

Проблема оценки качества методов расчета карт когерентности при интерферометрической обработке радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли

А.В. Сосновский¹, В.Г. Коберниченко¹, Н.С. Виноградова¹

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

Аннотация. Интерферометрическая когерентность является важным показателем качества интерферограмм, полученных интерферометрическим радиолокатором с синтезированной апертурой (InSAR), так как области с низкими значениями когерентности непригодны для обработки интерферометрических данных. Показатель когерентности используется также в качестве параметра адаптивных алгоритмов подавления фазового шума. Кроме того, он может использоваться для классификации типов поверхностей. В работе исследована проблема снижения оценки когерентности под действием уклона топографической фазы и рассмотрены способы уменьшения влияния уклона на величину оценки. Представлен сравнительный анализ эффективности четырёх методов построения карт когерентности при их использовании в задаче подавления фазового шума на интерферограммах РСА спектральным адаптивным фильтром при обработке данных космического радиолокатора дистанционного зондирования Земли ALOS PALSAR.

1. Введение

Метод космической радиолокационной интерферометрии, суть которого заключается в совместной обработке фазовых полей, полученных съёмкой одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами либо одной антенной на двух витках орбиты, сочетает в себе высокую точность фазового метода измерения дальности с высокой разрешающей способностью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) [1,2,3]. Данная технология позволяет получать цифровые модели рельефа (ЦМР) и карты смещений рельефа по многократным радиолокационным наблюдениям.

Одной из основных проблем обработки интерферометрических данных является декорреляция радиолокационных эхо-сигналов – потеря когерентности отражения электромагнитных волн, которая вызывается различием ракурса съёмки (геометрическая декорреляция), изменениями поверхности и среды распространения радиоволн за период между съёмками (временная декорреляция) и объёмным рассеянием радиоволн на некоторых типах поверхностей. Уровень декорреляции различен для разных типов поверхностей: от почти полной когерентности (мелкая растительность, городские территории при использовании РСА высокого и сверхвысокого разрешения) до полной декорреляции (водные поверхности, лесная растительность при использовании в РСА волн сантиметрового и более высокочастотных

диапазонов). Таким образом, точность получаемого результата (ЦМР или карты смещения рельефа) будет существенно зависеть от типа поверхности и условий съёмки.

Для оценки уровня декорреляции сигналов используются карты когерентности [1], которые представляют собой поле коэффициентов корреляции между двумя и более радиолокационными изображениями на одну и ту же территорию. Исходя из принятой системы формализации карт когерентности каждый ее элемент может принимать значения в диапазоне от 0 до 1, причем нулевое значение соответствует полной декорреляции участка местности, а значение 1, напротив, абсолютной корреляции соответствующих фрагментов. Карта когерентности характеризует степень отклонения абсолютной фазы от истинного значения, причем это отклонение может быть вызвано как изменениями на земной поверхности, так и спецификой диэлектрических свойств расположенных на ней объектов [2,3]. На рисунке 1 приведены две карты когерентности для одной и той же территории, при этом первое из изображений получено по РСА-парам с двухнедельным интервалом, второе – с интервалом в 13 месяцев.

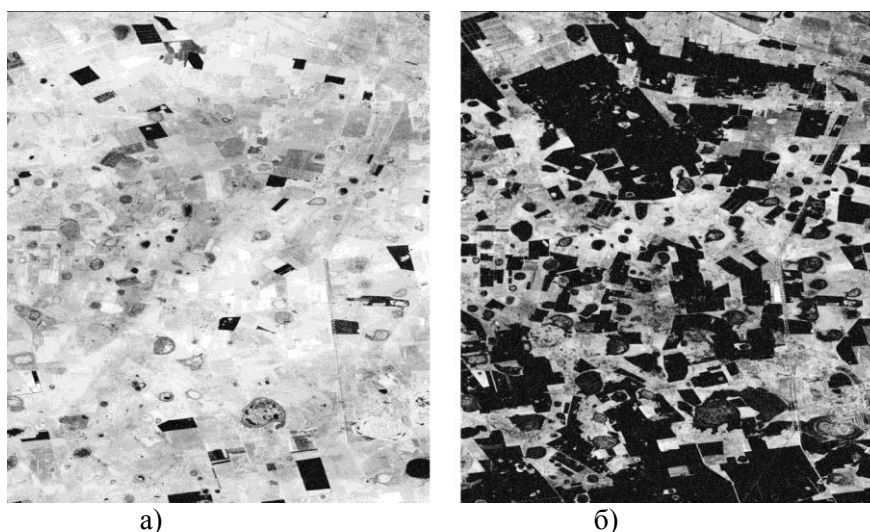


Рисунок 1. Пример карт когерентности, полученных для разных промежутков времени: а) две недели, б) тринадцать месяцев.

Построение выполнено на основе данных ALOS PALSAR. На изображениях хорошо видна сегментация участков с разной когерентностью, соответствующих различным типам подстилающей поверхности. Также следует обратить внимание, что на карте когерентности на рисунке 1а преобладают светлые оттенки, что свидетельствует о высокой корреляции между двумя изображениями РСА-пары, в то время как на рисунке 1б изображение преимущественно темное. В данном случае низкая корреляция обусловлена естественными изменениями на земной поверхности, произошедшими за период в 13 месяцев.

Карты когерентности широко используются как самостоятельные продукты в различных радиолокационных задачах, например, оценке качества результатов интерферометрической обработки [4,5], сегментации радиолокационных изображений [6-8], а также в качестве промежуточных данных в ходе интерферометрической обработки.

Классический метод построения карт основан на перемножении первого (опорного) изображения интерферометрической пары на второе (вспомогательное), комплексно-сопряжённое самому себе [1,3,6]:

$$\hat{\gamma}_0 = \frac{|\sum \dot{z}_1(i, j) \cdot \bar{z}_2(i, j)|}{\sqrt{\sum |z_1(i, j)|^2 \cdot \sum |z_2(i, j)|^2}} \quad (1)$$

где \dot{z}_1, \dot{z}_2 – радиолокационные изображения опорного и вспомогательного сигналов соответственно, суммирование ведётся в локальном окне оценивания размером $M \times N$ (по

азимуту и дальности соответственно). Однако, при её применении в задаче оценивания когерентности комплексных РЛИ возникает проблема, выражающаяся во влиянии регулярной (топографической) составляющей фазы на величину самой оценки. Устранение такого влияния требует использования других оценок или модификаций данной оценки, и, соответственно, исследования эффективности применения таких модификаций. Для сравнения эффективности того или иного подхода к оцениванию можно опираться на успешность применения той или иной оценки для решения конкретной прикладной задачи. В настоящей работе исследуется вопрос об эффективности использования различных оценок когерентности в задаче фильтрации фазового шума при интерферометрической обработке.

2. Методы построения карт когерентности

Оценка (1) представляет собой не что иное, как формулу для вычисления коэффициента корреляции двух комплексных случайных величин. Однако комплексные РЛИ представляют собой не наборы случайных величин, а двумерные комплексные случайные процессы, в общем случае – нестационарные, и при наличии уклона (тренда) разностной фазы оценка по формуле (1) приобретает дополнительное смещение, связанное с величиной уклона. Этот эффект можно продемонстрировать (в одномерной постановке) с помощью модели разностной фазы $\Delta\varphi$ двух сигналов, коррелированных с постоянным коэффициентом, близким к единице. Если разностная фаза постоянна (рисунок 2а), оценка модуля коэффициента корреляции [7,8], смещаться не будет ($\hat{\gamma}_0 = 0.9$). Если же разностная фаза имеет уклон (рисунки 2-б,в), то величина оценки $\hat{\gamma}_0$ начинает смещаться в сторону уменьшения, причём она в большей степени зависит от угла уклона фазы, а не от соотношения топографической и шумовой составляющих интерферограммы ($\hat{\gamma}_0 = 0.5$ и $\hat{\gamma}_0 = 0.2$ соответственно).

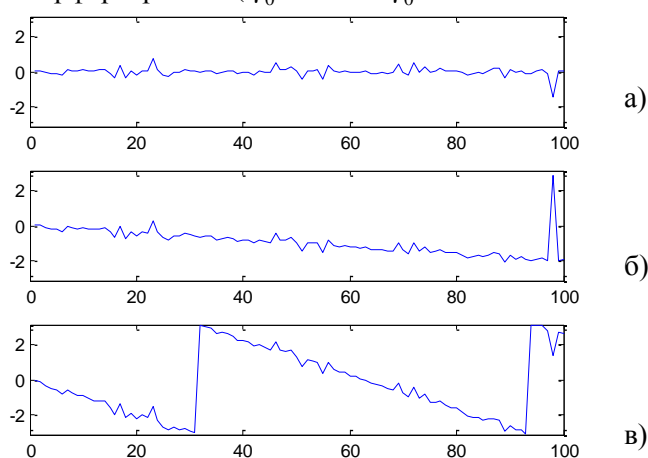


Рисунок 2. Разностная фаза двух комплексных гауссовых случайных процессов при постоянном уровне фазового шума и различных углах уклона фазы: а) без уклона; б) 2 рад на 100 отсчётов; в) 4π рад на 100 отсчётов.

Величина смещения оценки $\hat{\gamma}_0$ зависит как от скорости изменения фазы (угла тренда), так и от размеров выборки, т.е. от размеров окна оценивания когерентности. Оценим данное смещение при различных условиях.

1. Смоделируем пары случайных процессов с заданными коэффициентами корреляции между соответствующими отсчётами (0.95, 0.7 и 0.1). Размер окна оценивания примем равным 3×3 . Далее, будем изменять угол тренда в пределах от 0° до 360° с шагом в 1° , каждый раз оценивая когерентность по формуле (1). Получившиеся результаты отображены на рисунке 3-а, из которого видно, что при углах порядка 30° вне зависимости от величины исходного коэффициента корреляции его оценка падает до величины порядка 0.25, что соответствует смещению оценки коэффициента корреляции для пары полностью некоррелированных выборок размером, равным размеру окна оценивания.

2. Для таких же процессов используем фиксированный коэффициент корреляции (0.7) и разные размеры выборок: 3×3 , 7×7 и 11×11 , соответственно. Изменяя, как и ранее угол тренда и

оценивания получившуюся когерентность, получим результаты, представленные на графиках рисунке 3б, из которого видно, что при увеличении окна оценивания смещение заметно усиливается: оно проявляется при заметно меньших углах (единицы градусов), а его величина становится почти равной значению самой оценки.

Таким образом, для меняющихся форм рельефа оценка когерентности интерферограммы $\hat{\gamma}_0$, вычисляемая по формуле (1), не даёт возможности оценивать соотношение между топографической и флуктуационной составляющими разностной фазы.

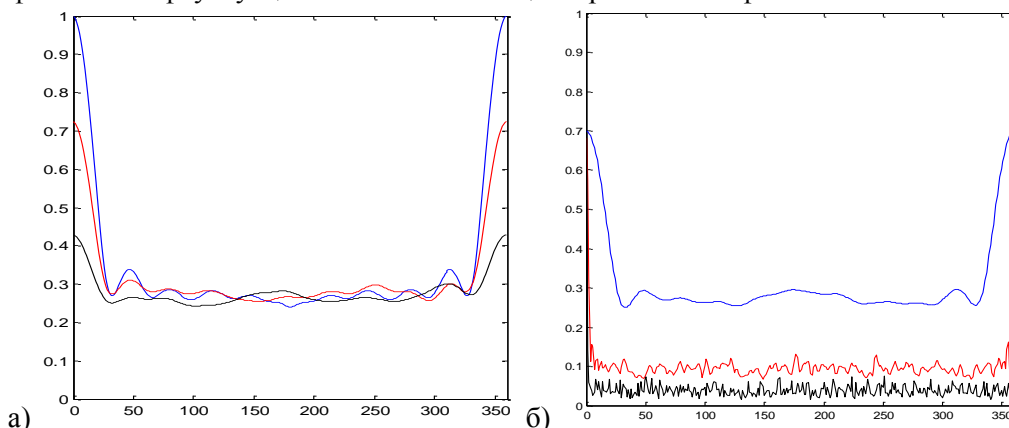


Рисунок 3. Смещение оценки под действием уклона: а) для трёх разных коэффициентов когерентности (корреляции); б) для трёх разных размеров окна оценивания.

Проблема смещения оценки когерентности под влиянием уклона разностной фазы и методы уменьшения этого влияния рассматривались в [9,10], при этом выделялось два основных пути: построение оценок, использующих только информацию об амплитуде или интенсивности или ведение в оценку $\hat{\gamma}_0$ дополнительного множителя, корректирующего изменения топографической фазы в пределах окна оценивания по внешней цифровой модели рельефа (например, SRTM). Также для устранения влияния уклонов были предложены методы оценивания когерентности по интерферограмме уклонов фазы [12] и компенсация уклона, основанная на двумерном быстром преобразовании Фурье [13, 14].

В первом из этих способов оценка производится по соотношению

$$\hat{\gamma}_2 = \frac{|\sum \dot{w}_1(i, j) \cdot \bar{w}_2(i, j)|}{\sqrt{\sum |\dot{w}_1(i, j)|^2 \cdot \sum |\dot{w}_2(i, j)|^2}} \quad (2)$$

где $\dot{w}_{1,2}(i, j) = \dot{z}_{1,2}(i, j) \cdot \bar{z}_{1,2}(i-1, j-1)$; во втором – используется определение комплексных частот модуляции интерферограмм, которые можно найти как

$$[\omega_i, \omega_j] = \arg \max_{\substack{i \leq i_0 \pm N \\ j \leq j_0 \pm M}} (F^2 \{ \dot{z}_1(i, j) \cdot \bar{z}_2(i, j) \}) \quad (3)$$

где ω_i, ω_j – пространственные частоты, которые оцениваются в окне оценивания интерферограммы, после чего выполняется пространственная частотная демодуляция множителем $\exp[-i(\omega_i / i + \omega_j / j)]$ и оценивание по формуле, аналогичной (1):

$$\hat{\gamma}_3 = \frac{|\sum \dot{z}_1(i, j) \cdot \bar{z}_2(i, j) \cdot \exp[-i(\omega_i / i + \omega_j / j)]|}{\sqrt{\sum |z_1(i, j)|^2 \cdot \sum |z_2(i, j)|^2}} \quad (4)$$

Для повышения вычислительной эффективности в качестве оценки когерентности вместо коэффициента корреляции можно использовать высоту пика БПФ-спектра [14], которая будет максимальной при полной корреляции сигналов и примерно равна среднему произведению интенсивностей РЛИ при отсутствии корреляции:

$$\hat{\gamma}_4 \approx \frac{P - \sqrt{\sum |z_1(i, j)|^2 \cdot \sum |z_2(i, j)|^2}}{\sum |z_1(i, j)|^2 \cdot \sum |z_2(i, j)|^2 - \sqrt{\sum |z_1(i, j)|^2 \cdot \sum |z_2(i, j)|^2}} \quad (5)$$

где P – высота пика амплитудного БПФ-спектра. Оценка оказывается особенно вычислительно эффективной, если пренебречь значениями интенсивностей ($|z(i, j)| = 1$) и учитывать только фазовые соотношения, тогда

$$\hat{\gamma}'_4 \approx \frac{P - \sqrt{MN}}{MN - \sqrt{MN}}. \quad (6)$$

3. Экспериментальные результаты

Карты когерентности широко используются в качестве адапционного параметра фильтров фазового шума при обработке интерферограмм. Спектральный адаптивный фильтр (фильтр Гольдштейна с модификацией Бэрна [11]) является наиболее распространенным среди фильтров подавления фазового шума для данных РСА и использует двумерные спектры БПФ $F(k, l)$ рассчитанные в локальных окнах (блоках), которые затем взвешиваются следующим образом:

$$\dot{I}^F(m, n) = F^{-1} \left\{ \left| \dot{F}(k, l) \right|^{\alpha(1 - \overline{\hat{\gamma}(k_0, l_0)})} \cdot \dot{F}(k, l) \right\}. \quad (7)$$

где $\overline{\hat{\gamma}(k_0, l_0)}$ – усреднённая оценка когерентности в пределах блока; α – коэффициент масштабирования когерентности. Различные оценки когерентности $\hat{\gamma}_i$ будут давать различные результаты подавления, соответственно, наиболее качественной будет та оценка, которая обеспечит наилучшую точность интерферометрической фазы после фильтрации спектральным адаптивным фильтром.

Оценка точности производится по критерию среднеквадратичного отклонения следующим образом:

$$\sigma[\varphi^*] = \sqrt{\frac{1}{M \times N - 1} \sum_i \left\{ \arg \left[\frac{\exp(j\varphi_i^* - 2\pi j\Psi_{0i})}{\exp(j\varphi^* - 2\pi j\Psi_0)} \right] \right\}^2}. \quad (8)$$

где φ_i^* – значения фаз интерферограммы после некогерентного накопления или после подавления фазового шума, Ψ_{0i} – эталонные абсолютные фазы, получаемые преобразованием эталонных абсолютных высот по формуле:

$$\Psi_{0i} = 2\pi \left[\frac{h_{0i}}{h_A} \right]. \quad (9)$$

где h_A – высота неоднозначности.

Сравнительный анализ методов построения карт когерентности по формулам (1), (2), (4), (6) проводился на экспериментальных радиолокационных интерферометрических данных ALOS PALSAR (частота зондирующего сигнала – 1,27 ГГц, радиометрическое разрешение 5 бит), представленных интерферометрической парой изображений для полигона, содержащего различные типы поверхности (поля, леса, городские территории и районы горных работ). Образцы данных получены в режиме двойной поляризации, использована ГГ-поляризация. Интерферометрическая фаза имеет высоту неоднозначности 17,2 м (на ближнем краю сцены); интервал пространственной дискретизации составил 15,0x3,1 м, а размер сцены – 8000x1800 элементов.

Эталонные данные были представлены набором из 920 высотных отметок с вертикальной точностью 0,2 м, покрывающих площадь в 1083 кв. км. Координаты опорных точек высоты

были преобразованы в систему координат WGS-84, а затем перепроецированы полётную систему координат радиолокатора [13]. Анализировалось влияние размеров окна оценивания когерентности на точность интерферометрической фазы после подавления фазового шума по критерию (8) для различных размеров блока спектрального адаптивного фильтра. Результаты представлены на рисунке 4, из которых видно, что использование карт когерентности при подавлении фазового шума во многих случаях приводит к уменьшению с.к.о. относительной фазы на величину до 5%, причём с увеличением размера окна оценивания выигрыш в точности уменьшается. Оценки (1), (4) и (6) ведут себя в целом сходно, особняком стоит оценка когерентности по уклону фазы (2), которая при малых размерах блока фильтра (11×11) даёт худшие результаты, а при средних размерах ($21 \times 21 \dots 31 \times 31$) наоборот – наилучшие (выигрыш в точности более 7% для фильтра с размером блока 31×31).

4. Заключение

Исследована проблема снижения оценки когерентности под действием уклона топографической фазы и рассмотрены 3 способа уменьшения влияния уклона на величину оценки. Представлен сравнительный анализ эффективности четырёх методов построения карт когерентности при их использовании в задаче подавления фазового шума на интерферограммах РСА спектральным адаптивным фильтром при обработке данных космического радиолокатора дистанционного зондирования Земли ALOS PALSAR. Показано, что применение карт когерентности позволяет улучшать точность результатов подавления фазового шума на 5..7%, при этом наилучшее подавление достигается при использовании оценки когерентности по уклону фазы.

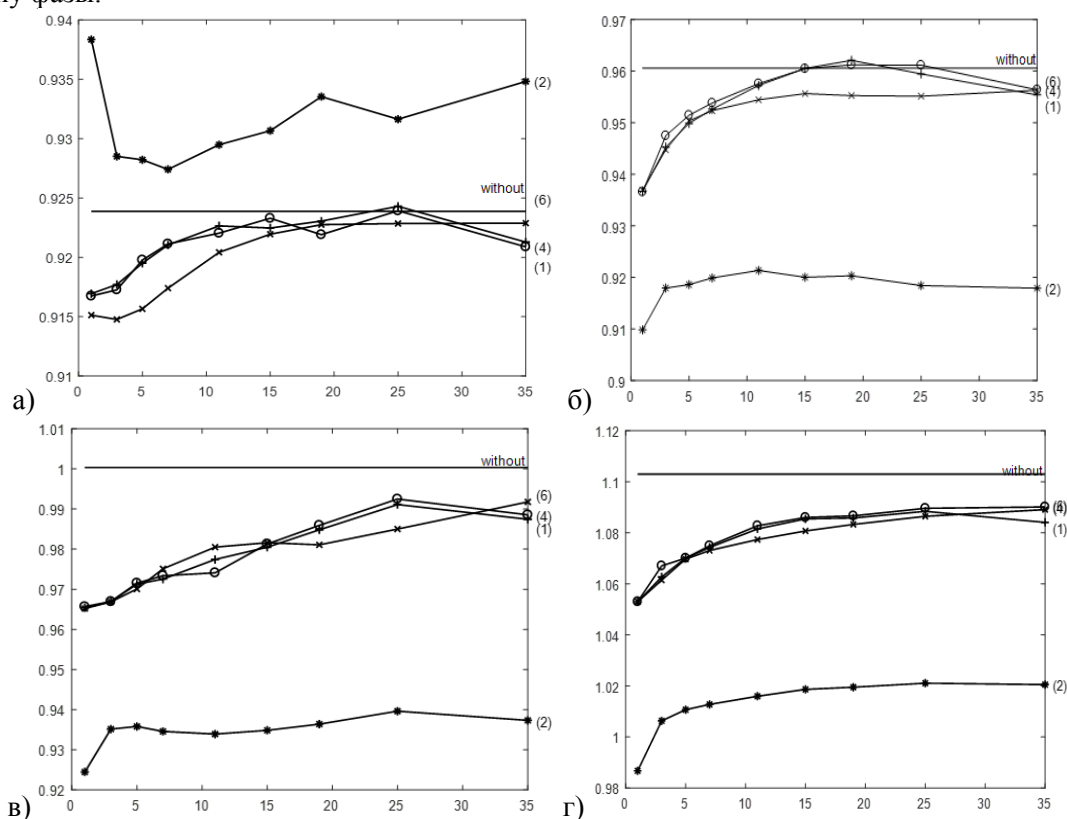


Рисунок 4. Зависимость с.к.о. относительной фазы после спектральной адаптивной фильтрации (рад) от полуразмера окна оценивания когерентности N_0 ($N = M = 2N_0 + 1$), «without» – без применения карты когерентности, (1) – классическая оценка по формуле (1), (2) – оценка когерентности по уклону по формуле (2), (4) – оценка с коррекцией уклона с помощью БПФ по формуле (4), (6) – оценка по высоте пика БПФ-спектра по формуле (6): а) размер блока фильтрации 11×11 , б) размер блока 21×21 , в) размер блока 31×31 , г) размер блока 51×51 .

5. Литература

- [1] Monti Guarnieri, A. Multi-mode ENVISAT ASAR interferometry: techniques and preliminary results / A. Monti Guarnieri, P. Guccione, P. Pasquali, Y.L. Desnos // IEE Proc.-Radar Sonar Navig. – 2003. – Vol. 150(3). – P. 193-200.
- [2] Arciniegas, G.A. Coherence- and Amplitude-Based Analysis of Seismogenic Damage in Bam, Iran, Using ENVISAT ASAR Data / G.A. Arciniegas, W. Bijker, N. Kerle, V.A. Tolpekin // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2007 – Vol .45(6). – P. 1571-1581.
- [3] Takeuchi, S. Detection of Urban Disaster Using InSAR – A Case Study for the 1999 Great Taiwan Earthquake / S. Takeuchi, Y. Suga // Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings (IGARSS 2000). – 2000. – P. 1201-1224.
- [4] Abdelfattah, R. Coherence Estimation from Complex Coherence Map using Second Kind Statistics / R. Abdelfattah, J.M. Nicolas // Intern. Conf. on Image Processing, ICIP'05. – 2005. – P. II 229-232.
- [5] Cattabeni, M. Estimation and Improvement of Coherence in SAR Interferograms / M. Cattabeni, A. Monti-Guarnieri, F. Rocca // Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS '94). – 1994. – Vol.4. – P. 720-722.
- [6] Askne, J. Potential of interferometric SAR for classification; of land surfaces / J. Askne, J.O. Hagberg // Proc. Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'93). – 1993. – P. 985-987.
- [7] Gens, R. SAR interferometry — Issues, techniques / R. Gens, J.L. Van Genderen // Int. J. Remote Sens. – 1996. – Vol. 17. – P. 1803-1835.
- [8] Lee, H. Analysis of Topographic Decorrelation in SAR Interferometry Using Ratio Coherence Imagery / H. Lee // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2001. – Vol. 39(2). – P. 223-232.
- [9] Touzi, R. Coherence Estimation for SAR Imagery / R. Touzi, A. Lopes, P.W. Vachon // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. – 1999. – Vol. 37(1) – P. 135-149.
- [10] Lopez-Martinez, C. Coherence estimation in synthetic aperture radar data based on speckle noise modelling / C. Lopez-Martinez, E. Pottier // Applied Optics. – 2007. – Vol. 46(4). – P. 544-558.
- [11] Baran, I. A Modification to the Goldstein Radar Interferogram Filter / I. Baran, M.P. Stewart, B.M. Kampes, Z. Persky, P. Lilli // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. – 2003. – Vol. 41(9). – P. 2114-2118.
- [12] Sosnovsky, A.V. A Phase Unwrapping Algorithm for Interferometric Phase Images / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko // Communications in Computer and Information Science. – 2015. – Vol. 542. – P. 146-150.
- [13] Сосновский, А.В. Методика экспериментальной оценки эффективности этапов интерферометрической обработки сигналов РСА / А.В. Сосновский, В.Г. Коберниченко // 26-я Международная Крымская конференция "СВЧ-Техника и телекоммуникационные технологии" (КРЫМИКО 2016). – Севастополь: СевГУ, 2016. – С. 2716-2722.
- [14] Sosnovsky, A.V. InSAR data coherence estimation using 2D fast Fourier transform / A.V. Sosnovsky, V.G. Kobernichenko, N.S. Vinogradova, O. Tsogtbaatar // CEUR Workshop Proceedings. – 2017. – Vol. 1814. – P. 98-105.

The problem of quality assessing for the methods of coherence maps calculation in InSAR remote sensing of the Earth data processing

A.V. Sosnovsky¹, V.G. Kobernichenko¹, N.S. Vinogradova¹

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

Abstract. Interferometric coherence is an important indicator of the quality of interferograms obtained by synthetic aperture interferometric radars (InSAR), because the areas with low coherence are not suitable for interferometric data processing. The coherence value is used as a parameter for adaptive phase noise suppression algorithms. It can also be used for surface classification tasks. The paper investigates the problem of the coherence estimate reducing under the influence of the topographic phase slope and considers ways to reduce the impact of the slope on the estimate value. The paper presents a comparative efficiency analysis of four methods for coherence maps calculation used for the phase noise suppression on the interferograms by a spectral adaptive filter in interferometric data processing for the Earth's remote sensing space radar ALOS PALSAR.