

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.9>

УДК 621.396.969

## ОЦЕНИВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ АБСОЛЮТНОЙ ФАЗЫ ПРИ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ДАННЫХ РАДИОЛОКАТОРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

А. В. Сосновский

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Статья поступила в редакцию 15 июня 2021 г., после доработки 6 июля 2021 г.

**Аннотация.** Рассматривается задача оценивания точности восстановления абсолютной фазы при интерферометрической обработке данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой. Разработана методика оценивания точности, основанная на вычислении среднеквадратичного отклонения эталонных и измеренных интерферометрической системой абсолютных фаз в системе координат радиолокационного изображения «азимут – наклонная дальность». Предложенная методика предполагает обратное преобразование координат эталонных высотных рельефа земной поверхности из географической системы координат в систему координат изображения и последующее вычисление параметров связи между эталонными высотами и измеренными абсолютными фазами по методу наименьших квадратов. Это позволяет оценить эффективность выполнения отдельных этапов интерферометрической обработки (некогерентного накопления, подавления фазового шума, развертывания фазы) и экспериментально определить наиболее эффективные алгоритмы обработки и диапазоны оптимальных значений их параметров. Методика опробована на примере обработки радиолокационных изображений ALOS PALSAR, полученных при различных условиях съемки.

**Ключевые слова:** радиолокаторы с синтезированной апертурой, интерферометрическая обработка, цифровые модели рельефа, подавление фазового шума, развертывание фазы.

**Abstract.** The problem of accuracy estimation of the absolute phase recovery in interferometric synthesized aperture radars (InSAR) data processing is considered. A method for accuracy estimation based on the calculation of the standard deviation of the reference phases and the absolute phases measured by the interferometric system in the radar image coordinate system "azimuth – slant range" is developed. The method includes converting the coordinates of the reference topographic height marks from the geographical coordinate system to the radar image coordinate system and then calculating of the transformation parameters between the reference heights and the measured absolute phases using the least squares method. The latter allows one to evaluate the performing effectiveness of individual stages of interferometric processing (multilooking, phase noise suppression, phase unwrapping) and experimentally determine the most effective processing algorithms that provide the best accuracy of the phase recovery and their optimal parameters. The method is tested using the ALOS PALSAR radar images obtained under various imaging conditions.

**Key words:** synthesized aperture radars, InSAR data processing, digital elevation models, phase noise suppression, phase unwrapping.

## **Введение**

Одной из тенденций развития современных радиолокационных систем космического наблюдения стало широкое применение интерферометрической обработки данных (InSAR/DInSAR) для получения информации о рельефе местности и его изменениях. Метод радиолокационной интерферометрии сочетает в себе высокую точность фазовых методов измерения с высокой разрешающей способностью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), что позволяет получать детальные цифровые модели рельефа (ЦМР) и карты смещений рельефа по многократным радиолокационным наблюдениям [1-3]. Вместе с тем, широкое внедрение этой технологии в картографо-геодезическую деятельность и решение задач мониторинга затрудняется сложностью интерферометрической обработки, на отдельных

этапах которой используются разнообразные эмпирические алгоритмы и методы. Поэтому важной остается задача выбора наиболее эффективных алгоритмов с точки зрения точности конечного результата обработки [4].

Используемые по настоящее время экспериментальные методы оценивания точности предполагают полное завершение процедуры интерферометрической обработки и последующее сравнение ее результата с эталоном. В качестве эталонных данных могут картографические ЦМР [5], данные глобальных радионавигационных систем [6-8], результаты лазерной сканирующей съемки [9]. Однако при таких подходах существенно затруднена оценка эффективности выполнения отдельных этапов интерферометрической обработки как по причине высокой вычислительной емкости отдельных алгоритмов (большинство алгоритмов развертывания фазы, адаптивные алгоритмы подавления фазового шума), так и по причине необходимости ручного контроля процесса геокодирования интерферограммы абсолютной фазы.

В настоящей статье предлагается методика исследования точности восстановления абсолютной фазы на отдельных этапах интерферометрической обработки данных РСА, не требующая полного завершения всей процедуры обработки и позволяющая без ручного контроля производить оценивание при использовании различных алгоритмов, при перестройке их параметров и изменении условий обработки.

## **1. Восстановление абсолютной фазы при интерферометрической обработке**

Основной задачей интерферометрической обработки является получение интерферограммы абсолютной фазы (далее – восстановление абсолютной фазы), вид которой определяется рельефом подстилающей поверхности, а масштаб значений – условиями съемки, влияние которых приближенно можно оценить величиной высоты неоднозначности  $h_a$ , т.е. изменением высоты рельефа, которому соответствует изменение разности фаз эхо-сигналов  $\Delta\varphi$  на  $2\pi$  рад. При этом  $\Delta\varphi$  помимо составляющей, обусловленной формой рельефа

подстилающей поверхности (топографической фазы), содержит и ряд других компонент [10,11]:

$$\Delta\varphi_{m,n} = W \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{m,n} + \frac{4\pi}{\lambda} D_{m,n} + \Delta\psi_{atm\ m,n} + \Delta\varphi_{noise\ m,n} \right\}, \quad (1)$$

где  $\Delta r_{m,n}$  – разность расстояний от фазового центра синтезированной апертуры до элемента поверхности с положением («пиксельными координатами»)  $m,n$  на формируемой при обработке интерферограмме,  $\Delta\varphi_{m,n}$  – разность фаз эхосигналов для элемента с положением  $m,n$ ,  $D_{m,n}$  – изменение наклонной дальности за счет смещения элемента поверхности между съемками (при двухпроходной съемке),  $\Delta\psi_{atm\ m,n}$  – дополнительная разность фаз, появляющаяся при изменении условий распространения радиоволн в атмосфере за период между съемками [11-13],  $\Delta\varphi_{noise\ m,n}$  – фазовый шум, обусловленный частичной потерей когерентности отраженных волн из-за различий ракурсов съемки и изменений отражающей поверхности при двухпроходной съемке (пространственная и временная декорреляции),  $W\{ \}$  – символическая запись свертывания фазы в диапазон  $[-\pi, \pi)$ .

Совокупность разностей фаз всех учитываемых при обработке элементов поверхности  $\{m,n\}$  образует интерферограмму относительной фазы –  $\Delta\varphi(m,n)$ . Для ее получения используются два комплексных радиолокационных изображения (КРЛИ), первое из которых (КРЛИ-1, «master image»,  $\dot{Z}_1$ ) при интерферометрической обработке геометрически не трансформируется, а второе (КРЛИ-2, «slave image»,  $\dot{Z}_2$ ) – совмещается (взаимопривязывается) с ним с использованием корреляционных и интерполяционных методов [11]. Интерферограмма вычисляется следующим образом:

$$\Delta\varphi(m,n) = \arg \left\{ \dot{Z}_1(m,n) \cdot \bar{Z}_2(m,n) \right\}. \quad (2)$$

Для восстановления из  $\Delta\varphi(m,n)$  абсолютной (развернутой) фазы  $\hat{\Psi}(m,n)$ , т.е. гладкой фазовой картины, значения элементов которой не ограничены интервалом  $[-\pi, \pi)$ , необходимо выполнить, по меньшей мере, две операции –

подавление фазового шума (фильтрацию) и развертывание фазы. Также при интерферометрической обработке широко применяются, хотя и не являются обязательными, процедуры устранения фазового набега от известной опорной поверхности («выравнивание»), позволяющей во многих случаях упростить задачу развертывания фазы, и межэлементного некогерентного накопления, которое помимо снижения уровня фазового шума [10-12] позволяет уменьшить размерность данных, увеличивая скорость выполнения последующих этапов обработки (рис. 1).

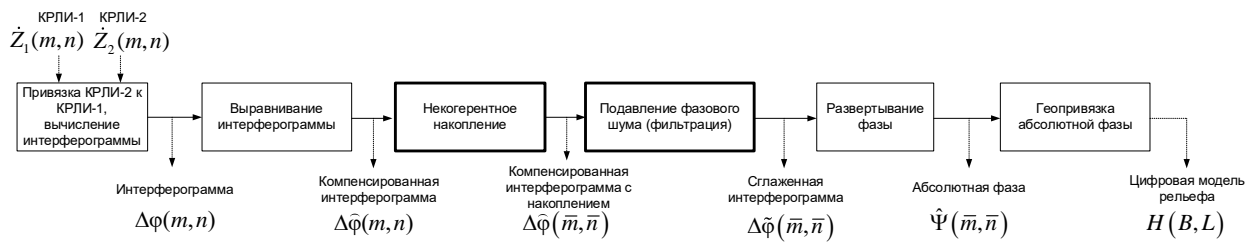


Рис. 1. Последовательность интерферометрической обработки,  $\bar{m} = m / N_A$ ,  $\bar{n} = n / N_R$  – координаты элементов интерферограмм с учетом некогерентного накопления.

Преобразование восстановленной абсолютной фазы в элементы матрицы высот (геопривязка абсолютной фазы) в простейшем случае может быть описано выражением

$$\hat{H}(m,n) = \frac{\hat{\Psi}(m,n)}{2\pi} h_a(m,n) \approx \frac{\lambda R_1(m,n) \sin \theta_0(m,n)}{4\pi B_{\perp}(m,n)} \hat{\Psi}(m,n), \quad (3)$$

в котором геометрические элементы  $\theta_0$  (угол сканирования)  $R_1(m,n)$  (наклонная дальность элемента рельефа) и  $B_{\perp}(m,n)$  (нормальная составляющая интерферометрической базы) должны быть вычислены с исключительно высокой точностью [10,11]. Кроме того, при геопривязке осуществляется коррекция искажений, возникающих вследствие равнодальностной проекции радиолокационного бокового обзора, что предполагает нелинейные преобразования координат элементов интерферограммы  $(m,n)$  в геодезические координаты  $\{B,L\}$  или прямоугольные  $\{x,y\}$ . Поэтому при практическом применении интерферометрической обработки для геопривязки используются

наземные радиолокационные ориентиры (наземных опорные точки)  $\{P_i\}$ , имеющих высокоточные координаты и хорошо опознаваемые на амплитудном радиолокационном изображении (АРЛИ) [14,15]. Их координаты используются для решения систем уравнений «дальность – доплер» для первого и второго КРЛИ:

$$f_{i'd1,2} = \frac{2 \left( (\vec{P}_{i'} - \vec{S}_{i'1,2}), (\vec{v}_{P_{i'}} - \vec{v}_{S_{i'1,2}}) \right)}{\lambda \left| \vec{P}_{i'v} - \vec{S}_{i'1,2} \right|}, \quad (4)$$

$$R_{i'1,2} = \left| \vec{P}_{i'v} - \vec{S}_{i'1,2} \right|$$

где  $f_{i'd1,2}$  – центральные доплеровские частоты элемента 1-го и 2-го КРЛИ,  $\vec{P}_v$  – вектор геоцентрических координат эталонной отметки,  $\vec{P}_{i'} = \{X_{P_{i'}}, Y_{P_{i'}}, Z_{P_{i'}}\}^T$ ,  $\vec{S}_{i'1,2}$  – вектор геоцентрических координат фазового центра синтезированной апертуры для строки 1-го и 2-го КРЛИ [16],  $i'$  – номер ориентира,  $(\cdot, \cdot)$  – оператор вычисления скалярного произведения векторов. Разрешая систему относительно  $\vec{S}_{i'1,2}$ , становится возможным высокоточное вычисление геометрических элементов из (3) и собственно матрицы рельефа  $\hat{h}(m, n)$ .

Основным и практически единственно используемым подходом к оцениванию точности интерферометрической обработки является сравнение по критерию среднеквадратичного отклонения (с.к.о.) высот полученного результата обработки – цифровой модели рельефа – с эталонным рельефом, который может быть представлен матричной ЦМР или набором отдельных эталонных высотных точек, полученных при топографическом нивелировании или по результатам спутниковых радионавигационных измерений. Существенным недостатком такого подхода является необходимость полного выполнения процедуры интерферометрической обработки при заранее выбранных алгоритмах и фиксированном наборе их параметров, что не позволяет выделить вклады отдельных этапов обработки (некогерентного накопления, подавления фазового шума, развертывания фазы) в итоговую ошибку и усложняет оптимизацию и повышение эффективности процесса интерферометрической обработки. Предлагаемые метод обратного

преобразования эталонных высот и основанная на нем методика оценивания точности восстановления абсолютной фазы при интерферометрической обработке в значительной мере преодолевают указанный недостаток, позволяя не только оценивать результаты отдельных этапов обработки, но и упрощая анализ чувствительности результатов к изменению параметров алгоритмов интерферометрической обработки.

## 2. Метод обратного преобразования эталонных высот

Предлагаемый метод заключается в преобразовании координат эталонных высотных отметок  $\{B_i, L_i, H_{0i}\}$  из географической системы координат «широта ( $B$ ) – долгота ( $L$ ) – геодезическая высота ( $H_0$ )» в систему координат «азимут – наклонная дальность»  $\{\bar{m}_i, \bar{n}_i, H_{0i}\}$  первого комплексного радиолокационного изображения (КРЛИ-1) и вычислении параметров связи восстановленных абсолютных фаз, соответствующих положениям эталонных отметок, и эталонных высот с помощью метода наименьших квадратов. Преобразование координат основывается на использовании уравнений «дальность – доплер» (4) с разрешением их относительно величины наклонной дальности и момента времени съемки элемента КРЛИ с учетом модели движения носителя [17,18]. Этот или аналогичный ему процесс реализован в модулях «Map to Slant/Ground Conversion» программного комплекса SARscape, в модуле Geocoding Processor пакета PHOTOMOD Radar, которые могут быть использованы для реализации данной процедуры. Применяемые в расчетах значения наклонных дальностей КРЛИ, центральных доплеровских частот (а также коэффициентов их зависимости от номера столбца изображения) и элементов орбиты носителя, как правило, содержатся в описании (метаданных) самого КРЛИ и используются указанными программными комплексами при геометрических преобразованиях и привязке изображений.

Для контроля правильности преобразования и оценки погрешностей преобразованных координат целесообразно использовать контрольные точки (наземные радиолокационные ориентиры) – элементы местности с достаточно

точно известными координатами, хорошо опознаваемые на амплитудном РЛИ (АРЛИ)  $\{\tilde{m}_i, \tilde{n}_i\}$  (рис. 2). При появлении расхождений преобразованных координат ориентиров  $\{\Delta\tilde{m}_i, \Delta\tilde{n}_i\}$ , превосходящих по величине 5-10 элементов разрешения КРЛИ (в любом направлении), целесообразно произвести дополнительную коррекцию координат с использованием аффинного преобразования.

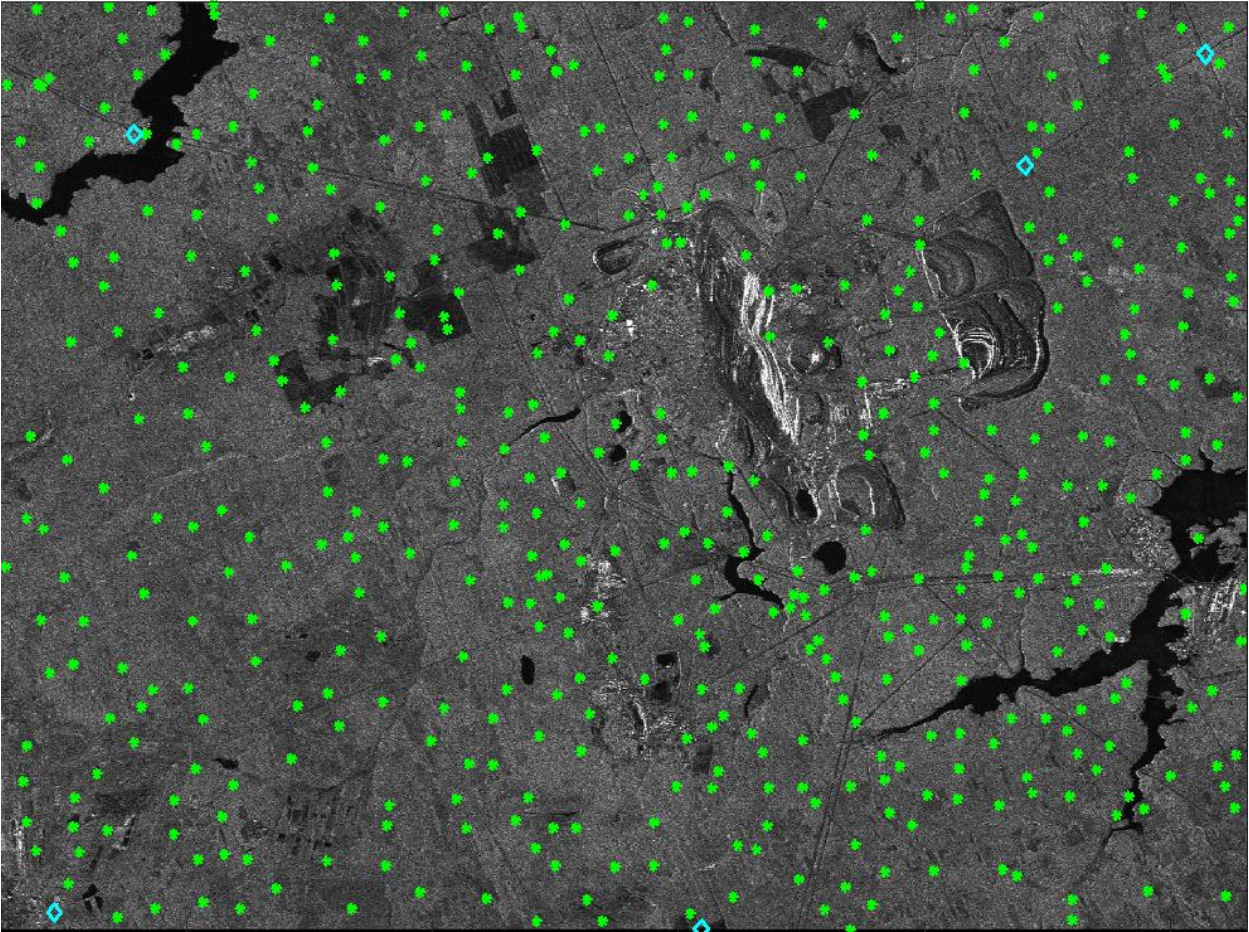


Рис. 2. Расположение элементов набора эталонных высот («\*») и наземных радиолокационных ориентиров («◇»).

Восстановленные абсолютные фазы  $\{\hat{\Psi}_i(\bar{m}_i, \bar{n}_i)\}$  пропорциональны эталонным высотам  $\{H_{0i}(\bar{m}_i, \bar{n}_i)\}$  с коэффициентами  $h_{ai}(\bar{m}_i, \bar{n}_i) / 2\pi$  (с точностью до ошибок измерения), где  $h_a$  – высота неоднозначности [10] и для оценивания точности восстановления абсолютной фазы можно было бы преобразовать эталонные высоты в эталонные фазы:  $\{\Psi_{0i}\} = 2\pi\{H_{0i}\} / \{h_{ai}\}$  или преобразовать



восстановленные фазы в измеренные высоты:  $\{H_i\} = \{h_{ai}\} \cdot \{\Psi_i\} / 2\pi$ . Однако вследствие неточностей определения параметров орбит носителей, и, как следствие, приближенного вычисления  $h_{ai}(\bar{m}_i, \bar{n}_i)$  и компенсирующей фазовой функции, используемой на этапе выравнивания фазы, восстановленная абсолютная фаза будет иметь ярко выраженные перекосы и дополнительные искажения, вносящие систематическую погрешность в результаты измерения. Следовательно, для оценивания точности восстановления абсолютной фазы целесообразно использовать не значения высот неоднозначности, а вычислить параметры связи непосредственно из значений  $\{\hat{\Psi}_i(\bar{m}_i, \bar{n}_i)\}$  и  $\{H_{0i}(\bar{m}_i, \bar{n}_i)\}$ , сформировав линейные преобразования эталонных высот в эталонные абсолютные фазы (5) и восстановленных абсолютных фаз в измеренные высоты (6):

$$\Psi_{0i} = \hat{U}_H H_{0i} + \hat{U}_m \bar{m}_i + \hat{U}_n \bar{n}_i + \bar{\Psi}_0, \quad (5)$$

$$\hat{H}_i = \hat{V}_\Psi \hat{\Psi}_i + \hat{V}_m \bar{m}_i + \hat{V}_n \bar{n}_i + \bar{H} \quad (6)$$

где  $\hat{U}_H, \hat{U}_m, \hat{U}_n$  – оценки коэффициентов масштабного искажения высот и углов перекоса фазы вдоль координат  $m$  и  $n$ ;  $\hat{V}_\Psi, \hat{V}_m, \hat{V}_n$  – оценки коэффициентов масштабного искажения фаз и углов перекоса высот вдоль координат  $\bar{m}$  и  $\bar{n}$ ,  $\bar{\Psi}_0$  – оценка среднего значения эталонной фазы,  $\bar{H}$  – оценка среднего значения измеренной высоты.

Экспериментальный расчет коэффициентов  $\hat{U}_H, \hat{U}_m, \hat{U}_n$  и/или  $\hat{V}_\Psi, \hat{V}_m, \hat{V}_n$  целесообразно произвести, решая переопределенные системы уравнений (5) и (6) методом наименьших квадратов:

$$\begin{pmatrix} \hat{U}_H \\ \hat{U}_m \\ \hat{U}_n \\ \bar{\Psi}_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{01} & \bar{m}_1 & \bar{n}_1 & 1 \\ H_{02} & \bar{m}_2 & \bar{n}_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ H_{0N} & \bar{m}_N & \bar{n}_N & 1 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_1 \\ \hat{\Psi}_2 \\ \dots \\ \hat{\Psi}_N \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} \hat{V}_H \\ \hat{V}_m \\ \hat{V}_n \\ \overline{H} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_1 & \overline{m}_1 & \overline{n}_1 & 1 \\ \hat{\Psi}_2 & \overline{m}_2 & \overline{n}_2 & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \hat{\Psi}_N & \overline{m}_N & \overline{n}_N & 1 \end{pmatrix}^{-1} \times \begin{pmatrix} H_{01} \\ H_{02} \\ \dots \\ H_{0N} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где  $N$  – размер массива эталонных высотных отметок.

Если трактовать абсолютную фазу не просто как развернутую интерферограмму, а именно как фазу, пропорционально связанную с высотой рельефа и учитывающую постоянный сдвиг и перекосы вдоль координат интерферограммы, то ее можно выразить из формулы (6) следующим образом:

$$\hat{\Psi}_i = \hat{\Psi}_i + \frac{\hat{V}_m \overline{m}_i + \hat{V}_n \overline{n}_i + \overline{H}}{V_\Psi}, \quad (9)$$

где коэффициент  $V_\Psi$  приобретает смысл некоторой приведенной высоты неоднозначности  $\hat{h}_a$ , деленной на  $2\pi$ . При этом:

$$\hat{H}_i = V_\Psi \hat{\Psi}_i = \frac{\hat{\Psi}_i}{2\pi} \cdot \hat{h}_a. \quad (10)$$

Для космических радиолокационных данных компенсации одних только линейных перекосов будет недостаточно, как минимум, из-за влияния кривизны Земли, поэтому целесообразно в формулах (7,8) учесть также квадратичные составляющие перекоса фазы, введя также слагаемые, зависящие от  $m^2$ ,  $n^2$  и  $m \cdot n$ :  $\hat{U}_{m2}, \hat{U}_{n2}, \hat{U}_{mn}$  и  $\hat{V}_{m2}, \hat{V}_{n2}, \hat{V}_{mn}$ , соответственно, матрицы в этих уравнениях будут иметь размерность  $N \times 7$ . Такой способ преобразования позволяет устранять систематическую ошибку восстановленной абсолютной фазы аналогично тому, как это происходит при ее геокодировании. Результаты дальнейшего оценивания будут адекватны тем, что будут получены при оценивании точности цифровой модели рельефа в географической системе координат с той лишь разницей, что в них не будет присутствовать составляющая ошибки, обусловленная процедурой геокодирования абсолютной фазы. Таким образом, метод позволит производить оценку точности восстановления абсолютной фазы алгоритмами интерферометрической

обработки на любом этапе интерферометрической обработки и в условиях неточной информации об орбитальном движении носителя РСА.

Используя рассчитанные оценки коэффициентов (7,8) в формулах (5, 6) и получив наборы измеренных высот и эталонных абсолютных фаз, можно реализовать вычисление следующих критериев точности восстановления абсолютной фазы:

- среднеквадратичное отклонение высот в бортовой системе координат  $\sigma_H$  :

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \hat{H}_i(\bar{m}_i, \bar{n}_i) - H_{0i}(\bar{m}_i, \bar{n}_i) \right)^2} \quad (11),$$

которое позволяет оценивать точность результата интерферометрической обработки в целом (за исключением геокодирования);

- среднеквадратичное отклонение абсолютной фазы  $\sigma_\Psi$  :

$$\sigma_\Psi = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left( \hat{\Psi}_i(\bar{m}_i, \bar{n}_i) - \Psi_{0i}(\bar{m}_i, \bar{n}_i) \right)^2} \quad (12)$$

которое позволяет охарактеризовать точность результатов различных алгоритмов обработки в совокупности и алгоритмов развертывания фазы в частности;

- для оценивания качества подавления фазового шума возможно использовать величину с.к.о. разностного фазового угла сглаженной и эталонной фаз  $\sigma_{\delta\varphi}$ , вычисляемого следующим образом:

$$\sigma_{\delta\varphi} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\delta\varphi_i)^2} \quad (13)$$

где:

$$\delta\varphi = \arg \left\{ \frac{\exp \left[ j \left( \Delta\varphi(\bar{m}_i, \bar{n}_i) - \Psi_{0i}(\bar{m}_i, \bar{n}_i) \right) \right]}{\exp \left[ j \left( \overline{\Delta\varphi(\bar{m}_i, \bar{n}_i)} - \overline{\Psi_{0i}(\bar{m}_i, \bar{n}_i)} \right) \right]} \right\} \quad (13')$$

где, в свою очередь,  $\overline{\Delta\varphi(\bar{m}_i, \bar{n}_i)}$  и  $\overline{\Psi_{0i}(\bar{m}_i, \bar{n}_i)}$  – средние значения фаз.

### 3. Методика оценивания точности восстановления абсолютной фазы

Методика оценивания разработана позволяет оценивать точность восстановления фазы при различных наборах параметров алгоритмов обработки, при этом в вычислениях минимальным образом используются значения параметров движения носителя, известные, как правило, с большой погрешностью. Ее результатом являются экспериментальные зависимости среднеквадратичного отклонения измеренных и эталонных абсолютных высот  $\sigma_H$  и среднеквадратичного отклонения восстановленной и эталонной абсолютных фаз  $\sigma_\varphi$ , полученные при различных комбинациях алгоритмов обработки, их параметров и условий обработки. Методика оценивания включает следующие этапы.

1. **Формирование набора исследуемых алгоритмов** развертывания фазы  $ALG\_U_j$ , выбор алгоритма подавления фазового шума  $ALG\_F$  и набора значений его варьируемого параметра  $p_k^F$ .

2. **Подготовка эталонных данных**, которая включает отбор элементов набора эталонных высот  $\{B_i, L_i, H_i\}$ , попадающих в границы кадра. Системы координат и высот эталонных отметок должны быть приведены к системе геодезических координат, используемой бортовой навигационной аппаратурой носителя РСА (как правило, WGS-84), для чего в соответствии с правилами, принятыми в инженерной геодезии [19], значения высот преобразуются из нормальной системы (БСВ-77 или др.) в систему геодезических высот путем учета аномалий, а значения координат преобразуются из с.к. СК-42/СК-95 (или других) к с.к. WGS-84 (широта-долгота-геодезическая высота). Для последующей коррекции результатов преобразования координат в систему «азимут – наклонная дальность» из эталонного набора отбираются 7-10 радиолокационных ориентиров, хорошо опознаваемых на АРЛИ-1.

3. **Предварительная интерферометрическая обработка радиолокационных данных**, которая включает взаимопривязку КРЛИ, формирование интерферограммы и компенсацию фазового набега

интерферограммы от опорной поверхности с использованием орбитальных параметров из метаданных КРЛИ.

4. **Преобразование** координат эталонных высот к системе координат изображения КРЛИ-1 и проверка расхождений координат с помощью набора радиолокационных ориентиров. При существенном (более 5-10 элементов разрешения) расхождении положений ориентиров и их преобразованных координат – выполнение коррекции координат с использованием аффинного преобразования.

5. **Выполнение интерферометрической обработки** с использованием параметра алгоритма подавления фазового шума ALG\_F с параметром  $p_k^F$  и развертывание фазы исследуемым алгоритмом ALG\_U<sub>j</sub>. В результате будет получена двумерная абсолютная фаза  $\hat{\Psi}(\bar{m}, \bar{n})$ :

$$\hat{\Psi}^{(j,k)}(\bar{m}, \bar{n}) = \left( \text{ALG\_U}_j \left( \text{ALG\_F}(\Delta\tilde{\phi}(\bar{m}, \bar{n})) \Big|_{p_k^F} \right) \right). \quad (14)$$

6. **Выборка** из интерферограммы двумерной абсолютной фазы значений, соответствующих положениям эталонных высотных отметок:

$$\hat{\Psi}^{(j,k)}(\bar{m}, \bar{n}) \rightarrow \left\{ \hat{\Psi}_i^{(j,k)}(\bar{m}_i, \bar{n}_i) \right\} \quad (15)$$

7. **Вычисление параметров обратного преобразования**  $\hat{V}_\Psi, \hat{V}_m, \hat{V}_n, \hat{V}_{m2}, \hat{V}_{n2}, \hat{V}_{mn}$  (для построения характеристик  $\sigma_H^{(j,k)}$ ) или  $\hat{U}_H, \hat{U}_m, \hat{U}_n, \hat{U}_{m2}, \hat{U}_{n2}, \hat{U}_{mn}$  (для построения характеристик  $\sigma_\Psi^{(j,k)}$ ) восстановленных фаз и эталонных высот и выполнение процедур метода обратного преобразования эталонных высот по формулам (7,8).

8. **Вычисления** с.к.о. абсолютных фаз  $\sigma_\Psi^{(j,k)}$  или абсолютных высот  $\sigma_H^{(j,k)}$ .

Шаги 4-8 повторяются для каждого исследуемого алгоритма ALG\_U<sub>j</sub> и каждого значения параметра  $p_k^F$ .

9. **Построение экспериментальных характеристик точности восстановления абсолютной фазы.** Полученные значения с.к.о. для всех

алгоритмов развертывания фазы группируются в семейство графиков  $\sigma_{\Psi}^{(j)}(p_k^F)$  или  $\sigma_H^{(j)}(p_k^F)$ .

**10. Анализ полученных результатов** для определения алгоритмов, обеспечивающих минимальное значение с.к.о. абсолютной фазы / абсолютной высоты.

Для оценивания эффективности подавления фазового шума отдельно от оценивания эффективности развертывания фазы необходимо получение в том или ином виде эталона относительной фазы, для чего, в свою очередь, потребуется использование параметра высоты неоднозначности  $h_a$ , вычисляемой по орбитальным параметрам, либо ее оценки, которую можно получить, используя параметр  $\hat{V}_{\Psi}$ . Однако, как будет показано далее (рис. 5), характеристики точности для алгоритмов подавления фазового шума имеют иные положения минимумов, что обусловлено меньшим диапазоном значений относительной фазы. Это означает, что исследование точности результата подавления фазового шума в отрыве от оценивания точности результата развертывания фазы нецелесообразно.

Приведенная методика применяется к конкретной интерферометрической паре, и для получения статистически обоснованных выводов об эффективности обработки и оптимальных значениях параметров желательно проводить усреднение результатов анализа для серий интерферометрических пар конкретного радиолокационного датчика и конкретных режимов съемки.

#### 4. Эксперимент

Предложенная методика применялась для оценивания эффективности интерферометрической обработки радиолокационных данных на примере интерферометрической пары  $L$ -диапазона ALOS PALSAR. Исследуемые радиолокационные данные представлены тремя образцами – интерферометрическими парами КРЛИ разных местностей. Характеристики данных и важных условий съемки представлены в таблице 1. Все снимки

получены в горизонтальной (ГГ) поляризации, в летний сезон, временной интервал между съемками – 46 дней.

Эталонные высотные отметки рельефа местностей-полигонов получены из цифровых топографических карт масштаба 1:100 000. в количестве не менее 1400 на сцену и равномерно ее покрывают; отметки имеют вертикальную точность не хуже 1 м и плановую – не хуже 30 м, что с учетом межэлементного некогерентного накопления при обработке кадров составляет не более 1-2 элементов разрешения. Экспериментальная оценка преобразованных координат с помощью радиолокационных ориентиров показала их приемлемую точность, при этом максимальное расхождение составило 2..3 элемента разрешения (с учетом некогерентного накопления).

Поскольку вопросы эффективности алгоритмов подавления фазового шума ранее рассматривались в [20], сосредоточимся на рассмотрении эффективности алгоритмов развертывания фазы. При экспериментальном исследовании для некогерентного накопления использовалось обычное невзвешенное суммирование соседних элементов КРЛИ, для подавления фазового шума – двумерный гауссовый фильтр, реализованный в частотной области, с амплитудно-частотной характеристикой вида:

$$K(k,l) = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[ \left( \frac{k - \bar{M}/2}{F_s} \right)^2 + \left( \frac{l - \bar{N}/2}{F_s} \right)^2 \right] \right\} \quad (16)$$

где  $\bar{M}, \bar{N}$  – размеры интерферограммы,  $k, l$  – пространственные частоты,  $k = \left[ -\bar{M}/2 \dots \bar{M}/2 - 1 \right]$ ,  $l = \left[ -\bar{N}/2 \dots \bar{N}/2 - 1 \right]$ . Варьируемыми параметрами фильтра являлась частота среза:  $p_k^F \rightarrow F_{sk}$ . Исследовалась точность работы трех алгоритмов развертывания фазы – алгоритма функций Грина [21], алгоритма наименьших квадратов (невзвешенного) и алгоритма минимальной стоимости потока [22,23].

Результаты построения характеристик точности обработки по вертикальной высоте для разных сцен представлены на рис. 3. Для сцены 3

характеристика построена только для алгоритма минимальной стоимости потока, поскольку развертывание остальными методами завершилось неудачно.

Таблица 1. Параметры исследуемых сцен.

№ сцены	Режим съемки	Пространственное разрешение азимут $\times$ накл. дальность)	Кол-во эталонных высотных отметок	$h_a$ (средняя), м	Ширина спектра интерферограммы, отн. ед.	Площадь кадра, тыс. кв. км	коэффициент некоррентного накопления (азимут $\times$ накл. дальность)	Исходная размерность сцены (до некоррентного накопления)	Тип рельефа	С.к.о. эталонных высот (геодезических), м
1	FBD (НН)	15,0 $\times$ 3,1	1469	18	130 $\times$ 160	4	8 $\times$ 2	17800 $\times$ 4300	холмистый	200,5
2	FBS	7,5 $\times$ 3,1	1890	60	120 $\times$ 110	5,5	8 $\times$ 4	21700 $\times$ 10500	холмистый	211,4
3	FBS	7,5 $\times$ 3,1	2042	45	180 $\times$ 190	5,5	8 $\times$ 4	22000 $\times$ 10600	низкогорный	741,1

Из полученных результатов видно, что алгоритмы функций Грина и минимальной стоимости потока работают относительно устойчиво: графики, как правило, плавные и имеют выраженные минимумы при значениях частоты среза  $F_s$  150-300 отн. ед. При малых частотах среза характеристики стремятся к величине, равной среднеквадратичному отклонению эталонных высот от средней плоскости. При этом алгоритм минимальной стоимости потока показал наилучшие результаты во всех трех случаях, за исключением сцены № 1, где при интервале значений частоты среза АЧХ 150-170 отн. ед. возникает срыв развертывания и появление расползающейся ошибки (рис. 4). Алгоритм наименьших квадратов работает менее устойчиво: характеристики имеют изломы, а ширина области, в которой достигаются лучшие значения точности, уже, чем у двух первых алгоритмов.

Оптимальные значения частоты среза АЧХ фильтра фазового шума для первых двух сцен приблизительно одинаковы, несмотря на то, что они получены в разных режимах съемки, и составляют порядка 200 отн. ед., для 3-й сцены, где преобладает низкогорный рельеф, оптимальная частота среза составляет 300 отн. ед. Следует отметить отсутствие явной связи оптимального



значения частоты и ширины амплитудного спектра интерферограммы (табл. 1), однако при использовании значений, превышающих оптимальные даже в несколько раз, ухудшение точности невелико и составляет от 1 м (при  $F_S = 400$  для сцены №1) до 3 м (при  $F_S = 600$  для сцены №3). Это обстоятельство облегчает выбор этого параметра при интерферометрической обработке, по крайней мере, для данных  $L$ -диапазона.

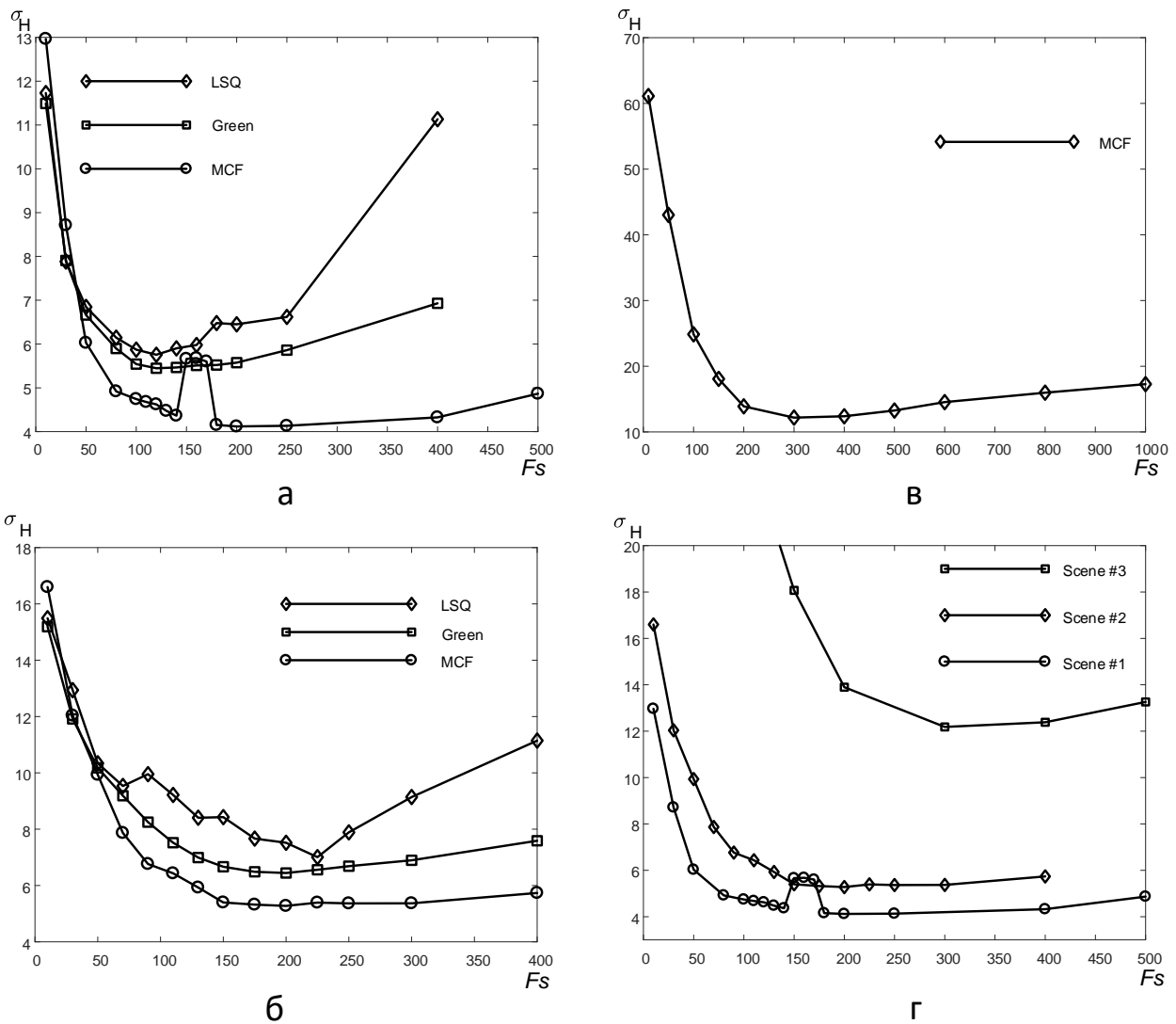


Рис 3. Характеристики точности восстановления абсолютной фазы  $\sigma_H^{(j,k)}$  при развертывании методами наименьших квадратов (LSQ), функций Грина (Green), минимальной стоимости потока (MCF): сцена #1 (а), сцена #2 (б), сцена #3 (в), сцены #1-3 при использовании метода MCF (г).

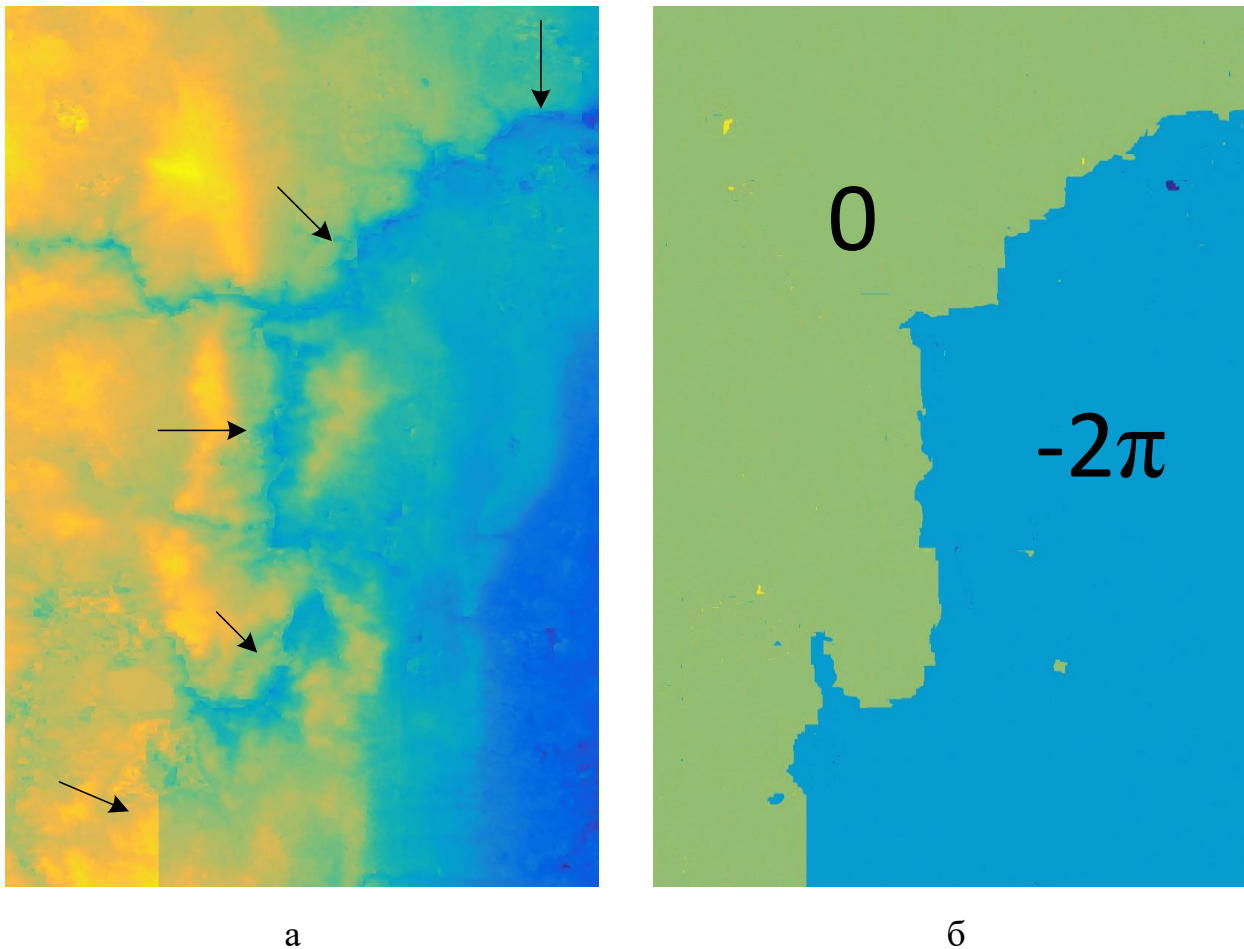


Рис. 4. Ошибка разворачивания сцены #1 при использовании метода MCF: восстановленная абсолютная фаза (а), поле ошибки (б).

Рассмотрим поведение аналогичных характеристик для абсолютной фазы (рис. 5), а также характеристик для относительной фазы, построенных с по методике, описанной в конце предыдущего раздела. Для построения характеристик относительной фазы использовались параметры преобразования (7), полученные на основании предыдущего эксперимента при комбинации условий, обеспечивающих наилучшее значение точности (алгоритм минимальной стоимости потока для разворачивания фазы, фильтрация при  $F_S = 200$  для сцен № 1 и № 2 и  $F_S = 400$  для сцены 3).

Следует отметить следующую особенность поведения характеристики: при малых (но ненулевых) значениях полосы пропускания фильтра характеристика спадает к нулю (5). При этом положения минимумов характеристик фаз и высот совпадают, что говорит о возможности

использования любой из этих характеристик для поиска оптимальных значений параметров обработки.

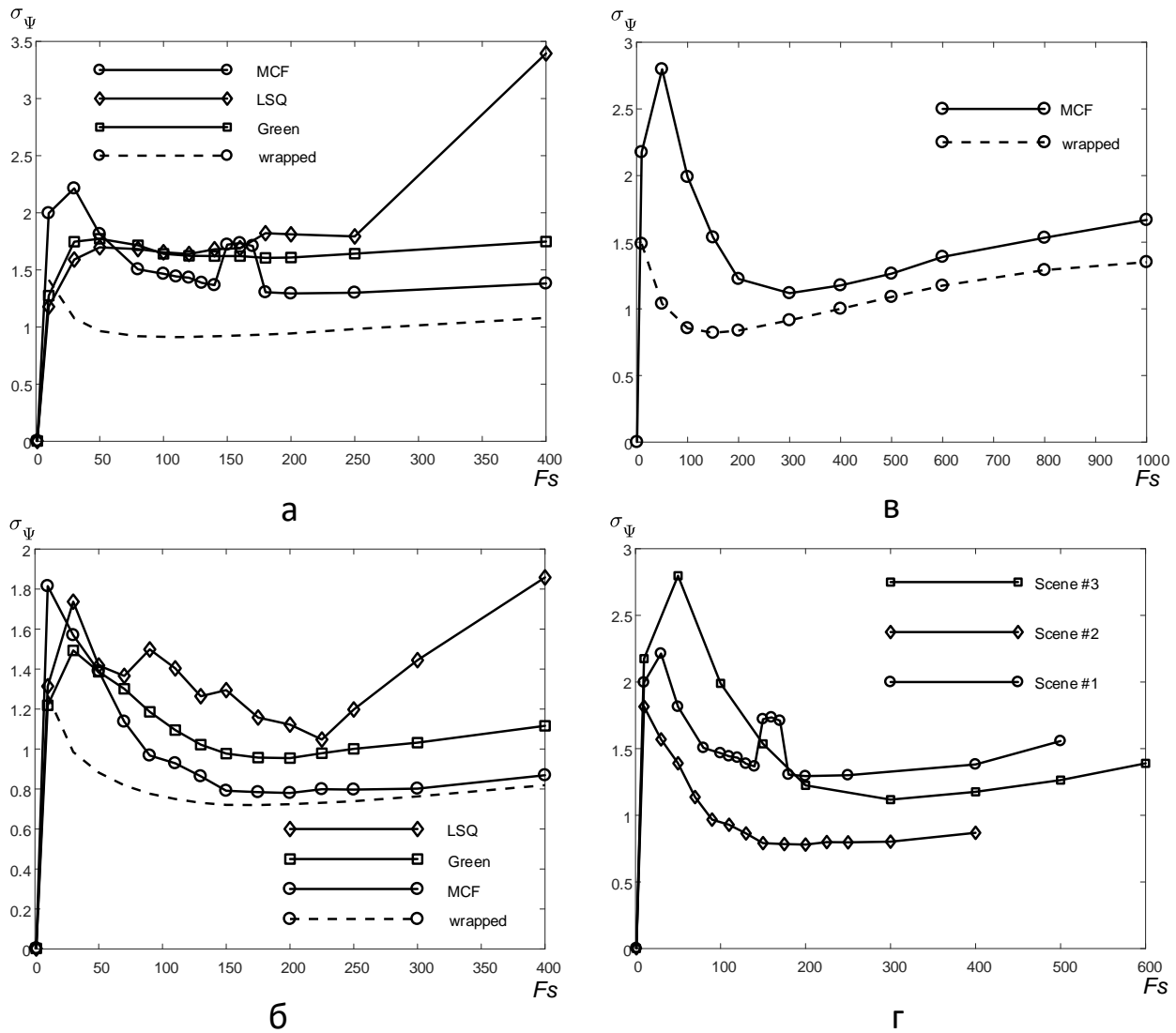


Рис. 5. Характеристики точности восстановления абсолютной фазы  $\sigma_{\Psi}^{(j,k)}$  при развертывании методами наименьших квадратов (LSQ), функций Грина (Green), минимальной стоимости потока (MCF): сцена #1 (а), сцена #2 (б), сцена #3 (в), сцены #1-3 при использовании метода MCF (г).

Поведение характеристики точности для относительной фазы в целом повторяет поведение характеристики абсолютной фазы, однако ее минимум имеет иное положение, причем это положение определяется индивидуальными характеристиками сцены, что делает ее непригодной для оценки оптимальных значений параметров обработки. Тем не менее, с ее помощью можно оценить влияние артефактов развертывания на точность восстановленной абсолютной

фазы путем вычитания характеристики точности относительной фазы из характеристики для абсолютной (рис. 6-а).

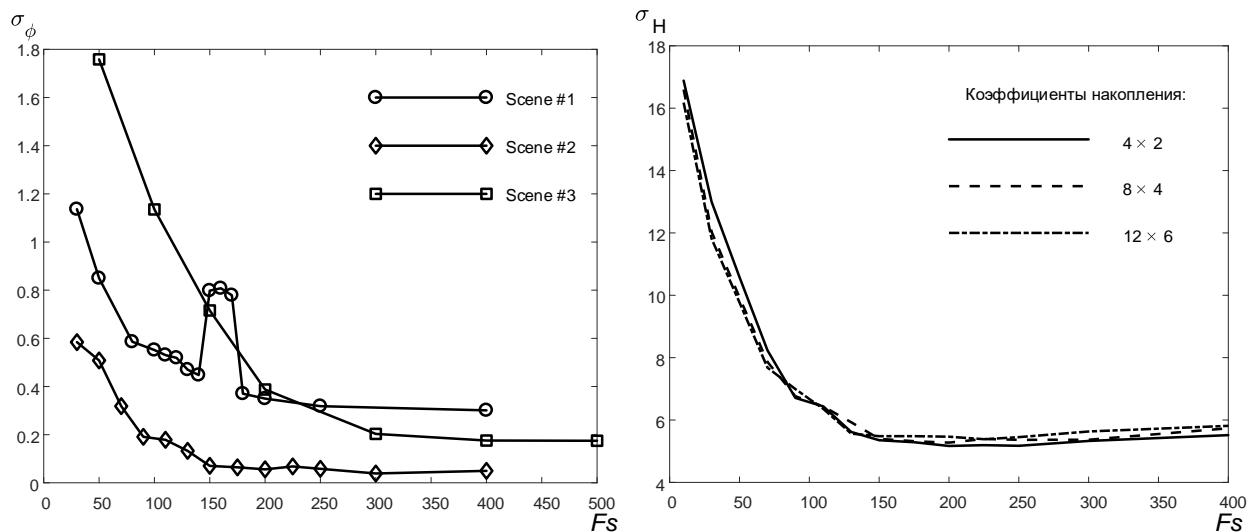


Рис. 6. Разность абсолютной и относительной фаз (при развертывании фаз по методу MCF) (а); характеристики точности некогерентного накопления (для сцены #2) (б).

Из рисунка можно видеть, что построенные таким образом разностные характеристики имеют минимальные значения в диапазоне 0,05 – 0,35 рад, что при пересчете к величинам высот составит от 0,5 до 1 м и составляет небольшую долю от общей величины ошибки.

Наконец, рассмотрим влияние некогерентного накопления на точность восстановления абсолютной фазы, используя сцену № 2, гауссовый фильтр для подавления фазового шума и алгоритмом MCF для развертывания фазы. Ограничимся случаем, когда коэффициенты накопления по азимуту и наклонной дальности находятся в одинаковом соотношении друг к другу: 6×3, 8×4 и 12×6. По полученным на рис. 6-б характеристикам можно сделать вывод, что некогерентное накопление при одинаковых пропорциях между коэффициентами накопления по азимуту и наклонной дальности не оказывает существенного влияния на точность получаемого результата.

## Заключение

Предложена методика оценивания точности восстановления абсолютной фазы при интерферометрической обработке данных РСА и с ее использованием

произведено оценивание точности результатов некогерентного накопления, подавления фазового шума и развертывания фазы на примере радиолокационных данных  $L$ -диапазона ALOS PALSAR. Для исследуемых наборов радиолокационных данных точность полученных цифровых моделей рельефа по критерию среднеквадратичного отклонения высот составила от 4,1 м для сцен с холмистым рельефом до 12,0 м – для сцен с низкогорным рельефом. Экспериментально определен диапазон оптимальных значений частоты среза гауссового фильтра фазового шума. Показано, что наиболее точное развертывание фазы обеспечивается алгоритмом, работающим по методу минимальной стоимости потока. Также показано, что изменение коэффициентов некогерентного накопления при сохранении пропорциональности между ними практически не влияет на точность получаемого результата. Разработанная методика может быть использована для исследования влияния иных условий, факторов и параметров на эффективность интерферометрической обработки.

Съемочные данные ALOS PALSAR и эталонные картографические материалы на исследуемые участки предоставлены ОАО «Уралгеоинформ» (г. Екатеринбург).

### Литература

1. Груздов В.В., Колковский Ю.В., Криштопов А.В., Кудря А.И. *Новые технологии дистанционного зондирования Земли из космоса*. Москва: ТЕХНОСФЕРА. 2018. 482 с.
2. Захаров А.И., Костюк Е.А., Денисов П.В., Бадак Л.А. Космическая радиолокационная интерферометрическая съемка Земли и ее перспективы в рамках проекта «КОНДОР-ФКА». *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2019. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.1.2>
3. Карнышев В.И., Авдзейко В.И., Паскаль Е.С. Особенности патентного анализа радиолокационных систем различного назначения с использованием ресурсов патентного ведомства США. *Журнал радиоэлектроники*

[электронный журнал]. 2021. №1. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.1.4>

4. Сосновский А.В. Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020. № 4(2). С.198–233.  
<https://doi.org/10.15826/urej.2020.4.2.004>
5. Berry P.A.M., Garlick J.D., Smith R.G. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*. 2007. №1. С.17–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.011>
6. Brown Jr.C.G., Sarabandi K., Pierce L.E. Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. №8. P.1707–1715. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.851789>
7. Lee I.S., Chang H.-C., Ge L. GPS Campaigns for Validation of InSAR Derived DEMs. *Journal of Global Positioning Systems*. 2005. №1-2. P.82–87. <https://doi.org/10.5081/jgps.4.1.82>
8. Lucau C., Moreau B., Le Boulengé E., Defourny P. A priori accuracy assessment of the DEM derived by InSAR. *Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*. 2002. P.273–278.
9. Sun G., Ranson K.J., Kharuk V.I., Kovacs K. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment*. 2003. №4. P.401–411. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.09.001>
10. Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *IEEE Proc*. 2000. №88(3). P.333–382
11. Hanssen R.F. *Radar interferometry. Data interpretation and error analysis*. Dordrecht: Kluwer academic publishers. 2002. 308 p.
12. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. Москва, Радиотехника. 2010. 680 с.

13. Антонов И.К., Детков А.Н., Ницак Д.А., Тонких А.Н., Цветков О.Е. *Воздушная разведка. Автоматизированное дешифрирование радиолокационных изображений. Монография.* Москва, Радиотехника. 2021. 296 с.
14. Атрошенко Л.М., Горобец Н.Н., Красногорский М.Г., Малюков В.М. Опыт создания полигонно-калибровочного комплекса для радиолокатора с синтезированной апертурой космического базирования. *Вестник СибГАУ.* 2013. №5(51). С.30–32.
15. Лепехина Т.А., Николаев В.И., Семенов М.А., Чарыков И.В., Чикачев В.С. Оборудование радиолокационного полигона для калибровки и валидации космических радаров с синтезированной апертурой. *Вестник СибГАУ.* 2013. №5(51). С.26–29.
16. Holecz I.F., Moreira J.H., Pasquali P., Voigt S., Meier E., Nuesch D. Height model generation, automatic geocoding and mosaicing using airborne AeS-1 InSAR data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing – A Scientific Vision for Sustainable Development.* 1997. №4. P.1929–1931. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1997.609148>
17. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems.* 1998. №4. P.1–54. <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>
18. *Описание модуля Photomod RADAR. Описание интерферометрического процессора. Части 1–4.* Москва, ЗАО «Ракурс», 2007.
19. *Руководство пользователя по выполнению работ в системе координат 1995 года (СК-95) ГКИНП (ГНТА)–06-278-04.* Москва, ЦНИИГАИК. 2004. 88 с.
20. Sosnovsky A.V., Kobernichenko V.G. An Efficiency Estimation for Multilooking and Phase Noise Suppression Methods for Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars Data Processing. *Proceedings of the 14th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2018.* 2018. P.434–438.

21. Fornaro G., Franceschetti G., Lanari R. Interferometric SAR phase unwrapping using Green's formulation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1996. Vol.34. No.3. P.720–727.
22. Costantini M. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. 1998. No.36. P.813–821.
23. Chen C.W., Zebker H.A. Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: Intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 2000. Vol.17. No.3. P.401–414.

**Для цитирования:**

Сосновский А.В. Оценивание точности восстановления абсолютной фазы при интерферометрической обработке данных радиолокаторов с синтезированной апертурой. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №.7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.7.9>