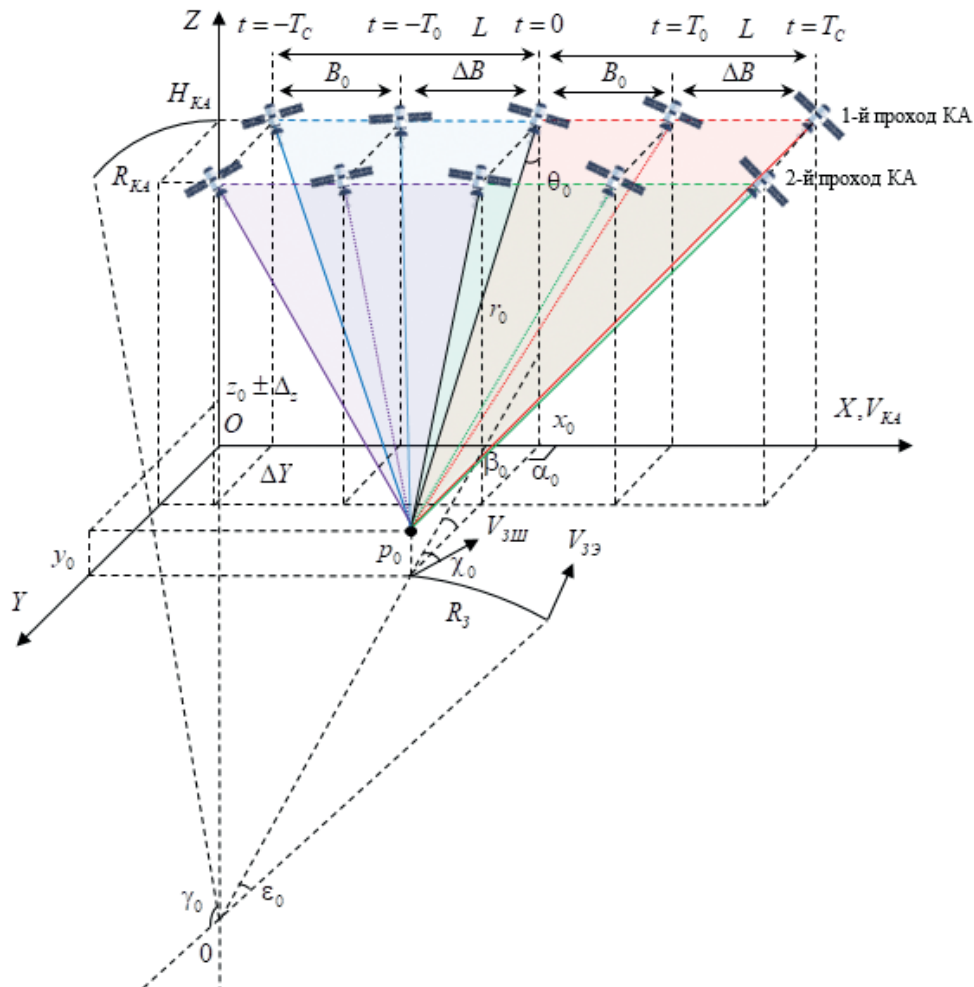


Рис. 1. Геометрия визирования ДИРСА бокового обзора

Представленная интерферометрическая схема последовательно реализуется во втором и последующих проходах одного КА с РСА при формировании ДИРСА. Смежные проходы через определённые промежутки времени (сутки, неделя, месяц, год) могут совпадать или отклоняться на значения по высоте и в направлении, поперечном движению. При этом на рис. 1 показано только поперечное смещение так, что второй проход осуществляется на той же высоте полёта КА, как и при первом проходе. Также предполагается, что во втором проходе КА имеется вертикальное смещение поверхности Земли внутри локальной области размером в элемент или несколько элементов разрешения.

Подобный ДИРСА обладает одной важной особенностью: имеется возможность реализации мультivременной съёмки в одном проходе за счёт движения земной поверхности. То есть можно получать последовательно несколько интерферометрических измерений с последующей их фазовой коррекцией и комплексной обработкой. Это расширяет суммарную базу интерферометра без относительных ракурсных искажений и, соответственно, повышает точность фазоразностных измерений.

Так, при одном проходе имеется $k = 0, \dots, K-1$ циклов формирования парных сигналов. В каждом цикле меняется угол отклонения синтезированного луча от нормали к линии пути согласно выражению:

$$\alpha_0^k = \arcsin \left[\frac{k \Delta B}{r_0^k \sin \theta_0^k} \right]; \quad r_0^k \approx r_0 + v_0^r t; \quad r_0 \approx \frac{R_3 \cos(\theta_0^k + \beta_0)}{\sin \theta_0^k};$$

$$v_0^r = -\alpha_0^k V_{\text{КА}} \sin \theta_0^k + V_{3Э} \cos \beta_0 \cdot \cos \chi_0 \cdot \cos \varepsilon_0; \quad \beta_0 = \arccos \left[\left(1 + \frac{H_{\text{КА}}}{R_3} \right) \sin \theta_0 \right],$$

где α_0^k , r_0^k , θ_0^k — азимутальный угол отклонения, дальность и угол падения в k -м сеансе наблюдения; $\Delta B \geq B_0$ — смещение базы интерферометра; v_0^r — скорость изменения расстояния до фазового центра антенны в предположении реализации детального прожекторного режима наблюдения за поверхностью с одновременным формированием группы синтезированных азимутальных лучей.

Некоторые особенности отражений от земной поверхности

Цифровой РСА формирует радиолокационное изображение в виде набора дискретных отсчётов (пикселей), каждый из которых можно трактовать как среднее значение функции радиолокационного рельефа $\dot{e}(x, y)$ в окрестности точки земной поверхности с координатами x, y на некоторой площадке размером ΔS , определяемой произведением разрешающей способности по азимуту Δx и горизонтальной дальности Δy . Шаг между дискретами внутри элементарной площадки определяет степень детальности воспроизведения функции радиолокационного рельефа. Его удобно сравнивать с потенциальной разрешающей способностью РСА по соответствующим координатам. Естественно, что для исследования всех потенциальных возможностей радиолокационной системы следует выбирать $\delta x \leq \Delta x$, $\delta y \leq \Delta y$, а это означает, что земную поверхность целесообразно разделить на отдельные участки размером в элемент разрешения или меньше.

Для ровной мелкошероховатой поверхности отражённый сигнал от элемента разрешения определяется как сумма сигналов от находящихся на данной площадке независимых элементарных отражателей. В результате суммирования случайная зависимость от времени обусловлена изменением геометрии системы фазового центра антенны — элемент разрешения вследствие движения носителя — и достаточно полно характеризуется двумя моментами распределения, в частности математическим ожиданием и корреляционной функцией:

$$m_e(t) = M[\dot{e}(t)]; \quad R_e(t_1, t_2) = M[\dot{e}(t_1) \dot{e}^*(t_2)] - M[\dot{e}(t_1)] M[\dot{e}^*(t_2)],$$

где $m_e(t)$ — зависимость математического ожидания от времени; $R_e(t_1, t_2)$ — корреляционная функция в парные моменты времени; $*$ — символ комплексного сопряжения.

Тогда при равномерном распределении случайных величин δx_i и δy_i внутри элемента разрешения имеем:

$$m_e(t) \approx 0; \quad R_e(t_1 - t_2) = \sigma^0 \Delta S \frac{\text{sinc}(a_x)}{a_x}, \quad a_x = \frac{2\pi V_{\text{КА}} \sin \theta_0 \Delta x (t_1 - t_2)}{\lambda r_0}, \quad (1)$$

где σ^0 — удельная эффективная площадь отражения поверхности; λ — рабочая длина волны РСА; a_x — вспомогательный множитель аргумента функции sinc в направлении азимута x .

Используя выражение нормированной корреляционной функции (1), можно определить время корреляции флуктуаций эхосигнала по уровню $\sim 0,7$:

$$T_k \approx \frac{\lambda r_0}{4 \Delta x V_{\text{КА}} \sin \theta_0},$$

где T_k — время корреляции сигнала.

Интервал синтезирования T_C жёстко связан с величиной потенциальной разрешающей способности по азимуту и устанавливается известным выражением: $\Delta x \approx \lambda r_0 / (4 T_C v_x \sin \theta_0)$,

поэтому при $\delta x = \delta y = \Delta x/2$ интервал корреляции временных флуктуаций отражённого сигнала от элемента разрешения однородной диффузной поверхности, определённый на уровне $\sim 0,7$, будет равен интервалу синтезирования.

Можем считать, что для подобной поверхности модуль и фаза элемента радиолокационного рельефа практически неизменны на интервале синтезирования, что для обнаружения и измерения вертикальных смещений земной поверхности имеет принципиальное значение. При этом необходимо помнить, что компенсация миграций по дальности на интервале синтезирования должна производиться при РСА-обработке с точностью в доли элемента разрешения.

На практике интервал между смежными наблюдениями однопроходного интерферометра выбирается в четверть интервала синтезирования или менее, так что корреляция парных сигналов обеспечивается на уровне выше 0,9. Кроме того, это обоснованное допущение значительно упрощает математическое описание сигналов, а также синтез алгоритмов обработки парных сигналов.

Далее рассмотрим несколько объектов наблюдения, имеющих особое интерферометрическое проявление:

1. Поверхность с крупномасштабными неровностями, особенно с крупными пологими неровностями (уклонами). Поверхность с уклоном больше элемента разрешения обеспечивает смещение центра фазового переотражения, а корреляционные свойства сигнала меняются в зависимости от величины и знака уклона поверхности:

$$R_{e_{\mu}}(t_1 - t_2) = \sigma^0 \Delta S \frac{\sin(a_{\mu})}{a_{\mu}}; \quad a_{\mu} = \frac{2\pi V_{КА} \sin(\theta_0 + \mu) \Delta x (t_1 - t_2)}{\lambda r_0}, \quad (2)$$

где μ — уклон поверхности Земли в направлении поперечному движению КА с РСА; a_{μ} — вспомогательный множитель аргумента функции sinc в направлении уклона μ .

Из выражения (2) следует, что уклон поверхности может существенно повлиять на корреляционные свойства сигнала, а следовательно, исказить фазоразностные измерения и даже привести к «фазовым» разрывам или неоднозначным фазовым скачкам.

2. Поверхность, где в элементе пространственного разрешения присутствует доминирующий отражатель искусственного или естественного происхождения. Его присутствие может привести к смещению фазового центра переотражения, а корреляционные свойства сигнала будут определяться размерами этого доминирующего отражателя:

$$R_{e_d}(t_1 - t_2) = \sigma^0 \Delta S \frac{\sin(a_d)}{a_d}, \quad a_d = \frac{2\pi V_{КА} \sin \theta_0 \Delta d (t_1 - t_2)}{\lambda r_0},$$

где Δd — размеры доминирующего отражателя; a_d — вспомогательный множитель аргумента функции sinc в направлении смещения d .

Если размеры отражателя много меньше разрешающей способности РСА, время корреляции сигнала элемента разрешения значительно превышает интервал синтезирования. В задачах интерферометрии это полезное свойство можно использовать для расширения диапазона фазометрического анализа, повысив тем самым точность и детальность измерения.

С одной стороны, повышение интервала корреляции, увеличение базового параметра, следовательно, точности измерения; с другой — случайное фазовое отклонение, величина которого может значительно превышать величину фазовой однозначности. Решение этой проблемы открывает широкие перспективы развития дифференциальной интерферометрии.

3. Движение объекта или самой поверхности (горизонтальное смещение), когда появляется зависимость от времени на интервале синтезирования, т. е. $\dot{e}(x, y, t)$, точнее, перемещение объекта по одной или другой координате. Это провоцирует изменение значений x, y на интервале синтезирования. Дело в том, что подобное смещение фазового центра переотражения сигнала элемента разрешения приводит к устойчивым фазовым отклонениям парных или межвитковых сигналов в ДИРСА. В данном случае эти фазовые отклонения воспринимаются как помеховые, и потребуются дополнительные усилия для их исключения из интерферометрического рассмотрения.

Алгоритм оценки вертикальных смещений земной поверхности

В работе (Бабокин, 2010) детально представлен квазилинейный алгоритм оценки вертикальных смещений земной поверхности для случая однопроходного мультитременного интерферометра при скошенном обзоре. С помощью некоторых упрощений и изменений для бокового обзора можно описать алгоритм в виде:

$$\hat{\Delta}_{mn}^k = \frac{\lambda \sin \theta_m}{4\pi \cos(\theta_m + \beta_0)} \arg(\hat{d}_{mn}^{k-1} \hat{d}_{mn}^{*k}), \quad \hat{d}_{mn}^{k-1} = \hat{e}_{mn}^{k-1,0} \hat{e}_{mn}^{*k-1,1}, \quad \hat{d}_{mn}^k = \hat{e}_{mn}^{k,0} \hat{e}_{mn}^{*k,1}, \quad (3)$$

где $\hat{\Delta}_{mn}^k$ — оценка вертикальных смещений земной поверхности в mn -м элементе разрешения в k -м сеансе наблюдения; m, n — номер элемента разрешения по наклонной дальности и азимуту соответственно, $m = 1, \dots, M, n = 1, \dots, N$; $\hat{d}_{mn}^{k-1}, \hat{d}_{mn}^k$ — 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 радиолокационного рельефа, полученные РСА-интерферометром в двух смежных сеансах наблюдения k -го и $(k-1)$ -го прохода КА.

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

1) 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) 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) результатов первого и второго комплексного сопряжения, в результате чего остаётся разностно-фазовая информация, связанная с величиной вертикальных смещений поверхности Земли.

При этом среднеквадратическое отклонение ошибки оценки (3) ДИРСА при условии значительного превышения отражённого земной поверхностью сигнала над шумами приёмника, с учётом несовпадения условий наблюдения в смежных проходах и одновременном смещении поверхности внутри элемента разрешения, а также при отсутствии дополнительной пространственной декорреляции из-за ошибок навигации, изменении отражающих свойств и т. п., определяется согласно выражениям:

$$\sigma^{\Delta} \approx \frac{\lambda \sin \theta_0}{8\pi \cos(\theta_0 + \beta_0)} \sqrt{\frac{1}{q} + \frac{(1 - \Delta r_e) \Delta y}{\Delta y - \partial y}}; \quad \Delta r_e \approx \frac{\sin a_y}{a_y}; \quad a_y = \frac{2\pi \Delta Y (\Delta y - \partial y)}{\lambda r_0}, \quad (4)$$

где σ^{Δ} — среднеквадратическое отклонение ошибки оценки смещений поверхности Земли в ДИРСА; q — отношение сигнал/шум на выходе системы обработки сигналов РСА; Δr_e — коэффициент корреляции дифференциальных парных сигналов в ДИРСА, ∂y — ошибка относительного позиционирования по земной дальности в смежных проходах; a_y — вспомогательный множитель аргумента функции sinc в направлении горизонтальной дальности y .

На рис. 2 (см. с. 95) представлены зависимости (4) для разного отношения сигнал/шум при следующих параметрах: $\beta \approx 40^\circ, H_{\text{КА}} \approx 512$ км, $\Delta y \approx 5$ м; $\lambda \approx 0,09$ м.

Из анализа зависимостей рис. 2 можно сделать следующие выводы: 1) потенциальная точность оценки вертикальных смещений земной поверхности однопозиционного двухпроходного ДИРСА может достигать десятых долей длины волны излучения; 2) несовпадение орбит смежных проходов в разумных пределах снижает потенциальную точность на десятки процентов; 3) ошибки навигации и позиционирования на уровне единичных долей (в %) от величины элемента разрешения приводят к подобному дополнительному снижению точности относительно потенциальной.

При наличии уклона поверхности в пределах $\mu \approx 10...20^\circ$ с учётом его влияния на ошибку в проекции разрешающей способности по дальности как $\partial y = \Delta y - \Delta r / \sin(\theta_0 + \mu)$, что эквива-

лентно внесению дополнительной ошибки позиционирования в выражения (4), потенциальная точность оценки вертикальных смещений земной поверхности также ухудшится в пределах 5–10 % относительно потенциальной. В данном случае следует считать это допустимым, однако дальнейшее увеличение уклона поверхности способно привести к разрушению фазоразностных измерений или к недопустимым ошибкам.

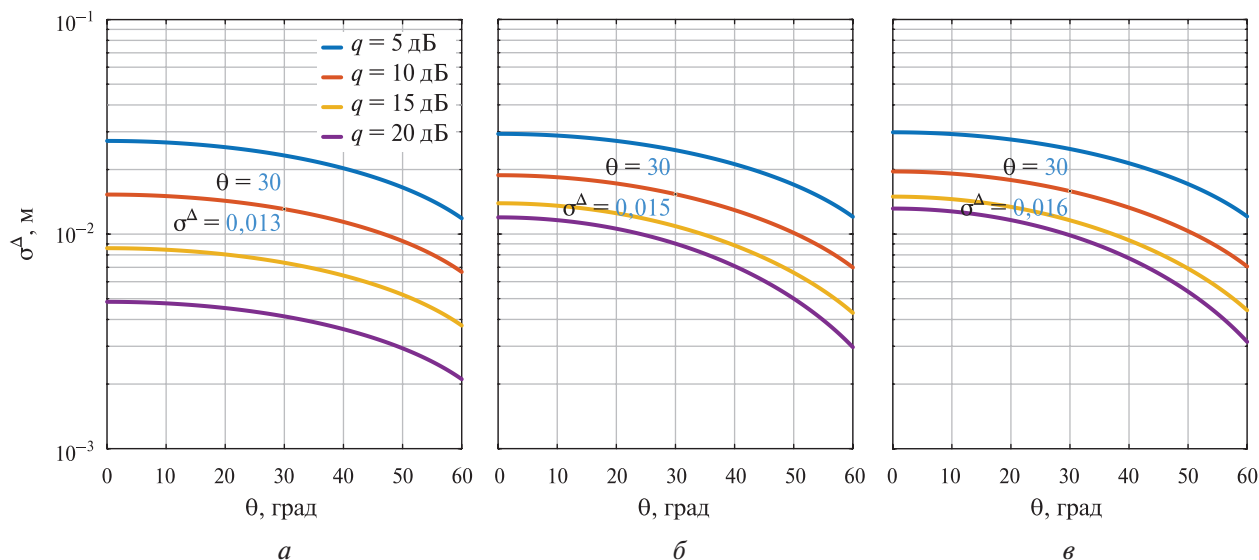


Рис. 2. Потенциальная точность оценки смещений поверхности Земли:
 а — при $\Delta Y = \delta y = 0$ м; б — при $\Delta Y \approx 1$ км и $\delta y = 0$ м; в — при $\Delta Y \approx 1$ км и $\delta y = 0,5$ м

В заключение анализа рассмотрим влияние точно-сосредоточенных объектов. Они обладают сильными корреляционными свойствами, но неточность относительного позиционирования в смежных проходах может привести к ошибкам. При наличии доминирующего точечного отражателя, размеры которого значительно меньше элемента разрешения, ошибка относительного позиционирования приведёт к дополнительной разностно-фазовой ошибке $\delta\phi$ в ДИРСА, определяемой как $\delta\phi \approx 4\pi\delta y \sin\theta_0/\lambda$.

Так, при наличии ошибки позиционирования в 1 м вышеуказанный факт приведёт к ошибке порядка тысяч градусов, что естественно недопустимо. Лишь ошибка позиционирования в единицы миллиметров позволит обеспечить случайную фазовую ошибку в пределах единиц градусов. Безусловно, для решения подобных задач необходимо использовать высокоточные навигационные системы, фазовые системы глобального и дифференциального (относительного) позиционирования, цифровые карты местности и применять дополнительные корреляционные и адаптивные методы интерферометрических измерений.

Экспериментальная проверка работоспособности

Проверка работоспособности алгоритмов оценивания смещений поверхности Земли с помощью ДИРСА бокового обзора проводилась по реальным сигналам космического комплекса РСА «Кондор-Э» (экспортный) (Турук и др., 2017) при движении земной поверхности со скоростью $V_3 \approx 200$ м/с на широте района наблюдения. Результаты обработки получены при обработке реальных радиоголограмм, записанных в апреле (рис. 3, см. с. 96) и мае (рис. 4, см. с. 96) 2017 г.

На рис. 3а, б и 4а, б представлены фрагменты радиолокационных изображений (РЛИ), полученных с двух проходов РСА, а на рис. 3в и 4в — оценка ДИРСА вертикальных смещений поверхности Земли в кадре РЛИ в виде матрицы амплитуд, графическое отображение цвета

которых пропорционально их величине в диапазоне: белый цвет — неопределённое значение или отсутствие оценки (0 м); синий — минимально определённое значение оценки (более 0 м), жёлтый — максимальное значение оценки (не более 0,18 м).

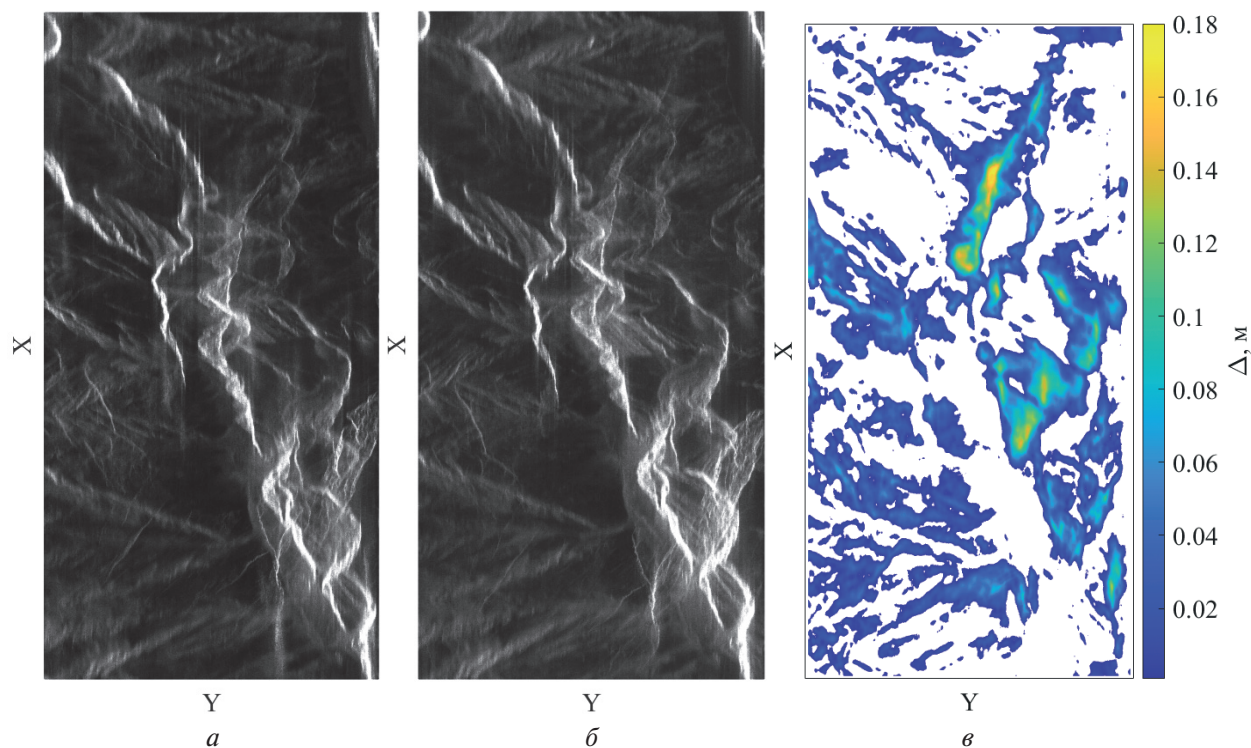


Рис. 3. Результаты обработки реальных радиоголограмм: *а* — РЛИ от 04.04.2017; *б* — РЛИ от 20.04.2017; *в* — оценка вертикальных смещений в кадре РЛИ

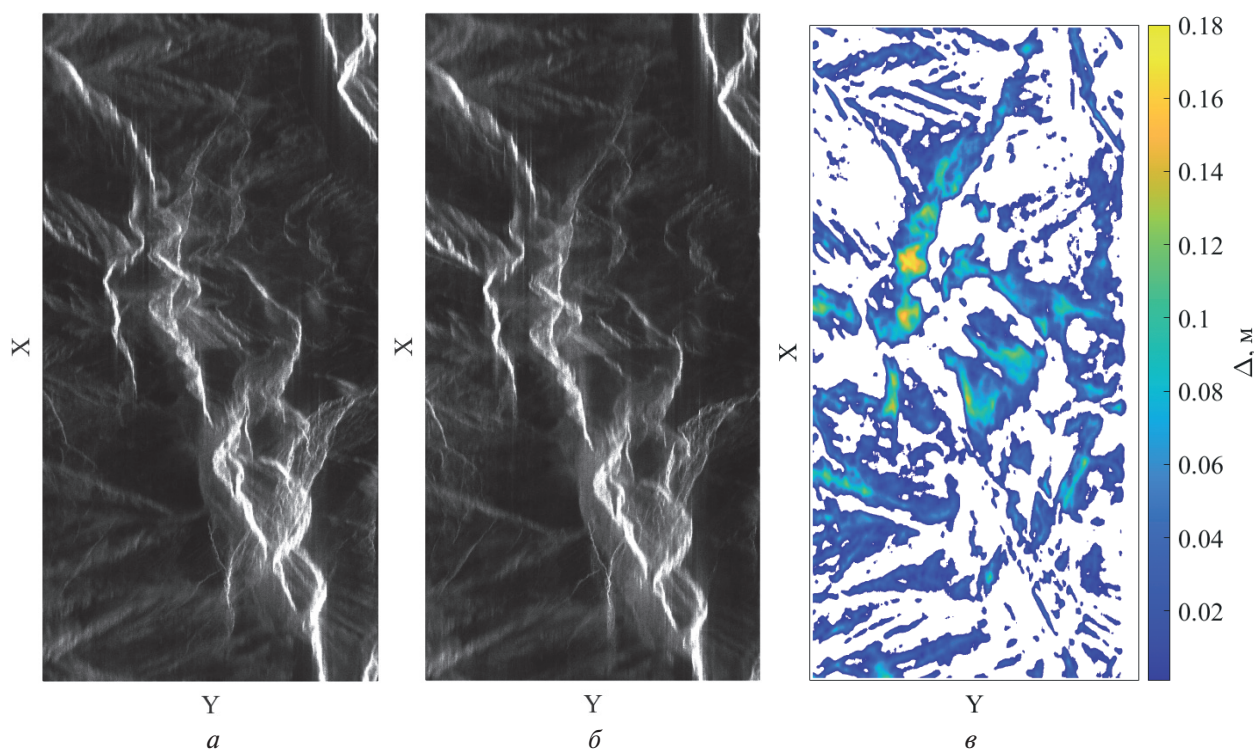


Рис. 4. Результаты обработки реальных радиоголограмм: *а* — РЛИ от 14.05.2017; *б* — РЛИ от 30.05.2017; *в* — оценка вертикальных смещений в кадре РЛИ

Сравнивая карты смещений земной поверхности, изображённых на *рис. 3в* и *4в*, можно прийти к выводу, что на склонах гор подвижность в апреле 2017 г. была гораздо интенсивнее, чем в мае 2017 г. Уклоны, как мы выяснили, не подходят для измерения вертикальных смещений с помощью ДИРСА, но в данном случае повторяемость и величина полученных оценок говорят об устойчивости наблюдаемых процессов на поверхности Земли. Кроме того, следует отметить участки поверхности, на которых подвижность в мае 2017 г. значительно выше, чем в апреле 2017 г., что также объяснимо естественными природными процессами.

Заключение

На современном этапе перед интерферометрическими комплексами РСА обоснованно ставится задача измерения вертикальных смещений земной поверхности. Использование многопроходного однопозиционного способа построения интерферометрического РСА для оперативного решения различных прикладных задач позволяет формировать разнообразные варианты методов и алгоритмов.

В настоящей работе обоснованы модель сигнала многопроходного однопозиционного РСА-интерферометра бокового обзора при движении Земли и применение алгоритмов комплексной обработки интерферометрических измерений парных мультिवременных сигналов, оценена точность измерения подвижек земной поверхности, а также проведена экспериментальная отработка и проверка алгоритмов с положительным результатом.

Представленные экспериментальные результаты показывают, что использование однопозиционного ДИРСА бокового обзора в сочетании с реализацией мультिवременного наблюдения в многопроходной схеме позволяют получить близкую к потенциальной по точности оценку смещений поверхности Земли.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-29-00507, <https://rscf.ru/project/24-29-00507/>.

Литература

1. *Бабокин М. И.* Авиационные и космические комплексы дистанционного зондирования Земли с интерферометрической обработкой многомерных сигналов: дис. ... д-ра техн. наук. М., 2010. 336 с.
2. *Бабокин М. И., Шимкин П. Е., Степин В. Г.* Применение дифференциального интерферометрического РСА для обнаружения кратковременных изменений на поверхности Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024. Т. 21. № 6. С. 117–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-117-129.
3. *Бабокин М. И., Шимкин П. Е., Степин В. Г.* Применение однопозиционного РСА бокового обзора для интерферометрической оценки рельефа поверхности Земли // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2025. Т. 22. № 5. С. 75–86. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-75-86.
4. *Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под общ. ред. В. С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.
5. *Волосюк В. К., Кравченко В. Ф.* Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / под ред. В. Ф. Кравченко. М.: Физматлит, 2008. 704 с.
6. *Турук В. Э., Верба В. С., Голованова М. В. и др.* РСА «Стриж» для малых космических аппаратов «Кондор-Э» // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 5. С. 69–83. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-69-83.
7. *Школьный Л. А., Толстов Е. Ф., Детков А. Н.* Радиолокационные системы воздушной разведки, дешифрирование радиолокационных изображений: учеб. для курсантов ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского / под ред. Л. А. Школьного. М.: Изд-во ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, 2008. 531 с.
8. *Fornaro G., Pascazio V.* SAR interferometry and tomography: Theory and applications // *Academic Press Library in Signal Processing*. 2014. V. 2. P. 1043–1117. DOI: 10.1016/B978-0-12-396500-4.00020-X.

9. *Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M. et al.* A tutorial on synthetic aperture radar // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. 2013. V. 1. No. 1. P. 6–43. DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
10. *Ouchi K.* Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics // Remote Sensing. 2013. V. 5. No. 2. P. 716–807. DOI: 10.3390/rs5020716.

The use of multi-pass monostatic side-view SAR in interferometric estimation of Earth surface displacements

M. I. Babokin^{1,2}, P. E. Shimkin², V. G. Stepin²

¹ JSC Aerocon, Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russia
E-mail: m.baboki57@mail.ru

² National Research University “Moscow Power Engineering Institute”
Moscow 111250, Russia
E-mails: shimkinpy@mpei.ru, stepin.vitalii@mail.ru

The article considers the design features and main characteristics of a radar interferometric complex for Earth remote sensing (ERS) based on a multi-pass monostatic satellite synthetic aperture radar (SAR) operating in the side-view mode. The operating conditions and requirements for information support for the system of differential phase-difference processing of signals obtained from interferometric SAR (ISAR) data are determined. The operability of the proposed approach to constructing a complex for detecting vertical displacements of the Earth surface using real radio holograms obtained from open ERS data is verified. Experimental results are presented on displaying vertical displacements of the underlying Earth surface by applying multi-time phase-difference processing of paired signals by the differential interferometry method using a multi-pass monostatic side-view satellite SAR. The method presented in this work for differential interferometry using differential ISAR allows relatively detailed and accurate measuring of vertical displacements of the Earth surface with multi-temporal organization of observation.

Keywords: synthetic aperture radar, SAR, differential interferometric SAR, DISAR, phase-difference interferometry method, experimental results

Accepted: 24.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-89-99

References

1. Babokin M. I., *Aviatsionnye i kosmicheskie komplekсы distantsionnogo zondirovaniya Zemli s interferometricheskoi obrabotkoi mnogomernykh signalov: Dis. ... d-ra tekhn. nauk* (Aviation and space complexes for remote sensing of the Earth with interferometric processing of multidimensional signals, Dr. techn. sci. thesis), Moscow, 2010, 336 p. (in Russian).
2. Babokin M. I., Shimkin P. E., Stepin V. G., Application of differential interferometric SAR in short-term Earth's surface changes detection, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 117–129 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-117-129.
3. Babokin M. I., Shimkin P. E., Stepin V. G., The use of single-pass side-view SAR in interferometric estimation of Earth's surface relief, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 5, pp. 75–86 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-75-86.
4. Verba V. S., Neronskii L. B., Osipov I. G., Turuk V. E., *Radiolokatsionnye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya* (Space-based radar systems for land survey), V. S. Verba (ed.), Moscow: Radiotekhnika, 2010, 680 p. (in Russian).

5. Volosyuk V. K., Kravchenko V. F., *Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya i radiolokatsii* (Statistical theory of radio engineering systems of remote sensing and radar), V. F. Kravchenko (ed.), Moscow: Fizmatlit, 2008, 704 p. (in Russian).
6. Turuk V. E., Verba V. S., Golovanova M. V. et al., Strizh SAR for small Condor-E satellites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 5, pp. 69–83 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-69-83.
7. Shkolnyi L. A., Tolstov E. F., Detkov A. N., *Radiolokatsionnye sistemy vozdushnoi razvedki, deshifrirovaniye radiolokatsionnykh izobrazhenii: uchebnik dlya kursantov VVIA imeni professora N. E. Zhukovskogo* (Radar systems of aerial reconnaissance, decoding of radar images: Textbook for cadets of the AFEA named after Professor N. E. Zhukovsky), L. A. Shkolnyi (ed.), Moscow: Izd. VVIA imeni prof. N. E. Zhukovskogo, 2008, 531 p. (in Russian).
8. Fornaro G., Pascazio V., SAR interferometry and tomography. Theory and applications, *Academic Press Library in Signal Processing*, 2014, V. 2, pp. 1043–1117, DOI: 10.1016/B978-0-12-396500-4.00020-X.
9. Moreira A., Prats-Iraola P., Younis M. et al., A tutorial on synthetic aperture radar, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, V. 1, No. 1, pp. 6–43, DOI: 10.1109/MGRS.2013.2248301.
10. Ouchi K., Recent trend and advance of synthetic aperture radar with selected topics, *Remote Sensing*, 2013, V. 5, No. 2, pp. 716–807, DOI: 10.3390/rs5020716.