

Методика исследования точности восстановления абсолютной фазы при интерферометрической обработке радиолокационных данных

А.В. Сосновский¹, В.Г. Коберниченко¹

¹Уральский федеральный университет, Мира 19, Екатеринбург, Россия, 620002

Аннотация. Экспериментальное исследование эффективности алгоритмов интерферометрической обработки радиолокационных данных осложняется тем, что количественный результат может быть получен только после завершения всей процедуры обработки, поэтому сложно оценить эффективность её начальных этапов. Предложен метод экспериментальной оценки точности результатов интерферометрической обработки различными алгоритмами развертывания фазы с совмещением съемочных и эталонных данных, не требующим использования параметра высоты неоднозначности. Представлены результаты реализации метода для данных ALOS PALSAR применительно к местностям с холмистым и низкогорным рельефом. Получены оценки вертикальной точности интерферометрических данных ALOS PALSAR при развёртывании фазы алгоритмами Region Growing и Minimal Cost Flow, реализованными в программном комплексе SARscape.

1. Введение

Цифровые модели рельефа (ЦМР) и карты смещений рельефа широко используются при создании и обновлении высотной основы цифровых топографических карт различных масштабов, при экологическом мониторинге зон проведения работ по добыче полезных ископаемых, контроле состояния транспортных коммуникаций [1-9]. Космическая радиолокационная интерферометрия (InSAR/DInSAR), позволяет получать оба вида высотной информации. Её суть состоит в совместной обработке фазовых полей, полученных при съемке радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) одного и того же участка местности одновременно двумя разнесенными антенными системами, либо одной антенной на двух смежных витках орбиты.

Развертывание фазы (восстановление абсолютной фазы) является ключевым этапом интерферометрической обработки данных радиолокационного зондирования Земли (ДЗЗ), поскольку его невыполнение в подавляющем большинстве случаев не позволит получить осмысленного и пригодного к практическому использованию результата. Основной проблемой при развертывании фазы является существование областей разрыва фазы на интерферограммах, из-за чего однозначного решения данной задачи не существует [3-5]. Различные методы и алгоритмы развертывания фазы по-разному разрешают неоднозначности, возникающие вследствие разрывов фазы, и в области обработки радиолокационных данных ДЗЗ актуальной является задача поиска таких алгоритмов, которые наиболее точно восстанавливают

абсолютную фазу, получаемую при измерении рельефа земной поверхности и/или его подвижек.

Целью данной работы является разработка методики экспериментального исследования точности восстановления абсолютной фазы алгоритмами, широко применимыми в программных комплексах обработки радиолокационных данных ДЗЗ, позволяющей оценивать точность получаемой абсолютной фазы без завершения процедуры интерферометрической обработки, а также анализ точности восстановления абсолютной фазы и погрешности измерения высоты рельефа для космических радиолокационных данных L -диапазона (ALOS PALSAR).

2. Методика оценивания точности восстановленной абсолютной фазы после развёртывания

Как отмечалось ранее [11,12], основной сложностью при экспериментальном оценивании точности результатов работы алгоритмов интерферометрической обработки применительно к реальным съемочным данным является необходимость завершения всей процедуры обработки для возможности получения количественных результатов, поскольку эталонные данные – наборы отметок высот или матричные модели рельефа – представлены, как правило, в какой-либо из географических систем координат. Для разрешения указанной сложности было предложено использовать метод обратного преобразования эталонных высот [11], который позволяет преобразовать эталонные отметки высот $\{h_{0i}(B_i, L_i)\}$ из географической системы координат в полетную систему координат интерферограммы $\{h_{0i}(m_i, n_i)\}$, что дает возможность проводить исследование точности восстановления фазы с применением широкого набора алгоритмов при варьировании их различных параметров (как отдельных параметров, так и их совокупностей), поскольку завершения всей цепочки интерферометрической обработки для получения количественного результата уже не требуется.

Критериями точности восстановления абсолютной фазы будут выступать:

- среднеквадратичное отклонение абсолютной фазы в полетной системе координат – σ_Ψ :

$$\sigma_\Psi = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i (\hat{\Psi}_i - \Psi_{0i})^2}, \quad (1)$$

где $\hat{\Psi}_i$ – восстановленные абсолютные фазы (съемочные фазы), Ψ_{0i} – эталонные абсолютные фазы, N – количество эталонных высотных точек.

- среднеквадратичное отклонение высот в бортовой системе координат – σ_h :

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_i \left(\hat{\Psi}_i \frac{h_i^A}{2\pi} - h_{0i} \right)^2}, \quad (2)$$

где h_i^A – высота неоднозначности в i -й эталонной высотной точке, h_{0i} – эталонная высота. Характеристика (1) используется для оценивания точности восстановления фазы и, в частности, для анализа эффективности тех или иных способов разрешения фазовых неоднозначностей, поскольку это величина может быть сопоставлена с с.к.о. относительных фаз, вычисляемых после некогерентного накопления и подавления фазового шума [11,12]. Характеристика (2) используется для оценивания точности измерения высот рельефа интерферометрическими системами, а ее величина может быть сопоставлена с с.к.о. высот в геометрической системе координат, получаемом по завершении интерферометрической обработки, что позволяет дополнительно исследовать эффективность различных способов геопривязки и выбора опорных точек.

Для расчёта высоты неоднозначности h_i^A в формулах (1) и (2) требуется высокоточная информация об орбите движения космического аппарата при съемке, а погрешности в ее определении будут существенным образом влиять на точность получаемых оценок. Кроме того, вследствие неточностей определения параметров орбит носителя, восстановленная абсолютная

фаза может иметь перекосы и, возможно, дополнительное масштабное искажение относительно $h_i^A / 2\pi$. Таким образом, для оценивания точности восстановленной абсолютной фазы целесообразно сформировать такой набор эталонных абсолютных фаз Ψ_{0i} (1), либо так преобразовать съёмочные абсолютные фазы $\hat{\Psi}_i$ в оценки высот (2), чтобы перекосы и масштабные искажения были скомпенсированы. Достичь этого можно с помощью линейных преобразований следующего вида:

$$\Psi_{0i} = \mathcal{U}_h^{\%} h_{0i} + \mathcal{U}_m^{\%} m_i + \mathcal{U}_n^{\%} n_i + \overline{\Psi}_0, \quad (3)$$

$$\hat{h}_i = \mathcal{V}_h^{\%} \hat{\Psi}_i + \mathcal{V}_m^{\%} m_i + \mathcal{V}_n^{\%} n_i + \bar{h}, \quad (4)$$

где $\mathcal{U}_h^{\%}, \mathcal{U}_m^{\%}, \mathcal{U}_n^{\%}$ – оценки коэффициентов масштабного искажения высот и оценки углов перекося вдоль координат m и n при преобразовании эталонных высот в эталонные фазы (для расчета σ_{Ψ}), $\mathcal{V}_h^{\%}, \mathcal{V}_m^{\%}, \mathcal{V}_n^{\%}$ – аналогичные коэффициенты для расчета σ_h . Оба набора коэффициентов могут быть вычислены по наборам съёмочных и эталонных данных методом наименьших квадратов:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{U}_h^{\%} \\ \mathcal{U}_m^{\%} \\ \mathcal{U}_n^{\%} \\ \overline{\Psi}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_i & n_i & h_{0i} & 1 \end{bmatrix}_N^{-1} \times \begin{bmatrix} \hat{\Psi}_1 \\ \hat{\Psi}_2 \\ \dots \\ \hat{\Psi}_N \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\begin{bmatrix} m_i & n_i & h_{0i} & 1 \end{bmatrix}_N$ – матрица эталонных координат и высот, дополненная единичным столбцом (N строк), $\begin{bmatrix} \bullet \end{bmatrix}^{-1}$ – псевдообратная к ней. Аналогичным образом вычисляются коэффициенты V , только вместо вектора-столбца эталонных высот h_{0i} и съёмочных фаз $\hat{\Psi}_i$ меняются местами.

Приведённые способы совмещения устраняют систематическую ошибку восстановленной абсолютной фазы аналогично тому, как это производится при геокодировании абсолютной фазы, также устраняются систематические ошибки, пропорциональные значениям координат. Далее при реализации методики также устранялись и квадратичные ошибки вдоль координат, для чего в выражениях (3)-(4) вводились дополнительные слагаемые $\mathcal{U}_m^{\%} m_i^2, \mathcal{U}_n^{\%} n_i^2, \mathcal{U}_{mn}^{\%} m_i n_i$ (и аналогично $\mathcal{V}_m^{\%} m_i^2, \mathcal{V}_n^{\%} n_i^2, \mathcal{V}_{mn}^{\%} m_i n_i$), они же учитывались и в (5).

Методика оценивания исследования точности восстановления абсолютной фазы, основанная на обратном преобразовании эталонных высот и приведенных выше соображениях, включает следующие этапы:

1. Формирование набора исследуемых алгоритмов. Далее исследуются алгоритмы растущих областей (Region Growing) и минимальной стоимости потока (Minimal Cost Flow, MCF (SNAPHU)), реализованные в программном комплексе SARscape.

2. Подготовка съёмочных данных. Для выполнения эксперимента целесообразно подготовить сглаженные интерферометрические фазы, полученные одним или несколькими алгоритмами подавления фазового шума при различных либо оптимальных (с точки зрения минимума с.к.о. сглаженной интерферометрической фазы) параметрах. Учитывая высокую вычислительную сложность алгоритмов, коэффициенты некогерентного накопления целесообразно выбрать таким образом, чтобы размеры кадра данных составляли не более 5-7 тысяч элементов по каждому измерению.

3. Подготовка эталонных данных, которая включает преобразование координат эталонных отметок высот из географической системы координат в полетную с.к. первого радиолокационного изображения интерферометрической пары (на основе уравнений «дальность-доплер» [10]).

3. Выполнение экспериментальных интерферометрических обработок. На этом этапе последовательно проводятся серии развёртываний фаз для каждого экземпляра подготовленных в п.2 съёмочных данных и расчет величин σ_ψ и σ_h .

4. Анализ полученных результатов на предметы определения алгоритмов, обеспечивающих минимальное значение с.к.о. восстановленной абсолютной фазы.

Предложенная методика позволяет оценивать точность восстановления абсолютной фазы сразу по завершении этапа развёртывания, т.к. не требует выполнения последующей процедуры геокодирования абсолютной фазы, которое, в свою очередь, сопряжено с необходимостью вмешательства оператора при анализе каждой обработанной сцены. Этим значительно улучшаются возможности сравнения эффективности работы различных алгоритмов подавления фазового шума и развёртывания фазы.

Наборы съёмочных данных, получаемых при различных алгоритмах подавления фазового шума, используются для анализа устойчивости получаемых результатов: для «хорошего» способа развёртывания фазы характеристики зависимости $\sigma_\psi(P)$ и $\sigma_h(P)$ от значений параметров P фильтров фазового шума должны иметь гладкий вид и иметь форму, аналогичную форме зависимостей с.к.о. относительной фазы от тех же параметров $\sigma_\phi(P)$ (представлены в [12]). Для полученных далее результатов использовался гауссовый фильтр фазового шума с радиально-симметричной АЧХ, варьируемым параметром была ширина АЧХ фильтра F_V .

3. Экспериментальные результаты

Экспериментальные съёмочные данные были представлены тремя экземплярами интерферометрических пар, полученных космическим аппаратом ALOS (радиолокатор PALSAR). Сцена № 1 получена в режиме двух поляризаций (использовался кадр с ГГ-поляризацией), поле фазы имеет высоту неоднозначности 17 м (на ближнем крае сцены), период пространственной дискретизации составлял 15×3 м, размер сцены – 17800×4300 элементов. Сцены №№ 2 и 3 получены в режиме одной поляризации (ГГ), поля фазы имели высоты неоднозначности 45 м и 64 м, соответственно, период пространственной дискретизации обеих сцен – $7,5 \times 3$ м, размеры – 21700×10500 и 22000×10600 элементов. При обработке сцены № 1 использовался коэффициент межэлементного некогерентного накопления 8×2 (азимут \times дальность), для сцен №№ 2 и 3 – 8×4 . Рельеф сцен №№ 1 и 2 холмистый, сцены № 3 – низкогорный. Эталонный рельеф местностей-полигонов представляет собой наборы из не менее чем полутора тысяч точек планово-высотной основы с вертикальной точностью не хуже 0,5 м.

Результаты исследования точности в виде характеристик $\sigma_h(F_V)$ для алгоритма Minimal Cost Flow (SARscape) представлены на рисунках 1-2. Алгоритм Region Growing (SARscape) для исследуемых сцен, имеющих разрывы фазы, оказался неработоспособен: при его использовании возникает расползающаяся ошибка развёртывания вне зависимости от величины F_V , и ошибка восстановления фазы σ_ψ превосходит 6 рад, а погрешность измерения высоты σ_h лежит в пределах от 13,2 до 18,4 метров. Также на рисунке 1 воспроизведены характеристики эффективности подавления фазового шума $\sigma_\phi(F_V)$, по которым в сопоставлении с $\sigma_\psi(F_V)$ можно судить о влиянии артефактов развёртывания фазы, неизбежно возникающих при развёртывании, на точность ее восстановления.

Из полученных характеристик (рис. 1) можно сделать вывод, что алгоритм MCF, наиболее широко используемый для развёртывания фазы при обработке данных ДЗЗ, в большинстве случаев позволяет достаточно эффективно восстанавливать абсолютную фазу, при этом ухудшение точности, вызываемое влиянием артефактов развёртывания фазы, составляет 0.05 – 0.3 рад в зависимости от характера конкретной сцены. Тем не менее, при обработке сцены № 1 при отдельных значениях F_V (150-170 элементов) возникает расползающаяся ошибка

развертывания и образование ложного контура, что выражается в резком ухудшении точности (с.к.о. фазы скачкообразно увеличивается на 0.3 рад).

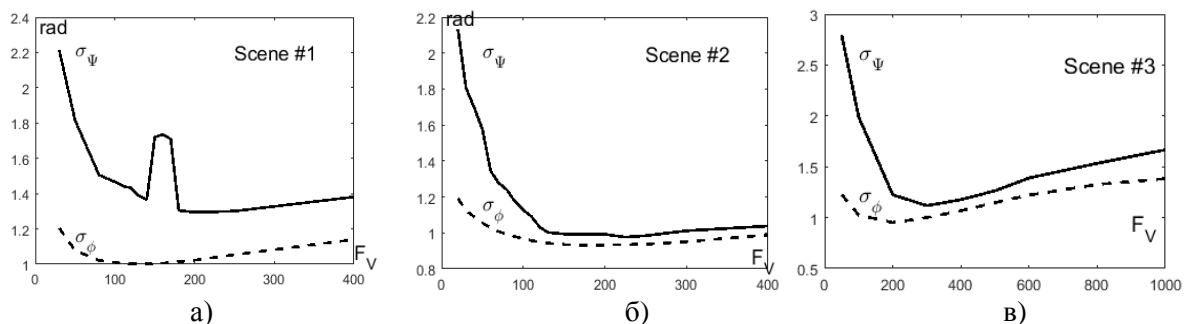


Рисунок 1. Зависимости с.к.о. восстановленной и относительной фаз (σ_ψ и σ_ϕ) от ширины АЧХ фильтра фазового шума F_V

По характеристикам рис.2 можно сделать некоторые выводы о вертикальной точности радиолокационных интерферометрических данных L-диапазона для областей с холмистым и низкогорным рельефом: с.к.о. высот принимает значения от 4 м (сцена 1 с холмистым рельефом) до 12 м (сцена 3 с низкогорным рельефом) и зависит от разброса высот рельефа в пределах сцены. Полученные оценки с.к.о. в целом совпадают, а в отдельных случаях (сцена 1 при F_V в пределах 180-250) превосходят традиционно принимаемые значения в 5-16 м в зависимости от изрезанности рельефа [4,9].

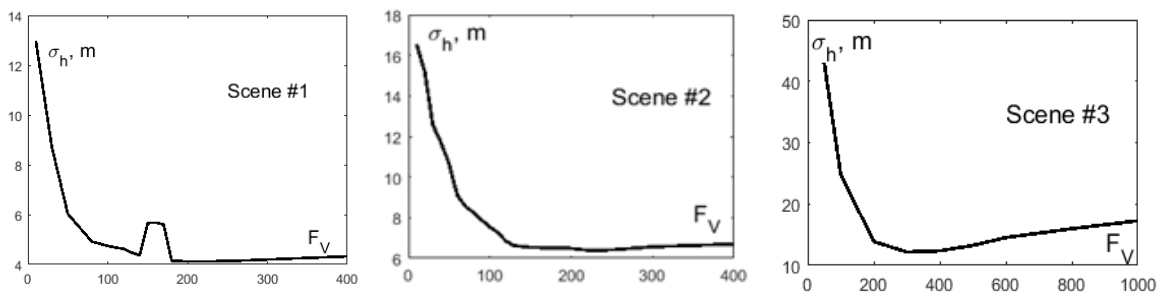


Рисунок 2. Зависимости с.к.о. высот рельефа (σ_h) от ширины АЧХ фильтра фазового шума F_V

4. Заключение

Предложен метод экспериментальной оценки точности восстановления абсолютной фазы при интерферометрической обработке радиолокационных данных ДЗЗ, позволяющей осуществлять автоматический перебор алгоритмов подавления фазового шума и развертывания фазы при их различных параметрах. Представлены результаты реализации метода оценки для данных ALOS PALSAR применительно к местностям с холмистым и низкогорным рельефом для алгоритма развертывания фазы Minimal Cost Flow и гауссового фильтра фазового шума при различных значениях ширины АЧХ фильтра. Показано, что в большинстве случаев данная связка алгоритмов позволяет достаточно эффективно восстанавливать абсолютную фазу, однако в отдельных случаях возможны срывы развертывания, приводящие к появлению расползающейся ошибки и ухудшению точности. Также получены оценки вертикальной точности интерферометрических данных ALOS PALSAR, которая (по критерию с.к.о.) для разных сцен составила величину от 4 до 12 м и в значительной мере определялась разбросом высот рельефа наблюдаемой местности.

5. Благодарности

Работа поддержана грантом РФФИ 19-29-09022\19.

6. Литература

- [1] Елизаветин, И.В. Результаты экспериментального исследования возможности прецизионного измерения рельефа Земли интерференционным методом по данным космического РСА / И.В. Елизаветин, Е.А. Ксенофонтов // Исследования Земли из космоса. – 1996. – № 1. – С. 75-90.
- [2] Bamler, R. Synthetic aperture radar interferometry / R. Bamler, P. Hartl // *Inverse Problems*. – 1998. – Vol. 14(4). – P. r1-r54.
- [3] Joughin, I.R. Synthetic Aperture Radar Interferometry / I.R. Joughin, F. K. Li, S.N. Madsen, E. Rodrigues // *Proceedings of the IEEE*. – 2000. – Vol. 88(3). – P. 333-382 .
- [4] Hanssen, R.F. Radar interferometry. Data interpretation and error analysis. / R.F. Hanssen – Dordrecht: Kluwer academic publishers, 2002. – 308 p.
- [5] Yu, H. Phase unwrapping in InSAR : A review / H. Yu, Y. Lan, Z. Yuan, J. Xu, H. Lee // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. – 2019. – Vol. 7(1) – P. 40-58.
- [6] Dorosinsky, L. An algorithm of boundaries detection in low-contrast radar images of the Earth / L. Dorosinsky, T. Lysenko // *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. – 2016. Vol. 110(4) – P. 657-664.
- [7] Dorosinsky, L.G. A study of small surface changes detection algorithms using the multi-position radar space monitoring system / L.G. Dorosinsky, N.S. Vinogradova // *Proc. of 19th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2019*. – 2019. – P. 425-432.
- [8] Paveleyeva, E.A. Image processing and analysis based on the use of phase information / E.A. Paveleyeva // *Computer Optics*. – 2018. – Vol. 42(6). – P. 1022-1034. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-6-1022-1034.
- [9] Passini, R. Accuracy analysis of SRTM height models / R. Passini, K. Jacobsen // *Annual conference of ASPRS, 2007*. – P. 25-29
- [10] Frei, U. Cartographic Reference Systems / U. Frei, C. Graf, E. Meier // *SAR Geocoding. Data and System* – Karlsruhe: Wichmann, 1993. – P. 173-186.
- [11] Сосновский, А.В. Об оценивании точности цифровых моделей рельефа, получаемых методом космической радиолокационной интерферометрии / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // XXII международная научно-техническая конференция "Радиолокация, навигация, связь": Сборник трудов в 3-х тт. – Воронеж: НПФ "САКВОЕЕ". – 2016. – Т. 3. – С. 1074-1081.
- [12] Sosnovsky, A.V. An Efficiency Estimation for Multilooking and Phase Noise Suppression Methods for Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars Data Processing / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // *XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering. IEEE Proceedings*. – 2018. – Vol. 1. – P. 434-438.

A method of phase unwrapping algorithms efficiency analysis for InSAR data processing

A.V. Sosnovsky¹, V.G. Kobernichenko¹

¹Ural Federal University, Mira st. 19, Ekaterinburg, Russia, 620002

Abstract. The experimental study of algorithms for radar data interferometric processing effectiveness is complicated by the fact that a quantitative result can be obtained only after the completion of the entire processing procedure, so it is difficult to assess the effectiveness of its first stages. A method of experimental evaluation of the accuracy of the results of interferometric processing by various algorithms of phase unwrapping with such combination of image and reference data, which does not require the use of the ambiguity height parameter, is proposed. The results of the method implementation for ALOS PALSAR data in relation to areas with hilly and low-mountain terrain are presented. Estimates of the vertical accuracy of ALOS PALSAR interferometric data for Region Growing and Minimal Cost Flow phase unwrapping algorithms implemented in the SARscape software package are obtained.