

## Использование карт когерентности для повышения точности интерферограмм при обработке данных радиолокаторов с синтезированной апертурой

*Н. С. Виноградова, А. В. Сосновский*

Уральский федеральный университет имени первого  
Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

n. s.vinogradova@urfu.ru

**Аннотация.** В работе представлен анализ методов применения карт когерентности для обработки интерферометрических пар изображений радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Экспериментально определены размеры окон усреднений, допустимых для решения практических задач. Представлен метод повышения точности цифровых моделей рельефа и карт подвижек рельефа, получаемых при интерферометрической съемке, основанный на маскировании карты когерентности. Показано повышение точности результата по сравнению с классической методикой.

**Ключевые слова.** Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли, радиолокационная интерферометрия, пространственная когерентность.

## Coherence maps application for InSAR data accuracy improving

*Nina S. Vinogradova, Andrey V. Sosnovsky*

Ural Federal University named after the first President  
of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russian Federation

n. s.vinogradova@urfu.ru

**Abstract.** The paper presents the analysis of coherence maps application methods for the interferometric SAR images processing. The interferometric coherence is an important indicator of the reliability of the interferograms obtained by the interferometric synthetic aperture radar (InSAR), since the areas with low coherence values are unsuitable for processing the interferometric data. In addition, the coherence is used as a parameter of adaptive phase noise filters, and it can also be used for surface segmentation.

The sizes of the averaging windows suitable for the solution of practical problems are experimentally determined. The method of accuracy increasing for the digital elevation maps and displacement maps obtained by InSAR systems based on masking the coher-

ence map is presented. The DEM accuracy improvement in comparison with the classical estimation method is presented.

**Keywords.** Radar remote sensing, Radar interferometry, Spatial coherence.

© Vinogradova N. S., Sosnovsky A. V., 2018

## Введение

Согласно определению карты когерентности  $\gamma$  представляют собой поле коэффициентов корреляции между двумя и более радиолокационными изображениями на одну и ту же территорию [1]. Исходя из принятой системы формализации карт когерентности, каждый ее элемент может принимать значения в диапазоне от 0 до 1, причем нулевое значение яркости соответствует полной декорреляции участка местности, а значение яркости 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 рис. 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.

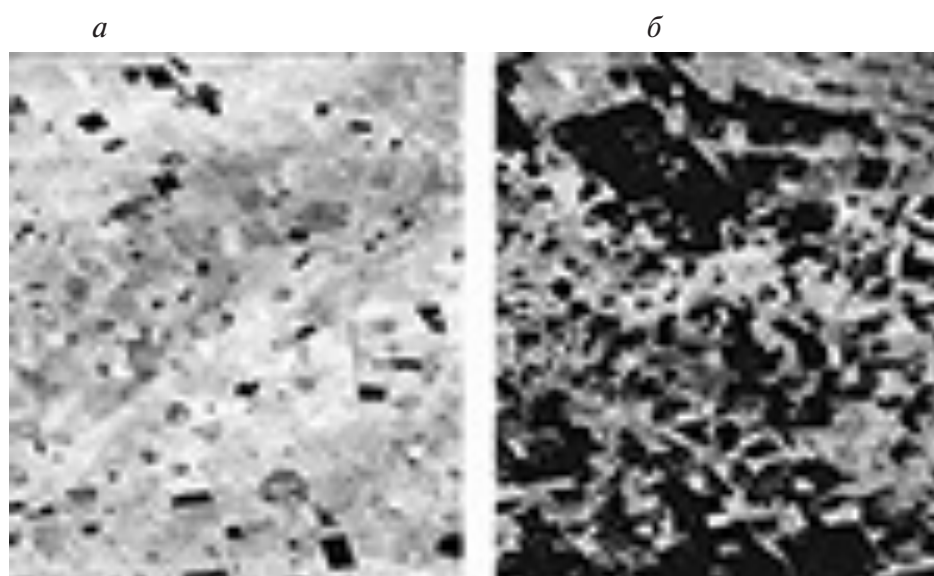


Рис. 1. Пример карт когерентности, полученных для разных промежутков времени:

*a* — две недели, *б* — тринадцать месяцев. Для улучшения визуального различия отдельных областей выполнено градационное преобразование изображения

Построение выполнено на основе данных ALOS PALSAR, территория Свердловской области. На изображениях хорошо видна сегментация участков с разной когерентностью, соответствующих различным типам подстилающей поверхности. Также следует обратить внимание, что на карте когерентности на рис. 1, *а* преобладают светлые оттенки, что свидетельствует о высокой корреляции между двумя изображениями РСА-пары, в то время как на рис. 1, *б* 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 для сегментации либо для определения свойств спутниковой системы [4, 5, 6], а также как вспомогательные элементы в ходе интерферометрической обработки данных, причем зачастую свойства карт когерентности являются определяющими факторами в вопросах определения качества выходных продуктов [7, 8].

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

$$\gamma = \frac{|E(Z_1 \cdot Z_2^*)|}{\sqrt{E(Z_1 \cdot Z_1^*)^2 \cdot E(Z_2 \cdot Z_2^*)^2}}, \quad (1)$$

где  $Z_1, Z_2$  — радиолокационные изображения опорного и вспомогательного сигналов соответственно. В ряде источников в числителе не указывается знак модуля, тогда под значением  $\gamma$  понимается комплексная когерентность, в этом случае оценка когерентности  $\hat{\gamma}$  вычисляется как модуль комплексной величины.

Применительно к дискретному сигналу используется выражение следующего вида [1, 5, 9]:

$$\hat{\gamma} = \frac{\left| \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} Z_1(x, y) \cdot Z_2^*(x, y) \right|}{\sqrt{\sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} |Z_1(x, y)|^2 \cdot \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} |Z_2(x, y)|^2}}, \quad (2)$$

где  $M, N$  — размеры области усреднения по дальности и азимуту соответственно. Как правило, в большинстве задач полагают  $M = N$ . Под величиной понимается оценка величины когерентности как расчетного показателя.

Несмотря на то что корреляционная функция хорошо изучена в различных приложениях математики, применительно к вопросам об-

работки радиолокационных изображений остается много неясных моментов [10, 11]. В частности, нет единых рекомендаций о выборе оптимальных размеров областей усреднения, также отсутствуют исследования по границам применимости выражения (2) в целом.

### Анализ оценки величины когерентности

На первом этапе произведен расчет зависимости оценки когерентности  $\hat{\gamma}$  от величины ее истинного значения. Моделирование выполнено на основе парных тестовых изображений, представляющих собой нормально распределенный двумерный некоррелированный случайный процесс, связанных между собой через операцию комплексного сопряжения. Истинное значение когерентности между тестовыми изображениями изменялось линейно в диапазоне от 0 до 1. Для созданного тестового изображения выполнено построение карты когерентности с использованием выражения (2) для нескольких размеров области усреднения, результаты представлены на рис. 2. Для устранения флуктуаций, обусловленных влиянием нормального шума, для каждого значения когерентности выполнено усреднение по 300 значениям. Расчеты оценок величины когерентности выполнены с шагом в 0,05.

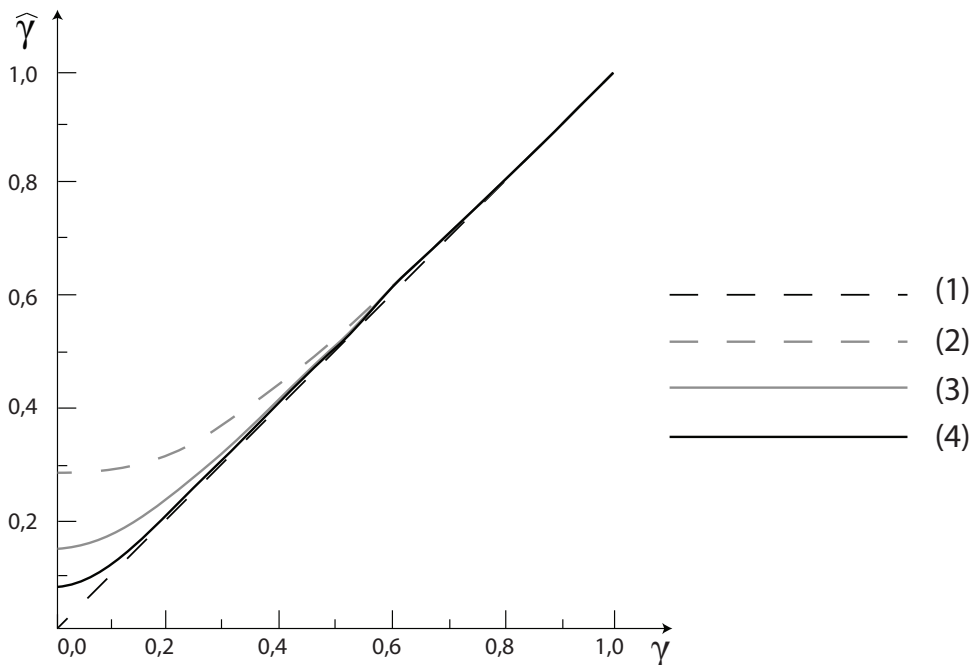


Рис. 2. Зависимость оценки величины когерентности  $\hat{\gamma}$  от ее истинного значения. Линия (1) соответствует теоретической зависимости, линия (2) — размеру области усреднения  $3 \times 3$ , линия (3) — размеру области усреднения  $7 \times 7$ , линия (4) — размеру области усреднения  $15 \times 15$

Из рис. 2 видно, что в области высоких значений истинной когерентности расчетные зависимости практически совпадают с теоре-

тическими, тогда как для малых значений истинной когерентности расчетные значения отклоняются в положительную сторону, достигая максимального значения при нулевой когерентности. Обозначенный эффект связан с присутствием модуля в выражении (2) для изначально комплексных величин, что приводит к статистическому накоплению оценки. Также видно, что смещение  $d\hat{\gamma}$  является функцией размера области усреднения: чем больше область усреднения, тем меньшее наблюдается смещение при нулевом значении истинной когерентности. Для установления этой закономерности выполнен расчет зависимости смещения оценки величины когерентности  $d\hat{\gamma}$  от размера области усреднения. В качестве опорных данных использованы те же тестовые изображения, что и в случае рис. 2, усреднение выполнено по 300 точкам, диапазон размера области усреднения положен равным от 3 до 65. Результаты представлены на рис. 3.

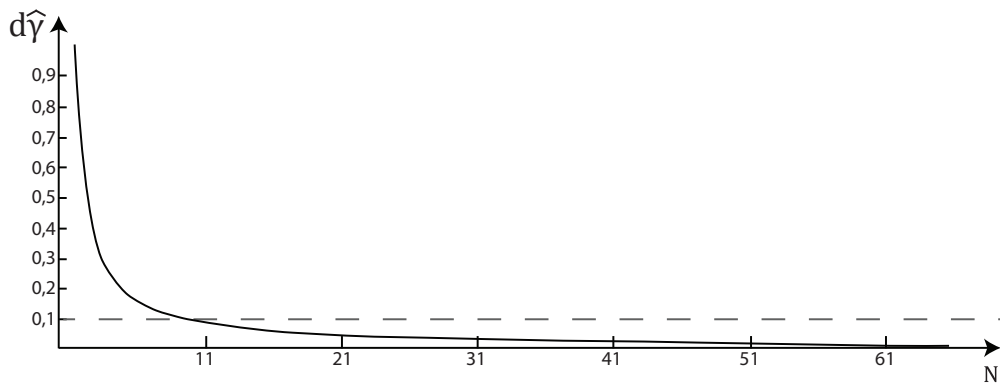


Рис. 3. Зависимость смещения оценки величины когерентности  $d\hat{\gamma}$  от размера области усреднения. Пунктирная линия соответствует величине смещения в 0,1

Как видно из рис. 3, зависимость имеет выраженный гиперболический характер, сходящийся в нулевое значение, что соответствует классическим представлениям [10]. При этом для размеров области усреднения менее чем  $11 \times 11$  смещение оценки  $d\hat{\gamma}$  превышает величину 0,1, что может негативно сказаться на интерпретации выходного продукта. Поэтому для практических задач при построении карт когерентности следует использовать размеры окон усреднения не менее чем  $11 \times 11$ , что обеспечит адекватную статистику для выполнения последующих расчетов.

Еще одним способом оценки выражения (2) является построение зависимости СКО оценки когерентности  $\sigma_{\hat{\gamma}}$  от ее истинного значения. В теории такого рода оценки принято выражать через нижнюю границу Рао — Крамера [10, 12–14]:

$$\sigma_{\hat{\gamma}} \approx \sqrt{\frac{(1-\gamma^2)^2}{2 \cdot M \cdot N}}. \quad (3)$$

Для обозначенных ранее тестовых изображений выполнено построение карты когерентности с использованием выражения (2) для нескольких размеров области усреднения, после чего на интервале истинного значения когерентности с шагом в 0,05 рассчитана величина СКО согласно построенным изображениям. Усреднение выполнено по 600 точкам. Результаты представлены на рис. 4.

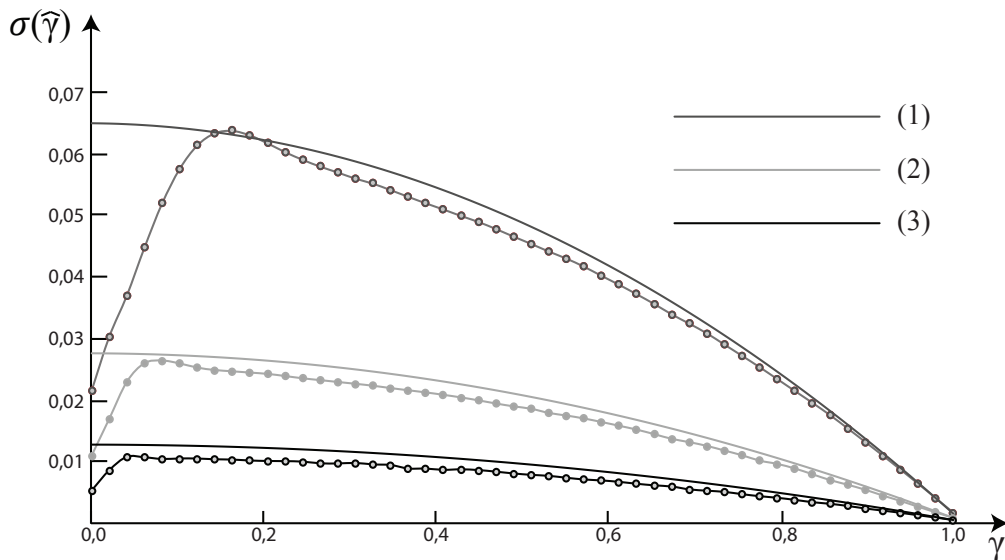


Рис. 4. Зависимость СКО оценки когерентности  $\sigma_{\hat{\gamma}}$  от ее истинного значения. Линия (1) соответствует размеру области усреднения  $11 \times 11$ , линия (2) — размеру области усреднения  $37 \times 37$ , линия (3) — размеру области усреднения  $51 \times 51$ . Пунктирной линией показана теоретическая зависимость

Как видно из рис. 4, расчетные зависимости показывают хорошее совпадение с теоретическими в области высоких значений истинной когерентности. На меньших значениях истинной когерентности наблюдается незначительное (около 3%) занижение расчетных значений. Этот эффект связан с тем, что выражение для границы Рао — Крамера является приближенным и показывает надежные значения лишь для выборок, стремящихся к бесконечности. Существенные расхождения  $\sigma_{\hat{\gamma}}$  с теоретической зависимостью наблюдаются в области низких значений истинной когерентности, где левее некоторого значения  $\gamma_{dp}$  происходит аномальное снижение СКО оценки величины когерентности. Причина этого спадания заключается в наличии смещения оценки когерентности в выражении (2), из-за которого выборка в рамках области усреднения при низких значениях когерентности оказывается статистически ненадежной. Также видно, что положение левой границы аномальной области (положение пика спадания  $\gamma_{dp}$ ) является функцией размера области усреднения: чем больше размер области усреднения, тем ближе к началу координат расположено  $\gamma_{dp}$ .

Для установления этой зависимости выполнен расчетный эксперимент, аналогичный предыдущему, однако при моделировании использован диапазон когерентности от 0 до 0,3, интервал, в котором проводился расчет СКО оценки когерентности, уменьшен до 0,005. Диапазон размера области усреднения положен равным от 11 до 69, результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Зависимость смещения оценки величины когерентности  $d\hat{\gamma}$  и положения пика спада от размера области усреднения  $\gamma_{dp}$**

$N$	$d\hat{\gamma}$	$\gamma_{dp}$	$N$	$d\hat{\gamma}$	$\gamma_{dp}$	$N$	$d\hat{\gamma}$	$\gamma_{dp}$
11	0,081	0,160	31	0,030	0,070	51	0,019	0,055
13	0,069	0,145	33	0,028	0,070	53	0,018	0,055
15	0,060	0,130	35	0,027	0,070	55	0,018	0,055
17	0,053	0,115	37	0,025	0,065	57	0,017	0,050
19	0,048	0,100	39	0,024	0,065	59	0,017	0,050
21	0,043	0,095	41	0,023	0,065	61	0,016	0,050
23	0,040	0,090	43	0,022	0,065	63	0,014	0,050
25	0,037	0,085	45	0,021	0,060	65	0,014	0,045
27	0,034	0,080	47	0,020	0,060	67	0,013	0,045
29	0,032	0,075	49	0,020	0,055	69	0,013	0,045

Как следует из табл. 1, при заданном размере окна усреднения на карте когерентности элементы с яркостью, величина которых меньше, чем положения пика спада, соответствуют аномальной области поведения зависимости СКО оценки величины когерентности от истинного значения когерентности. Соответственно, такие элементы несут в себе искаженную информацию о взаимосвязи РСА-пары и негативно сказываются на точности процесса интерферометрической обработки.

Для иллюстрации соотношения таких пикселей по отношению к пространству всей карты когерентности выполнены несколько расчетов при разных значениях области усреднения для реальной РСА-пары [15], на которых белым цветом выделены области некорректных элементов согласно таблице 1. Результаты показаны на рис. 5. Видно, что с ростом размера области усреднения увеличивается эффективная площадь корректных элементов карты когерентности, что согласуется со статистическим характером выражения (2). С ростом объема выборки происходит накопление полезной статистики и, как следствие, уменьшение количества некорректных элементов, соответствующих областям аномальных спадов СКО. С другой стороны, при увеличении размера области усреднения уменьшается детальность карты ко-

герентности, которая определяется требованиями к выходному продукту интерферометрической обработки.

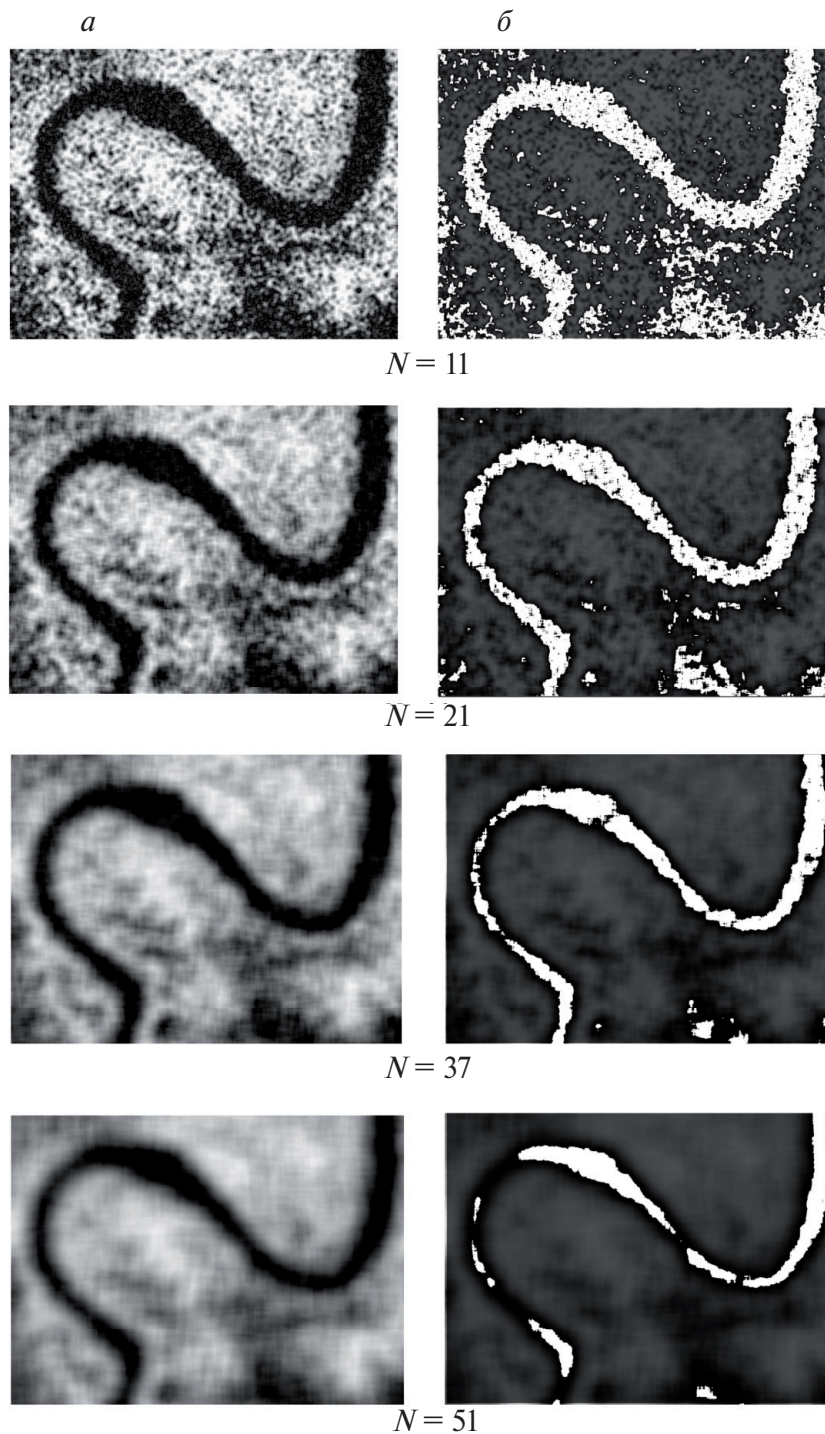


Рис. 5. Моделирование карт когерентности PCA-пары при различных размерах области усреднения:

*a* — карты когерентности; *б* — области с элементами когерентности, лежащими левее пика спадания  $\gamma_{dp}$ . Для улучшения визуального различия между различными областями усреднения исходные изображения в *б* затемнены



## Результаты эксперимента

Для подтверждения увеличения точности выходных продуктов интерферометрической обработки по РСА-изображениям с применением таблицы 1 выполнены два расчета по построению цифровой модели рельефа (ЦМР): один традиционным методом, во втором на промежуточном этапе карта когерентности была замаскирована, исходя из соответствующего значения положения пика спада  $\gamma_{dp}$ . В качестве исходных данных использовалась РСА-пара по данным ALOS PALSAR, одно из изображений пары приведено на рис. 6, а. По приведенным данным с помощью выражения (2) выполнено построение карты когерентности с четырьмя различными областями усреднения:  $11 \times 11$ ,  $21 \times 21$ ,  $37 \times 37$  и  $51 \times 51$ , одна из карт когерентности показана на рис. 6, б. Технические характеристики изображений ALOS PALSAR следующие: длина волны 1,27 ГГц, разрешение 7 м, размер сцены  $45 \times 39$  км, радиометрическое разрешение 5 бит, режим одиночной поляризации [16].

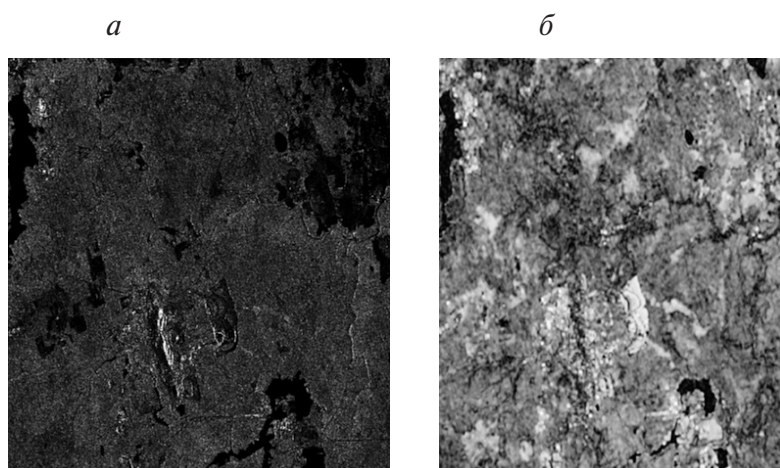


Рис. 6. Одно из двух изображений РСА-пары, полученное с помощью спутниковой системы ALOS PALSAR — а; карта когерентности, построенная по приведенным данным (размер области усреднения составляет  $21 \times 21$ ) — б

По данным РСА-пары выполнено построение развернутой интерферограммы, которая является, с точностью до масштабного коэффициента и постоянного сдвига, проекцией ЦМР в бортовую систему координат. Для анализа точности полученной ЦМР значение элементов развернутой интерферограммы корректируется на величину высоты неоднозначности, в данном случае равную 18 м [17]. Интерферограмма представлена на рис. 7, а. После чего выполнен расчет СКО между преобразованной интерферограммой и эталонной ЦМР (рис. 7, б) от величины когерентности, что и является показателем точности: чем ниже значение СКО между расчетным и эталонным значением, тем ближе расчетная величина находится к модельной, тем точнее полу-

чено ее значение. Расчеты СКО выполнены с шагом 0,05. Повышение точности определено по следующей формуле:

$$\delta = \frac{\text{СКО}_{\text{clas}} - \text{СКО}_{\text{mask}}}{\text{СКО}_{\text{clas}}}, \quad (4)$$

где  $\text{СКО}_{\text{clas}}$ ,  $\text{СКО}_{\text{mask}}$  — величины СКО для традиционного метода и метода, основанного на маскировании карты когерентности соответственно. Результаты представлены в табл. 2.

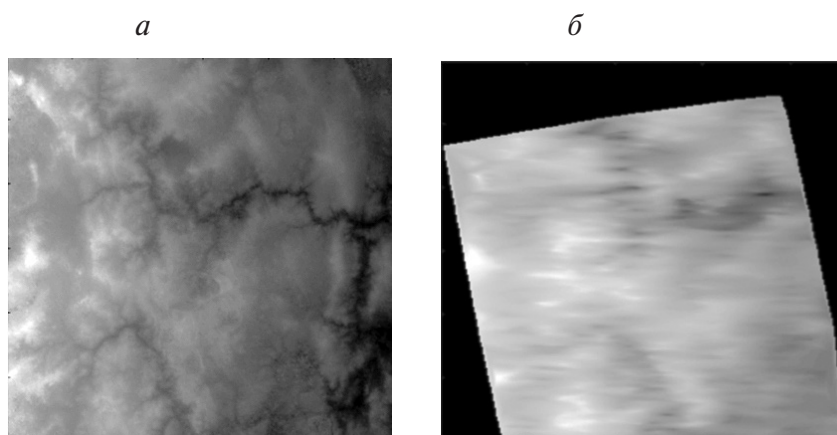


Рис. 7. Развернутая интерферограмма, полученная по данным РСА-пары ALOS PALSAR — *a*; эталонная ЦМР — *б*

Таблица 2

**Величина СКО традиционного и основанного на маскировании карты когерентности методов построения интерферограммы для различных размеров окон усреднения**

$N$	$\text{СКО}_{\text{clas}}, \text{ м}$	$\text{СКО}_{\text{mask}}, \text{ м}$	$\delta, \%$
11	6	5,85	2,5
21	6	5,80	3,3
37	6	5,65	5,8
51	6	5,45	9,2

Как следует из табл. 2, предложенный метод обработки РСА-пары с применением маскирования карт когерентности показывает увеличение точности в сравнении с традиционным, при этом чем больше размер области усреднения, тем более увеличение точности.

### Заключение

Из полученных в ходе работы данных можно сделать следующие выводы:

1. При построении карт когерентности с использованием выражения (2) размер области усреднения не должен быть меньше

чем  $11 \times 11$ . Дальнейший рост размера области усреднения приводит к уменьшению смещения оценки величины когерентности, однако при этом снижается детальность итогового изображения. Поэтому решение о выборе оптимального размера области усреднения следует принимать исходя из требований к детальности выходного продукта.

2. Статистический характер выражения (2) при построении зависимости СКО оценки величины когерентности от ее истинного значения приводит к появлению аномальных областей в зонах с низким значением когерентности, на которых наблюдается резкое уменьшение разброса значений, причем чем больше размер области усреднения, тем ближе к началу координат находится граница аномальной области. Элементы карты когерентности, соответствующие аномальной области поведения зависимости, несут в себе искаженную информацию о реальном взаимоотношении между изображениями РСА-пары и негативно сказываются на точности выходных продуктов интерферометрической обработки.
3. Маскирование в ходе интерферометрической обработки элементов карты когерентности, соответствующих аномальным областям поведения зависимости СКО оценки величины когерентности от ее истинного значения, при обработке РСА-пары данных ALOS PALSAR дает увеличение точности при сравнении развернутой интерферограммы с эталонной ЦМР. Точность увеличивается с ростом размера области усреднения, при этом значение варьируется от 2,5 % при размере области усреднения в  $11 \times 11$  и достигает максимального значения в 9,2 % при  $51 \times 51$ . Следует также отметить существенный рост машинного времени обработки, который при размере области усреднения  $51 \times 51$  составил более пяти часов.

### Список литературы

1. 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, No. 3. Pp. 193–200.
2. 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, I. 6. Pp. 1571–1581.
3. Takeuchi S., Suga Y. Detection of Urban Disaster Using InSAR — A Case Study for the 1999 Great Taiwan Earthquake // Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International. Pp. 1201–1224.

4. Askne J., Hagberg J. O. Potential of interferometric SAR for classification; of land surfaces // Proc. Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'93). Tokyo, Japan, 1993. Pp. 985–987.
5. Gens R., Van J. L. Genderen, SAR interferometry — Issues, techniques // Int. J. Remote Sens. 1996. Vol. 17. Pp. 1803–1835.
6. Lee H. Analysis of Topographic Decorrelation in SAR Interferometry Using Ratio Coherence Imagery // IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing. 2001. Vol. 39, no. 2. Pp. 223–232.
7. Abdelfattah R., Nicolas J. M. Coherence Estimation from Complex Coherence Map using Second Kind Statistics // Intern. Conf. on Image Processing, IICIP'05. Pp. 229–232. 2005.
8. Cattabeni M., Monti-Guarnieri A., Rocca F. Estimation and Improvement of Coherence in SAR Interferograms // Geoscience and Remote Sensing Symposium. 1994. IGARSS '94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation. 1994, Vol. 4. Pp. 720–722.
9. Wang T., Liao M., Perissin D. InSAR Coherence decomposition analysis // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 7. 2010. Vol. 1. Pp. 156–160.
10. Математика в техническом университете / В. Б. Горяинов, И. В. Павлов, Г. М. Цветкова [и др.] // Вып. XVI. Математическая статистика. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 424 с.
11. Левин В. П. Теоретические основы статистической радиотехники. Книга 2. М. : Советское радио, 1968. 412 с.
12. Touzi R., Lopes A., Vachon P. W. Coherence Estimation for SAR Imagery // IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing. 1999. Vol. 37, no. 1. Pp. 135–149.
13. Валеев В. Г. Помехоустойчивость радиотехнических систем. Свердловск : УПИ им. С. М. Кирова, 1987. 101 с.
14. Harry L. Van Trees. Detection, estimation and modulation theory. P. 1. Detection, estimation and linear modulation theory. Krieger Publishing Co., Inc. Melbourne, FL, USA, 1992. 716 p.
15. Sentinel Online [Электронный ресурс]. URL: <https://sentinel.esa.int> (дата обращения: 25.02.2018).
16. About ALOS — Overview and Objectives [Электронный ресурс]. URL: [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about\\_index.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm) (дата обращения: 23.03.2018).
17. Коберниченко В. Г., Сосновский А. В. Анализ алгоритмов интерферометрической обработки данных космической радиолокационной съемки // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2012. Т. 15. № 3. С. 98–106.

## References

1. Monti Guarnieri A., Guccione P., Pasquali P., Desnos Y. L. Multi-mode ENVISAT ASAR interferometry: techniques and preliminary results//*IEE Proc.-Radar Sonar Navig.*, 2003, vol. 150, no. 3, pp. 193–200.
2. Gustavo A. Arciniegas, Wietske Bijker, Norman Kerle, Valentyn A. Tolpekin. Coherence- and Amplitude-Based Analysis of Seismogenic Damage in Bam, Iran, Using ENVISAT ASAR Data//*IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, vol. 45, I. 6, pp. 1571–1581.
3. Takeuchi S., Suga Y. Detection of Urban Disaster Using InSAR — A Case Study for the 1999 Great Taiwan Earthquake//*Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2000. Proceedings. IGARSS 2000. IEEE 2000 International, pp. 1201–1224.
4. Askne J., Hagberg J. O. Potential of interferometric SAR for classification; of land surfaces//*Proc. Int. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS'93)*, Tokyo, Japan, 1993, pp. 985–987.
5. Gens R., Van Genderen J. L. SAR interferometry — Issues, techniques//*Int. J. Remote Sens.*, 1996, vol. 17, pp. 1803–1835.
6. Lee H. Analysis of Topographic Decorrelation in SAR Interferometry Using Ratio Coherence Imagery//*IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 2001, vol. 39, no. 2, pp. 223–232.
7. Abdelfattah R., Nicolas J. M. Coherence Estimation from Complex Coherence Map using Second Kind Statistics, *Intern. Conf. on Image Processing*, ICIP'05, 2005, pp. II 229–232.
8. Cattabeni M., Monti-Guarnieri A., Rocca F. Estimation and Improvement of Coherence in SAR Interferograms//*Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1994. IGARSS '94. Surface and Atmospheric Remote Sensing: Technologies, Data Analysis and Interpretation, vol.4, pp. 720–722.
9. Wang T., Liao M., Perissin D. InSAR Coherence decomposition analysis//*IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 7, 2010, vol.1, pp. 156–160.
10. Goriainov V. B., Pavlov I. V., TCvetkova G. M. *Matematika v tekhnicheskoy universitete*. Vy`p. XVI. Matematicheskaya statistika. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E` . Bauman, 2001, 424 p. (In Russian).
11. Levin B. R. *Teoreticheskiye osnovy`statisticheskoy` radiotekhniki*. Kniga 2. Moscow, Sovetskoye radio, 1968, 412 p. (In Russian).
12. Touzi R., Lopes A., Vachon P. W. Coherence Estimation for SAR Imagery//*IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing*, 1999, vol. 37, no. 1, pp. 135–149.
13. Valeev V. G. *Pomehoustoi`chivost` radiotekhnicheskikh izmeritel`ny`kh sistem*. Sverdlovsk, UPI im. S. M. Kirova, 1987. 101 p. (In Russian).
14. Harry L. Van Trees. *Detection, estimation and modulation theory*. P. 1. Detection, estimation and linear modulation theory. Krieger Publishing Co., Inc. Melbourne, FL, USA, 1992, 716 p.

15. Sentinel Online. Available at: <https://sentinel.esa.int> (accessed 25.02.2018).

16. About ALOS — Overview and Objectives. Available at: [http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about\\_index.htm](http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/about/about_index.htm) (accessed 23.03.2018).

14. Kobernichenko V. G., Sosnovsky A. V. InSAR data processing in high resolution space-based radar imagery//*Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskiye sistemy*. 2012, vol. 15, no. 3, pp. 98–106. (In Russian).

### Информация об авторах

**Виноградова Нина Сергеевна.** Окончила физический факультет Уральского государственного университета им. А. М. Горького (2009), магистр. С 2015 г. — старший преподаватель, зам. директора Департамента радиоэлектроники и связи ИРИТ-РТФ

**Сосновский Андрей Васильевич.** Окончил Радиотехнический институт — РТФ Уральского государственного технического университета — УПИ (2006), инженер. С 2014 г. — ведущий инженер, старший преподаватель Департамента радиоэлектроники и связи ИРИТ-РТФ.

### Information about the authors

**Nina S. Vinogradova.** Graduated from the faculty of physics of Gorky Ural state university (2009), master of physics. Since 2015 works as a senior lecturer and a vice-director of the department of radio-electronics and communication of the Institute of radio-electronics and IT of the Ural federal university.

**Andrey V. Sosnovsky.** Graduated from the faculty of radio engineering of the Ural state technical university — UPI (2006), engineer. Since 2014 works as a senior engineer and senior lecturer of the department of radio-electronics and communication of the Institute of radio-electronics and IT of the Ural federal university.