

Применение однопозиционного РСА бокового обзора для интерферометрической оценки рельефа 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 радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА) космического базирования, работающего в режиме однопроходного наблюдения в строго боковом обзоре. Определены условия функционирования и требования к информационному обеспечению системы разностно-фазовой обработки сигналов, полученных по данным однопроходного интерферометрического РСА (ИРСА) при мультитременном радиозондировании. Проверена работоспособность предложенного подхода к построению комплекса ИРСА для первичной оценки рельефа поверхности Земли по разностно-фазовому смещению разновременных сигналов по реальным радиоголограммам, полученным по открытым данным ДЗЗ. Приведены экспериментальные результаты по отображению рельефа подстилающей поверхности Земли путём применения мультитременной разностно-фазовой обработки парных сигналов методом радиолокационной интерферометрии с помощью однопозиционного однопроходного космического РСА, работающего в режиме бокового обзора. Продемонстрирована возможность использования предлагаемой схемы построения интерферометрического комплекса с одним РСА на орбите при мультитременной организации наблюдения. Показано, что представленный в работе метод радиолокационной интерферометрии с помощью однопозиционного РСА позволяет детально и точно измерять рельеф подстилающей поверхности Земли.

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

Одобрена к печати: 29.07.2025
DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-75-86

Введение

Одним из перспективных направлений в области радиолокационного дистанционного зондирования Земли представляется развитие разностно-фазовой интерферометрии на основе теории искусственного синтеза апертуры антенны. Так, применение классического интерферометрического подхода (Верба и др., 2010; Волосюк, Кравченко, 2008; Кондратенков, Фролов, 2005; Школьный и др., 2008; Fornaro, Pascazio, 2014; Moreira et al., 2013; Ouchi, 2013; Richards et al., 2013) позволяет решить задачу трёхмерного картографирования, получения высокоточных топографических карт и цифровых моделей рельефа поверхности Земли, карт вертикальных и горизонтальных сдвигов земной поверхности. Из вышеуказанных источников следует, что подобные интерферометрические измерения предполагают наличие пространственного смещения хотя бы пары носителей радиолокатора с синтезированной апертурой антенны (РСА) на приём или излучение.

С точки зрения требований к проведению разностно-фазовых измерений минимум в двух точках пространства подобно классическому подходу может быть применена схема с так называемым однопроходным интерферометром, использующая один космический аппарат (КА) на орбите с установленным на борту КА одним РСА, в котором пространственное смещение обеспечивается за счёт естественного перемещения одного носителя РСА и (или) движения земной поверхности (Бабокин, 2010; Бабокин, Шимкин, 2023; Бабокин и др., 2024; Шимкин и др., 2017; Ka et al., 2019).

Подобный интерферометр может быть реализован различным образом: а) за счёт пролёта по орбите одного КА мимо объекта исследования при отклонённом луче антенны в сторону от нормали к линии пути (скошенное наблюдение); б) за счёт пролёта по орбите одного КА мимо объекта исследования и относительного движения земной поверхности при боковом РСА-обзоре. С разницей во времени меньше половины времени синтеза в первом и втором варианте искусственным образом формируется вторая, третья и т. д. РСА-позиция, смещённая вдоль линии пути. Эта операция подобна искусственному синтезированию апертуры антенны, когда за счёт естественного пролёта носителя формируется длинная апертура с последующим искусственным приведением к одному моменту времени. В данном случае формируется две или более синтезированные апертуры со смещением в пространстве и искусственным приведением к определённому моменту времени.

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 сдвигом вдоль линии пути. Можно отметить ряд особенностей однопроходного интерферометра с одним КА на орбите: а) парные сигналы с пространственным смещением формируются за один проход одним КА с одним РСА; б) парные сигналы формируются за счёт естественного пролёта КА одновременно (задержка получения сигналов сопоставима с долей интервала синтеза); в) сброс информации на «землю» осуществляется парными сигналами одновременно и оперативно; г) для повышения точности оценивания местного рельефа или его подвижек формируется ряд парных сигналов за проход (временные ряды с малым базовым параметром); д) оценка рельефа местности в одном проходе минимизирует влияние временных и пространственных искажений среды распространения и ошибок навигационно-баллистического обеспечения; е) отличается простотой реализации. Если в первом варианте однопроходного интерферометра со скошенным углом наблюдения усложняется баллистическое управление при отвороте луча диаграммы направленности антенны и возникают дополнительные искажения при обработке сигнала, то при боковом обзоре за счёт относительного движения Земли нет ни дополнительных сложностей, ни искажений.

Цель настоящей работы состоит в обосновании возможности оценки рельефа поверхности Земли с помощью космического однопроходного РСА-интерферометра, работающего в режиме бокового обзора, обеспечивающего высокую точность сопряжения парных сигналов, низкий уровень временной и пространственной декорреляции, а также оперативность, надёжность и простоту реализации. Для достижения заданной в работе цели рассмотрена математическая модель сигналов РСА-интерферометра при боковом обзоре и разработаны оптимальные алгоритмы фазоразностной обработки парных сигналов с последующим обоснованием точности измерений, а также продемонстрированы результаты экспериментальной обработки радиоголограмм, полученных в ходе лётных испытаний космического РСА.

Математическая модель наблюдения

Космический носитель с РСА на борту осуществляет наблюдение земной поверхности в зоне обзора, представленной в виде участка поверхности, в течение времени синтеза апертуры T_C с начального момента времени $t = 0$ до момента времени $t = T_C$ (рис. 1 (см. с. 77), вариант II, красная заливка). Аналогично возможно рассмотрение схемы наблюдения со смещённым временем отсчёта на величину T_C с $t = -T_C$ до $t = 0$ (см. рис. 1, вариант I, синяя заливка) и одновременной реализацией мультивременной съёмки. База однопозиционного интерферометра при этом организуется за счёт естественного пролёта носителя РСА за время смещения парных сеансов наблюдения T_0 , т. е. в интервале времени от $t = T_0$ до $t = 0$ или от $t = T_0$ до $t = T_C$ в зависимости от выбора варианта I или II.

На рис. 1 приняты следующие условные обозначения: $OXYZ$ — прямоугольная подвижная путевая локальная система координат (ПЛСК); $R_{КА}$ — 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; $V_{ЗЭ}$ — скорость вращения Земли на экваторе; $V_{ЗШ}$ — 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; σ_0 — точечная цель с координатами x_0, y_0, z_0 ; α_0 — азимут относительно точечной цели σ_0 в начальный момент времени; θ_0 — угол между направлением на точечную цель σ_0 и направлением в надир (угол падения) в начальный момент времени; r_0 — наклонная дальность до точечной цели σ_0 в начальный момент времени; L — размер интервала синтеза апертуры; B_0 — размер базы интерферометра.

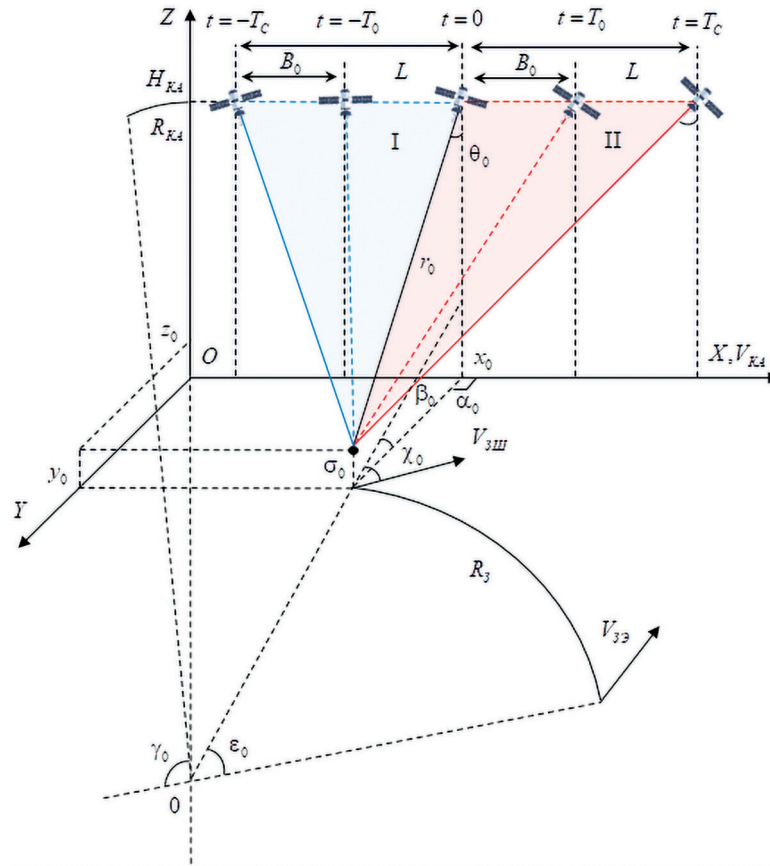


Рис. 1. Геометрия визирования однопроходного РСА бокового обзора

Для описания математической модели в РСА космического базирования путевая локальная система координат связана с движением КА и ориентирована таким образом, чтобы вектор относительной скорости КА в данной точке орбиты в начальный момент времени $t = 0$ находился в плоскости XOZ . При ориентации КА в путевой локальной системе координат продольная ось КА по мере движения КА в течение витка поворачивается параллельно следу КА. Для малых интервалов синтеза $(T_C < 10 \text{ с})$ и с учётом плавности траектории и ориентации оси OX вдоль вектора $V_{КА}$ можем записать

$$x_{ЦМ}(t) = V_{КА} t, \quad y_{ЦМ}(t) \approx 0,5 a_{КА}^y t^2, \quad z_{ЦМ}(t) \approx H_{КА} + 0,5 a_{КА}^z t^2, \quad (1)$$

где $a_{КА}^y = \pm 2V_{КА} \Omega_3 \sin \gamma_0$, $a_{КА}^z = -V_{КА}^2 / R_{КА}$ — линейное ускорение центра масс (ЦМ) КА вдоль осей OY и OZ соответственно; $\Omega_3 \approx 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ рад/с}$ — угловая скорость вращения Земли.

Конкретные значения параметров $H_{КА}$, $V_{КА}$, $a_{КА}^y$, $a_{КА}^z$ будут существенно зависеть от географических координат точки наблюдения, т.е. начала системы координат $OXYZ$. Высота орбиты КА и дальность действия РСА таковы, что пренебречь кривизной поверхности Земли при геометрических построениях не удаётся, однако на относительно большой дальности, в пределах относительно небольшой ширины зоны обзора, земную поверхность можно считать плоской. При этом формула, определяющая заданное изменение текущего расстояния от фазового центра антенны (ФЦА) РСА до некоторой точки исследуемого участка поверхности, имеет вид:

$$r(t) \approx \sqrt{[x - x_{\Phi\Omega}(t)]^2 + [y - y_{\Phi\Omega}(t)]^2 + [z - z_{\Phi\Omega}(t)]^2},$$

где $x_{\Phi\Omega}(t) \approx x_{ЦМ}(t)$, $y_{\Phi\Omega}(t) \approx y_{ЦМ}(t)$, $z_{\Phi\Omega}(t) \approx z_{ЦМ}(t)$ — текущие координаты ФЦА (считается, что вращение КА относительно центра масс отсутствует и ФЦА РСА находится в центре масс КА) определяются в соответствии с выражением (1).

Учитывая возможность пространственного разрешения РСА, облучаемую поверхность удобно разбить на элементы разрешения по дальности размером $\Delta y = \Delta r / \cos \beta_0$, где Δr — разрешение по наклонной дальности, и разрешения по азимуту размером $\Delta x = \lambda R_{КА} / (2T_C V_{КА} \sin \theta_0 \cdot \cos \alpha_0)$, λ — длина волны передатчика РСА. Вся зона обзора разбивается на $n = -N/2 \dots N/2$ элементов разрешения по азимуту размером Δx и $m = -M/2 \dots M/2$ элементов разрешения по дальности размером Δy . Расстояние от ФЦА до центра m -й полосы дальности на земной поверхности $r_m(0)$ определяется импульсной формой когерентного зондирующего радиосигнала и вычисляется по теореме косинусов:

$$r_m(0) \approx \frac{R_3 \cos(\theta_m + \beta_0)}{\sin \theta_m}, \quad (2)$$

где $\beta_0 = \arccos[(1 + H_{КА}/R_3) \sin \theta_0]$; θ_m — угол падения до центра m -й полосы дальности на земной поверхности.

Расстояние от ФЦА до точки исследуемого участка (при условии ровной поверхности) определяется следующим образом:

$$r_m(t) \approx r_m(0) + v_m^r t,$$

где v_m^r — скорость изменения расстояния до ФЦА в зависимости от азимутального угла α_n в предположении реализации детального прожекторного режима наблюдения за поверхностью с одновременным формированием группы синтезированных азимутальных лучей, $v_m^r = -\alpha_n V_{КА} \sin \theta_m$, $\alpha_n = \Delta \alpha \cdot n \approx \Delta x / R_{КА}$.

Местный рельеф влияет на изменение текущего расстояния от ФЦА до точки исследуемого участка (центр m , n -го элемента разрешения) согласно

$$r_{mn}(t, z) \approx r_m(t) - \Delta \theta_z V_{3Э} t \sin \beta_0 \cdot \cos \chi_0 \cdot \cos \varepsilon_0 \approx r_m(t) - z_{mn} / R_3 \cdot V_{3Э} t \sin \beta_0 \cdot \tan \theta_m \cdot \cos \chi_0 \cdot \cos \varepsilon_0, \quad (3)$$

где $\Delta \theta_z$ — отклонение угла визирования из-за относительного рельефа земной поверхности при неизменной наклонной дальности, $\Delta \theta_z = z_{mn} \tan \theta_m / R_3$; $R_3 \cos(\theta_m + \beta_0) / \sin \theta_m = (R_3 + z_{mn}) \cos(\theta_m + \beta_0) / \sin(\theta_m + \Delta \theta_z)$; z_{mn} — значение относительного рельефа m , n -го элемента разрешения.

Из анализа выражения (3) можно сделать важный для дальнейшего исследования вывод: местный рельеф влияет на изменение наклонной дальности от времени за счёт относительного движения Земли.

Для задач интерферометрических измерений важно знать разность фаз сигналов, входящих на пространственно-разнесённые позиции РСА. В данном приложении разность изменения дальности в двух позициях смежных сеансов наблюдения (на излучение и приём), согласно (2), определяется следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\varphi_m(t) &\approx \Delta\varphi(B_0) + \Delta\varphi(\alpha) + \Delta\varphi(t) + \Delta\varphi(z), \\ \Delta\varphi(B_0) &= \frac{4\pi}{\lambda} [r_m(t+T_0, z) - r_m(t, z)], \\ \Delta\varphi(\alpha) &\approx \frac{4\pi T_0 V_{3Э} \cos\beta_0 \cdot \cos\chi_0 \cdot \cos\varepsilon_0}{\lambda}, \\ \Delta\varphi(t) &\approx \frac{8\pi T_0 (V_{КА} \sin\theta_m)^2 t}{\lambda r_m}, \\ \Delta\varphi(z) &\approx \frac{4\pi z_{mn} T_0 V_{3Э} \sin\beta_0 \cdot \cos(\theta_m + \beta_0) \cos\chi_0 \cdot \cos\varepsilon_0}{\lambda R_{КА} \cos\theta_m}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\Delta\varphi(B_0)$ — разность фаз за счёт пространственного разнесения на расстояние базы интерферометра $B_0 = V_{КА} T_0$; $\Delta\varphi(\alpha)$ — отклонение фазы сигнала во втором сеансе наблюдения относительно «ровной» земной поверхности; $\Delta\varphi(t)$ — линейное во времени отклонение фазы (смещение по частоте) во втором сеансе наблюдения относительно ровной поверхности; $\Delta\varphi(z)$ — отклонения фазы во втором сеансе наблюдения в зависимости от величины местного рельефа.

Первая составляющая выражения (4) зависит от размера базы интерферометра.

Вторая составляющая выражения (4) зависит от вида картографирования: в режиме непрерывного маршрутного картографирования угол α фиксируется на всё время функционирования, поэтому значение $\Delta\varphi(\alpha)$ неизменно; в прожекторном или телескопическом режиме одновременно формируется группа синтезированных лучей с различным азимутом, по этой причине $\Delta\varphi(\alpha)$ изменяется в соответствии с выражением (4).

Третья составляющая выражения (4) определяет изменение между сигналами смежных сеансов наблюдения во времени. Это смещение влияет на корреляцию парных сигналов, его требуется компенсировать при обработке.

Четвёртая составляющая в соотношениях (4) содержит информацию о местном рельефе и зависит от угла падения, угла скольжения, угла наклона и угла между вектором движения земной поверхности в месте наблюдения и проекцией направления визирования РСА.

Алгоритм пространственно-временной обработки сигналов

Моделирование сигналов интерферометрических РСА требует определения электродинамической модели поверхности, пространственного движения КА, а также расчёта частоты пространственной и временной дискретизации.

Пространственная дискретизация определяется разрешающей способностью РСА и характером рассеяния поверхности (интервал пространственной корреляции). Временная дискретизация, в соответствии с теоремой Котельникова (теоремы отсчётов), согласуется со спектром траекторного сигнала, и для импульсных РСА шаг дискретизации обычно равен периоду повторения зондирующих импульсов.

Большинство реальных земных покровов характеризуются случайным распределением как геометрических, так и электрофизических параметров, поэтому адекватное описание отражённого электромагнитного поля возможно только статистически. Соответственно и модели этих отражённых полей описываются некоторыми случайными пространственно-временными функциями.

В ряде случаев определяющей характеристикой модели отражения радиоволн от земной поверхности считается удельная эффективная площадь отражения. Удельная эффективная площадь отражения $\sigma^0(x, y)$ — безразмерная величина, но является энергетической характеристикой и не даёт представления об изменении фазы волны при отражении.

Для более полного описания модели используют функцию радиолокационного рассеяния (РЛР) или комплексного коэффициента отражения $\hat{\epsilon}(x, y)$ и определяют его как неодно-

родное случайное поле, модуль которого пропорционален корню квадратному из удельной эффективной площади отражения поверхности.

В качестве модели РЛР можно использовать его дискретное представление в виде матрицы, каждый элемент которой можно трактовать как среднее значение функции РЛР площадки пространственного разбиения. Шаг между элементами радиолокационного изображения (РЛИ) определяет степень детальности воспроизведения функции РЛР.

Для однопроходного интерферометрического РСА комплексный сигнал в k -м сеансе наблюдения, отражённый от элементарной площадки, определяемый разрешающей способностью РСА, можно представить следующим образом:

$$s_{mn}^k(t) = \sum_{i=-I/2}^{I/2} \sum_{j=-J/2}^{J/2} \dot{e}_{m+i, n+j} \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left[2r_{m+i, n+j}^k(t, z) \right] \right\}, \quad (5)$$

где $\dot{e}_{m+i, n+j}$ — элементы дискретной модели РЛС с координатами x_{n+j} , y_{m+i} ; $i = -I/2 \dots I/2$ — номер элемента модели РЛР по оси y внутри элемента разрешения; $j = -J/2 \dots J/2$ — номер элемента модели РЛР по оси x внутри элемента разрешения; $r_{m+i, n+j}^k(t, z)$ — расстояние от ФЦА носителя в k -м сеансе наблюдения до $(m+i, n+j)$ -го элементарного отражателя РЛР.

Преобразуем выражение (5) к виду

$$s_{mn}^k(t) = \dot{e}_{mn}^k(t) \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} r_{mn}^k(t, z) \right], \quad (6)$$

где $\dot{e}_{mn}^k(t)$ имеет смысл комплексного коэффициента рассеяния разрешаемой площадки земной поверхности, $\dot{e}_{mn}^k(t) = \sum_{i=-I/2}^{I/2} \sum_{j=-J/2}^{J/2} \dot{e}_{m+i, n+j} \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left[2 \left(r_{m+i, n+j}^k(t, z) - r_{mn}^k(t, z) \right) \right] \right\}$.

На интервале времени синтеза $T_C = \lambda R_{КА} / (2V_{КА} \Delta x)$, обеспечивающем заданное азимутальное разрешение Δx , комплексный коэффициент рассеяния при условии коррекции миграции сигнала по дальности на интервале синтеза с точностью в доли элемента разрешения можно считать постоянным во времени, т. е. $\dot{e}_{mn}^k(t) \approx \dot{e}_{mn}^k(0)$.

Как следует из уравнения (6), коэффициент рассеяния разрешаемой площадки будет отличаться в разных сеансах съёмки, что можно объяснить интерференцией сигналов от элементарных отражателей. Причём коэффициент пространственной корреляции можно определить как $r_e^k = \overline{e_{mn}^k e_{mn}^{*k+1}} / D_e$ (Бабокин, 2010; Бабокин, Карпов, 2008), где D_e — дисперсия коэффициента рассеяния между комплексными коэффициентами рассеяния одного элемента разрешения поверхности для смежных сеансов однопроходной съёмки.

В условиях высокой «прямоугольности» элемента разрешения РСА и коррекции миграции по дальности на интервале синтеза, наблюдения однородной диффузной земной поверхности для однопозиционного бокового интерферометра коэффициент пространственной корреляции можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} r_e^k(B_0) &\approx \frac{\sin(w_r \Delta r)}{w_r \Delta r} \cdot \frac{\sin(w_\tau \Delta x)}{w_\tau \Delta x}, \\ w_r &= \frac{2\pi \tan \beta_0 \cdot \sin \beta_0 B_0^r}{\lambda r_m}, \quad w_\tau = \frac{\pi B_0^\tau}{2\lambda r_m}, \\ B_0^r &= V_{3\Omega} T_0 \sin \chi_0 \cdot \cos \varepsilon_0, \quad B_0^\tau = V_{3\Omega} T_0 \sin \chi_0 \cdot \sin \varepsilon_0, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где B_0^r , B_0^τ — радиальная и тангенциальная проекции базы интерферометра B_0 за счёт движения Земли; w_r , w_τ — вспомогательные множители аргумента функции sinc .

Используя выражение (7), можно определить предельное значение времени между парными сеансами наблюдения интерферометра, считая допустимым снижение их коэффициента пространственной корреляции до уровня $\sim 0,707$:

$$T_0^r \leq \frac{\lambda r_m}{2 \tan \beta_0 \cdot \sin \beta_0 \cdot V_{3\Omega} \sin \chi_0 \cdot \cos \varepsilon_0 \Delta r}, \quad T_0^x \leq \frac{2 \lambda r_m}{V_{3\Omega} \Delta x}. \quad (8)$$

В работах (Бабокин, 2010; Бабокин, Карпов, 2008) доказано, что время корреляции сигнала элемента разрешения сопоставимо со временем синтеза, поэтому время между сеансами интерферометра $T_0 = T_C/2$ удовлетворяет ограничению (8). Также в работе (Бабокин, 2010) подробно описан квазилинейный алгоритм оценки местного рельефа для однопроходного интерферометра при скошенном обзоре. Путём некоторых упрощений и изменений для бокового обзора можно представить алгоритм оценки местного рельефа в виде

$$\hat{z}_{mn} \approx \frac{\lambda R_3}{4\pi \sin \beta_0 \cdot \tan \theta_m V_{3\Omega} \cos \chi_0 \cdot \cos \varepsilon_0 T_0} \arg(\hat{e}_{mn}^0 \hat{e}_{mn}^{*1}), \quad (9)$$

где $\hat{e}_{mn}^0, \hat{e}_{mn}^1$ — комплексные РЛИ, полученные в первом и втором сеансах наблюдения.

При этом дисперсия ошибки оценки (9) определяется (Бабокин, 2010) как

$$D_m^z \approx \frac{N_0 (\lambda R_3)^2}{2 |\hat{e}_{mn}|^2 T_C n_H (4\pi T_0 V_3 \sin \beta_0 \cdot \tan \theta_m)^2}, \quad (10)$$

где N_0 — спектральная плотность мощности «белого» шума приёмника; n_H — кратность некогерентного накопления (размер двумерного окна фильтрации) по дальности и азимуту; $V_3 = V_{3\Omega} \cos \varepsilon_0 \cos \chi_0$ — проекция скорости вращения Земли.

Как следует из выражения (10), потенциальная ошибка оценивания относительного рельефа местности зависит от отношения сигнал/шум на выходе системы обработки РСА и условий формирования интерферометрической пары отражённых от земной поверхности импульсных сигналов РСА. Среднеквадратическую ошибку измерения относительной высоты рельефа поверхности Земли с учётом (10) можно определить с помощью выражения

$$\sigma_m^z \approx \frac{\lambda R_3}{\sqrt{q n_H} \cdot 4\pi T_0 V_3 \cos \beta_0} = \frac{\Delta x V_{KA} R_3}{\sqrt{q n_H} \cdot \pi r_m V_3 \cos \beta_0}, \quad (11)$$

где q — отношение сигнал/шум, $q = 2T_C |\hat{e}_{mn}|^2 / N_0$; $T_0 = T_C/2 = \lambda r_m / (4V_{KA} \Delta x)$ — в предельном случае.

На *рис. 2* (см. с. 82) представлены зависимости от угла падения ошибки оценивания относительного рельефа однопозиционного интерферометрического РСА бокового обзора, использующего движение Земли, при общих параметрах $V_{KA} \approx 7$ км/с, $\beta_0 \approx 40^\circ$; $n_H \approx 100$ при $V_3 \approx 200$ м/с — серия сплошных линий на графиках и при $V_3 \approx 170$ м/с — серия штриховых линий на графиках.

Как следует из анализа выражения (11) и *рис. 2* только при максимальных углах падения и высокой разрешающей способности по азимуту, а также значительном отношении сигнал/шум можно рассчитывать на точность бокового однопроходного интерферометра менее десятка метров.

Однопроходный способ построения РСА-интерферометра обладает одной интересной особенностью: интерферометр может реализовывать многосеансную или мильтивременную съёмку (больше двух сеансов) в одном проходе с применением одного КА с РСА за счёт движения земной поверхности, когда комплексное изображение одного участка поверхности Земли формируется несколько раз в пределах одного рабочего участка орбиты. Для подобных задач выделяется режим детального наблюдения с электронным сопровождением одного участка местности. То есть можно получать последовательно несколько интерферометрических измерений относительного рельефа на одном участке траектории полёта КА с последующей их фазовой коррекцией и комплексной обработкой. Это обеспечивает значительное повышение точности измерения относительного рельефа.

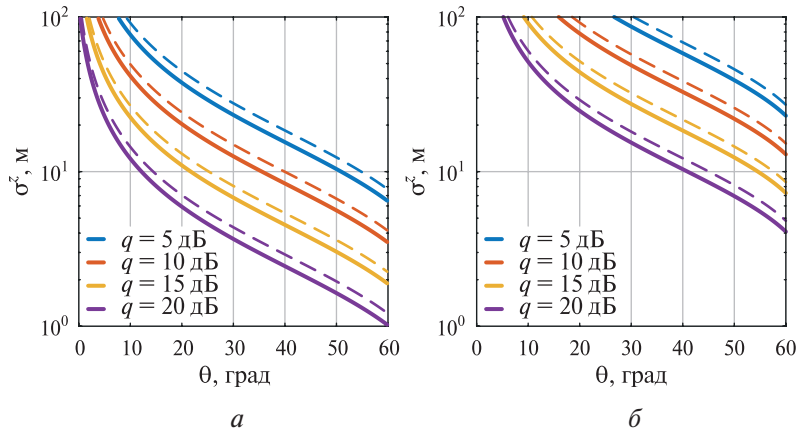


Рис. 2. Потенциальная точность оценки рельефа поверхности Земли:
а — $H_{KA} \approx 512$ км, $\Delta x \approx 2$ м, $\lambda \approx 9$ см; б — $H_{KA} \approx 758$ км, $\Delta x \approx 10$ м, $\lambda \approx 6$ см

Предположим, что при одном проходе имеем $k = 0, \dots, K-1$ циклов формирования парных сигналов для интерферометрических измерений. В каждом цикле меняется угол отклонения синтезированного луча от нормали к линии пути согласно выражению $\alpha_k = \arcsin[(k\Delta B)/(r_m^k \sin \theta_m)]$ при смещении базы на $\Delta B \geq B_0$. Данное свойство расширяет суммарную базу и, соответственно, повышает точность восстановления относительного рельефа. До получения оценки в разных циклах измерения необходимо произвести фазовую коррекцию текущей оценки комплексной пары в соответствии с соотношением

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

где $\Delta\hat{\phi}_{mn}^k$ — оценка текущего (на k -й цикл) корректирующего фазового набега, $\Delta\hat{\phi}_{mn}^k \approx \hat{z}_{mn}^{k-1} 4\pi B k \Delta B / (\lambda R_3 r_m^k)$; $\hat{z}_{mn}^{k-1}$ — предыдущая (на $(k-1)$ -й цикл) оценка рельефа поверхности Земли.

Это означает, что, получив текущий результат комплексного сопряжения, требуется его фазовая коррекция посредством комплексного умножения на дискретную функцию $\sim \exp(j\Delta\phi)$, рассчитанную по оценке высоты местного рельефа предыдущего измерения. Фактически имеет место процедура рекуррентного оценивания высоты местного рельефа.

Экспериментальная проверка работоспособности

Проверка работоспособности алгоритмов оценивания рельефа поверхности Земли с помощью однопозиционного интерферометрического РСА бокового обзора проводилась по реальным сигналам космического комплекса РСА «Кондор-Э» (экспортный) (Турук и др., 2017) (рис. 3, см. с. 83) при движении земной поверхности со скоростью $V_3 \approx 200$ м/с и открытым данным радиоголограмм комплекса ERS-1/2 (рис. 4, см. с. 83) с $V_3 \approx 170$ м/с. Остальные параметры съёмки соответствовали ранее приведённым в предыдущем разделе настоящей работы.

Слева (см. рис. 3а) на всех парах фрагментов представлено РЛИ, а справа (см. рис. 3б) — мультिवременная оценка рельефа в кадре РЛИ в виде матрицы амплитуды, величина которой пропорциональна рельефу подстилающей поверхности Земли. Весь диапазон наблюдаемого рельефа определяется следующим образом: синий цвет — минимальное значение (0 м), жёлтый — максимальное (от 2741 до 4754 м). Белые участки сопровождают «разрывы фаз», характерных для сложных объектов изменчивой структуры. Представленные экспериментальные результаты показывают, что применение однопозиционного РСА бокового обзора в сочетании и использованием мультивременных рядов с малым базовым параметром при органи-

зации однопроходного интерферометрического наблюдения позволяют получить близкую к потенциальной по точности оценку рельефа поверхности Земли.

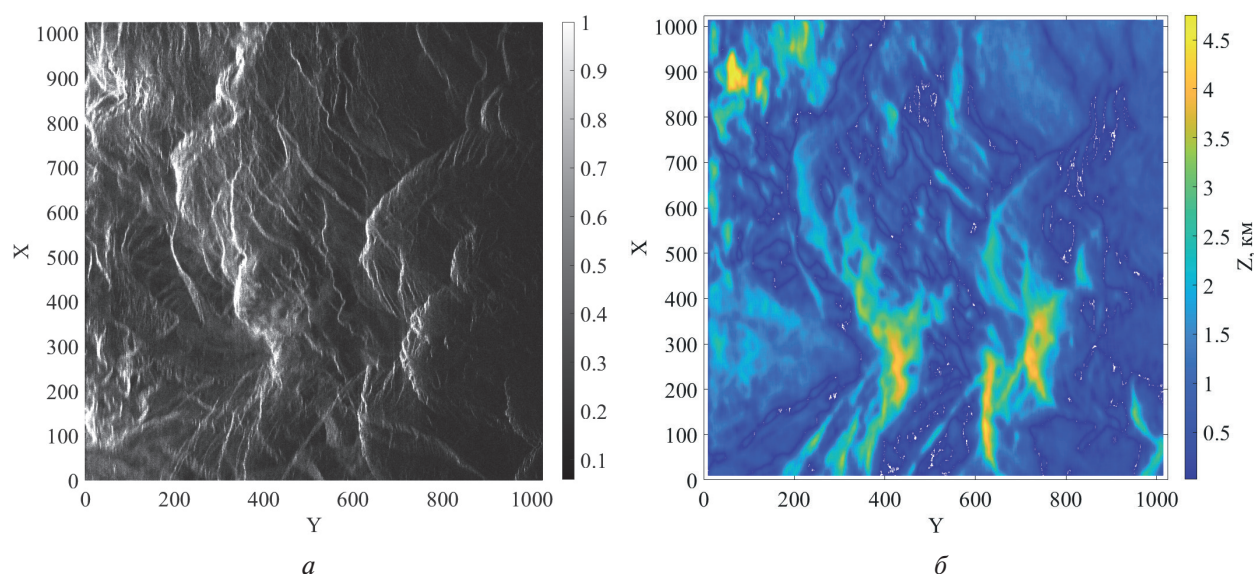


Рис. 3. Район Ключевской сопки: *а* — кадр РЛИ; *б* — оценка рельефа в кадре РЛИ

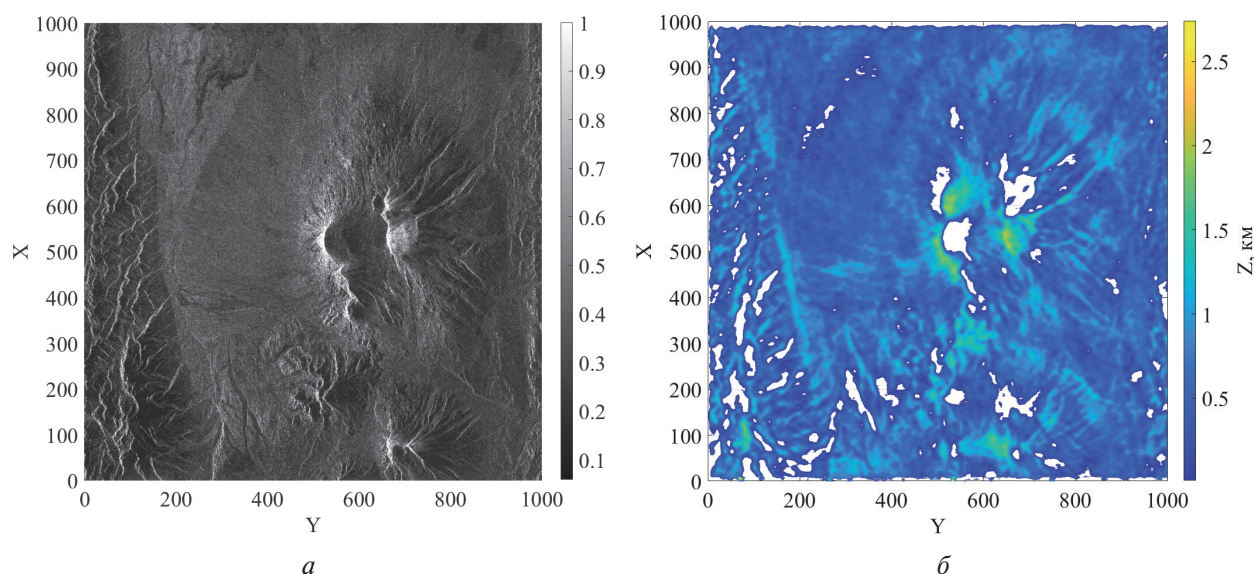


Рис. 4. Район Авачинской сопки: *а* — кадр РЛИ; *б* — оценка рельефа в кадре РЛИ

Заключение

На современном этапе перед интерферометрическими комплексами РСА обоснованно ставится задача измерения рельефа местности. Использование однопроходного способа построения с одним РСА для оперативного решения различных прикладных задач позволяет формировать разнообразные варианты методов и алгоритмов.

В настоящей работе обоснована модель сигнала однопроходного РСА-интерферометра при боковом обзоре при движении Земли, получены алгоритмы комплексной обработки интерферометрических измерений парных мультивременных сигналов и оценена точность измерения относительного рельефа местности, а также проведена экспериментальная обработка и проверка полученных алгоритмов с положительным результатом.

Представленные результаты экспериментов, анализа достоинств и ограничений рассмотренного однопроходного космического РСА-интерферометра при боковом обзоре земной поверхности позволяют сделать вывод о возможности мультивременной организации с компенсацией пространственных и временных искажений сигналов за счёт движения земной поверхности и фазоразностной обработки многомерных сигналов.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-29-00507 «Развитие методов и алгоритмов дифференциальной интерферометрии для оперативной диагностики Земли с борта летательных аппаратов», <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., Карпов О. А.* Обнаружение сигнала подстилающей поверхности в РЛС с учетом его флуктуаций на интервале синтезирования // Вопросы радиоэлектроники. 2008. № 1. С. 148–160.
3. *Бабокин М. И., Шимкин П. Е.* Применение РСА космического базирования в режиме однопроходного переднебокового обзора для томографического исследования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 49–59. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-49-59.
4. *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.
5. *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.
6. *Волосюк В. К., Кравченко В. Ф.* Статистическая теория радиотехнических систем дистанционного зондирования и радиолокации / под ред. В. Ф. Кравченко. М.: Физматлит, 2008. 704 с.
7. *Кондратенков Г. С., Фролов А. Ю.* Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли: учеб. пособие для вузов / под ред. Г. С. Кондратенкова. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
8. *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.
9. *Шимкин П. Е., Бабокин М. И., Баскаков А. И.* Исследование точности однопроходного переднебокового РСА интерферометра при измерении рельефа поверхности Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 103–112. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-103-112.
10. *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.
11. *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.
12. *Ka M.-H., Shimkin P. E., Baskakov A. I., Babokin M. I.* A new single-pass SAR interferometry technique with a single-antenna for terrain height measurements // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 9. Article 1070. DOI: 10.3390/rs11091070.
13. *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.
14. *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.
15. *Richards M. A., Melvin W. L., Sheer J. A.* Principles of Modern Radar: Advanced techniques (Radar, Sonar and Navigation). SciTech Publ., 2013, 872 p.

The use of single-pass side-view SAR in interferometric estimation of the Earth's surface relief

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 paper discusses the design features and principal characteristics of an interferometric Earth remote sensing (ERS) system based on a monostatic spaceborne synthetic aperture radar (SAR) operating in a single-pass observation and a strictly side-view mode. The operational conditions and data requirements are defined for the differential phase processing system that utilizes measurements acquired from a single-pass interferometric SAR (InSAR) during multi-temporal observation. The viability of the proposed system configuration in constructing the InSAR complex for primary assessment of the Earth's surface relief based on difference phase shift in multi-temporally separated signals using real radar holograms obtained from publicly available ERS dataset is verified. Experimental results are presented on displaying the relief of the Earth's surface by applying multi-temporal phase difference processing of paired signals by radar interferometry method using a single-position single-pass space SAR operating in the side-view mode. The possibility of using the proposed scheme for constructing an interferometric complex with one SAR in orbit with multi-time organization of observation is demonstrated. It is shown that the method of radar interferometry presented in the work enables detailed and accurate measurement of the relief of the underlying surface of the Earth.

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

Accepted: 29.07.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-75-86

References

1. Babokin M. I., *Aviatsionnye i kosmicheskie komplekсы distantsionnogo zondirovaniya Zemli s interferometricheskoi obrabotkoi mnogomernykh signalov: Diss. ... dokt. 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., Karpov O. A., Detection of the underlying surface signal in a radar taking into account its fluctuations in the synthesis interval, *Voprosy radioelektroniki*, 2008, No. 1, pp. 148–160 (in Russian).
3. Babokin M. I., Shimkin P. E., Application of space-based SAR in single-pass squint mode in Earth tomographic study, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 2, pp. 49–59 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-49-59.
4. 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.
5. 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).
6. 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).
7. Kondratenkov G. S., Frolov A. Yu., *Radiovidenie. Radiolokatsionnye sistemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli: uchebnoe posobie dlya vuzov* (Radiovision. Radar systems for remote sensing of the Earth: University textbook), G. S. Kondratenkov (ed.), Moscow: Radiotekhnika, 2005, 368 p. (in Russian).
8. 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.

9. Shimkin P. E., Babokin M. I., Baskakov A. I., A study of accuracy of single-pass interferometric synthetic aperture radar with front-side view for measuring the Earth's surface, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 5, pp. 103–112 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-5-103-112.
10. Shkolnyi L. A., Tolstov E. F., Detkov A. N., *Radiolokatsionnye sistemy vozdushnoi razvedki, deshifrirovaniye radiolokatsionnykh izobrazhenii: uchebnyk 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).
11. 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.
12. Ka M.-H., Shimkin P. E., Baskakov A. I., Babokin M. I., A new single-pass SAR interferometry technique with a single-antenna for terrain height measurements, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 9, Article 1070, DOI: 10.3390/rs11091070.
13. 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.
14. 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.
15. Richards M. A., Melvin W. L., Sheer J. A., *Principles of Modern Radar: Advanced techniques (Radar, Sonar and Navigation)*, SciTech Publishing, 2013, 872 p.