

## Основные результаты интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой X и L диапазонов

А.А. Феоктистов<sup>1</sup>, А.И. Захаров<sup>2</sup>, П.В. Денисов<sup>1</sup>, М.А. Гусев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ)

ОАО «Российские космические системы»,

127490, г. Москва, ул. Декабристов, вл.51, корп. 25.

E-mail: alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru

<sup>2</sup>Фрязинский филиал ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН

141190 г. Фрязино, пл. Б.А.Введенского, д.1

E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru

В работе сообщается о результатах анализа точности совмещения интерферометрических пар изображений PCA ALOS/PALSAR с использованием программных пакетов PHOTOMOD Radar 1.2.3 и SARscape 4.3. Как и в случае данных PCA COSMO-SkyMed, средние по изображению значения когерентности, полученные с использованием программного пакета PHOTOMOD Radar, оказались выше аналогичных значений, полученных с использованием программного пакета SARscape. Сообщается о результатах дополнительных специальных экспериментальных исследований. Показано, что причина различий между средними значениями когерентности связана с тем, что в программном пакете PHOTOMOD Radar при расчете значений когерентности для усредненных изображений используются значения, рассчитанные для исходных изображений, что некорректно.

**Ключевые слова:** PCA, интерферометрическая обработка, точность совмещения изображений, когерентность, ЦММ, COSMO-SkyMed, ALOS/PALSAR, PHOTOMOD Radar, SARscape.

### Введение

В Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) ОАО «Российские космические системы» проводятся работы по созданию и отработке полного технологического цикла интерферометрической и дифференциально-интерферометрической обработки данных перспективных российских радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA). Ранее в (Феоктистов и др., 2011) были представлены предварительные результаты интерферометрической обработки данных PCA C-диапазона COSMO-SkyMed, Италия, с длиной волны излучения 3,1 см, полученных по территории трех регионов России в период времени с ноября 2009 г. по январь 2010 г. в маршрутном режиме съемки HIMAGE с пространственным разрешением 3 м и размером кадра 40x40 км<sup>2</sup>. В данной работе изложены результаты анализа точности совмещения интерферометрических пар изображений, полученных с помощью PCA L-диапазона ALOS/PALSAR, Япония, с длиной волны излучения 23,5 см, в маршрутном режиме съемки FBS с пространственным разрешением 7 м и размером кадра 70x70 км<sup>2</sup>. Кроме того, сообщается о результатах дополнительных экспериментальных исследований. Программно-алгоритмическую основу обработки составили: (1) программный пакет SARscape 4.3, созданный фирмой Sarmap s.a., Швейцария, и (2) российский программный пакет Photomod Radar 1.2.3 (компания РАКУРС, Москва). При проведении обработки использовалась опорная цифровая модель местности SRTM V4 с размером ячейки 90\*90 м<sup>2</sup>.

### Результаты совмещения изображений PCA ALOS/PALSAR

При проведении обработки использовались четыре изображения ALOS/PALSAR по территории полигона Тверской в Тверской области с датами съемки 24.12.2006; 08.02.2007;

27.12.2007 и 11.02.2008. С помощью этих изображений были сформированы шесть интерферометрических пар изображений. Процедура расчета значений когерентности выполнялась после операции усреднения (Multilooking); значения коэффициентов по дальности и азимуту, равнялись, соответственно, 2 и 5. Для расчета значений когерентности в каждом пакете использовались свои собственные программные средства. При проведении оценки значений когерентности для каждого пикселя изображения в обоих пакетах использовалось одно и то же стандартное выражение:

$$C = \frac{\left| \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} I_1(x, y) * I_2^*(x, y) \right|}{\sqrt{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} |I_1(x, y)|^2 * \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} |I_2(x, y)|^2}} \quad (1)$$

где  $I_1(x, y)$  и  $I_2(x, y)$  – значения сигнала основного и вспомогательного изображений интерферометрической пары, \* – знак комплексного сопряжения,  $X$  и  $Y$  – размеры области по дальности и азимуту (окна), которые по умолчанию задавались равными 3 (объем выборки равнялся 9).

Полученные с помощью программных пакетов PHOTOMOD Radar и SARscape средние значения когерентности для этих интерферометрических пар представлены, соответственно, во втором и третьем столбцах Таблицы 1.

Таблица 1. Результаты совмещения изображений PCA ALOS/PALSAR

№ п/п	Интерферометрические пары изображений	Средние значения когерентности	
		PHOTOMOD Radar	SARscape
1	24.12.2006 - 08.02.2007	0,396	0,242
2	24.12.2006 - 27.12.2007	0,362	0,132
3	24.12.2006 - 11.02.2008	-	0,059
4	08.02.2007 - 27.12.2007	0,359	0,132
5	08.02.2007 - 11.02.2008	0,358	0,080
6	27.12.2007 - 11.02.2008	0,386	0,248

Как следует из представленных данных, средние значения когерентности максимальны для первой и шестой интерферометрических пар, когда временной интервал между съемками основного и вспомогательного изображений минимален и равен 46 суткам. В случае программного пакета PHOTOMOD Radar с увеличением временного интервала между съемками (до величин порядка 400 суток) наблюдается относительно слабое падение средних значений когерентности - не более 10%. Все значения, полученные с помощью пакета SARscape, меньше аналогичных значений, полученных с использованием программного пакета PHOTOMOD Radar. Причем, если при минимальном временном интервале в 46 суток средние значения когерентности, полученные с помощью программного пакета PHOTOMOD Radar, примерно в полтора раза превышают значения, полученные с помощью программного пакета SARscape, то по мере увеличения временного интервала это соотношение возрастает вплоть до 4,5 (для пятой интерферометрической пары). Аналогичные результаты были получены ранее при проведении обработки данных PCA COSMO-SkyMed (Феоктистов и др., 2011).

Однако точностные характеристики конечных результатов интерферометрической обработки, ЦММ, построенных по данным PCA COSMO-SkyMed, оказались несколько выше у программного пакета SARscape (Феоктистов и др., 2011), что вызывало определенные во-

просы. В связи с этим разработчики пакета SARscape провели предварительный анализ и пришли к выводу (Pasquali and Cantone, 2011), что различия в оценках значений когерентности могут быть связаны с тем, что процедура расчета когерентности в пакетах SARscape и Photomod Radar могла быть организована по-разному, в связи с чем корректную интерпретацию следует проводить с учетом выводов, сделанных ранее в работе (Touzi et al., 1999). В этой работе были выполнены модельные расчеты значений когерентности для двух случайных комплексных гауссовских процессов, с помощью которых была смоделирована реальная ситуация, возникающая при расчетах значений когерентности для реальных изображений PCA. Было показано, что проведение расчетов значений когерентности с использованием выборки ограниченного объема, см. (1), приводит к завышению получаемой оценки для когерентности, причем этот эффект усиливается при низких значениях когерентности.

### Результаты дополнительного анализа

Для оценки применимости результатов модельных расчетов к данным реальных PCA в НЦ ОМЗ был проведен специальный эксперимент с использованием интерферометрической пары изображений PCA ALOS/PALSAR (от 21.06.2009 и 06.08.2009) по территории Ставропольского края, которые содержали изображения сельскохозяйственных полей, на которых было выбрано 5 достаточно однородных фрагментов с линейными размерами порядка 100x100 пикселей с отличающимися средними значениями когерентности. Расчеты когерентности проводились для размеров окон  $X$  и  $Y$ , см. (1), равных 3\*3, 5\*5, 7\*7, 11\*11 и 21\*21; соответствующие объемы выборок равнялись, очевидно, 9, 25, 49, 121 и 441 (Феоктистов, 2012).

При проведении расчетов использовался пакет SARscape, поскольку в российском пакете PHOTOMOD Radar возможность изменения размера окна не предусмотрена.

Значения когерентности, рассчитанные с помощью каждого из 5 окон, были усреднены по площади каждого из 5 квазиоднородных фрагментов, что позволило получить оценки математического ожидания для выборочных значений когерентности. Были построены четыре зависимости для выборочных средних значений когерентности, рассчитанных с использованием четырех окон размером 3\*3, 5\*5, 7\*7 и 11\*11. В качестве оценки истинных значений когерентности по оси абсцисс откладывались усредненные по площади квазиоднородных фрагментов значения, полученные с помощью самого большого окна размером 21x21.

Основные свойства экспериментальных зависимостей: (1) все выборочные значения когерентности действительно завышены по сравнению с истинными; (2) чем меньше истинное значение когерентности, тем сильнее это завышение; (3) с увеличением объема выборки завышение уменьшается. Отметим, что полученные экспериментальные зависимости передают все основные свойства модельных зависимостей из (Touzi et al., 1999); возможные отклонения могут быть объяснены: (1) недостаточной однородностью выбранных фрагментов; (2) в качестве истинных значений брались значения, полученные с помощью относительно большого, но не бесконечного, окна размером 21x21 и (3) реальные данные могли иметь не гауссово распределение.

Далее, в таблице 2 представлены усредненные по всей площади изображений значения когерентности, рассчитанные с помощью пакетов PHOTOMOD Radar и SARscape для одной и той же интерферометрической пары изображений PCA COSMO-SkyMed по Амурской области; при расчете когерентности использовался стандартный размер окна - 3x3 пикселя. Расчеты были выполнены дважды: сначала по исходным изображениям (Multilooking 1x1), а потом по изображениям, усредненным с коэффициентами 4 и 5 по дальности и азимуту, соответственно (Multilooking 4x5).

Таблица 2. Зависимость средних значений когерентности от параметров процедуры усреднения

	<b>Multilooking 1x1</b>	<b>Multilooking 4x5</b>
PHOTOMOD Radar	0,477996	0,477994
SARscape	0,479293	0,250227

На основании представленных данных могут быть сделаны следующие выводы:

- 1) Совпадение с точностью до третьего знака средних значений когерентности, рассчитанных для исходных изображений (Multilooking 1x1) обоими пакетами означает, что точности совмещения достаточно близки, а алгоритмы расчета когерентности действительно совпадают.
- 2) Совпадение с точностью до шестого знака средних значений когерентности, рассчитанных с помощью пакета Photomod Radar для исходного формата изображений (Multilooking 1x1) и формата с усреднением (Multilooking 4x5), свидетельствует о том, что, когерентность для формата с усреднением в этом пакете получается просто путем соответствующего усреднения (с окном 4x5) тех значений когерентности, которые были рассчитаны для исходных изображений; в результате получаемые значения когерентности практически не зависят от параметров усреднения.

Наконец, значительное падение средних значений когерентности, рассчитанных с помощью пакета SARscape для усредненных данных (Multilooking 4x5) по сравнению с исходным форматом (Multilooking 1x1) с 0,479 до 0,250 означает, что в пакете SARscape расчет для усредненных данных проводится заново; при этом вследствие увеличения (за счет усреднения исходных изображений в рамках операции Multilooking) объемов выборки происходит соответствующее падение рассчитываемых средних значений когерентности.

### Заключение

- 1) Сообщается о результатах анализа точности совмещения интерферометрических пар изображений L-диапазона ALOS/PALSAR, с использованием программных пакетов PHOTOMOD Radar 1.2.3 и SARscape 4.3.
- 2) Показано, что, как и в случае данных PCA COSMO-SkyMed (Феоктистов и др., 2011), усредненные по площади изображений значения когерентности, полученные с использованием программного пакета PHOTOMOD Radar, выше аналогичных значений, полученных с использованием программного пакета SARscape.
- 3) Сообщается о результатах дополнительных экспериментальных исследований, в результате проведения которых было показано, что причина различий между средними значениями когерентности связана с тем, что в программном пакете PHOTOMOD Radar при расчете значений когерентности для усредненных изображений используются значения, рассчитанные для исходных изображений, что некорректно.
- 4) Полученные экспериментальные зависимости полностью подтверждают полученные ранее в (Touzi и др., 1999) основные свойства модельных зависимостей.

### Литература

1. *Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А.* Перспективы разработки комплекса интерферометрической и дифференциально-интерферометрической обработки данных российских космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. №2. С. 310–317.

2. Феоктистов А. А., Захаров А. И., Денисов П. В., Гусев М. А. Состояние и перспективы разработки комплекса интерферометрической и дифференциально-интерферометрической обработки данных российских космических радиолокаторов с синтезированной апертурой // Тезисы докладов IV Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения информационных технологий» 15–17 июня 2011 г. ISBN 978-5-88070-296-1. Открытое акционерное общество «Российская корпорация ракетно-космического приборостроения и информационных систем». М., 2011. «Радиотехника». С. 90–91.
3. Pasquali P. and Cantone A. Private communication. 2011.
4. Феоктистов А. А., Захаров А. И., Денисов П. В., Гусев М. А. К вопросу о точности совмещения интерферометрических пар изображений // II Всероссийские Армандовские чтения. Муром, 26.06-28-06. 2012. Доклады конференции. (В печати).

## **X and L bands space SAR data interferometric processing basic results**

**A.A. Feoktistov <sup>1</sup>, A.I. Zakharov <sup>2</sup>, P.V. Denisov <sup>1</sup>, M.A. Gusev <sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Joint Stock Company «Russian Space Systems»  
51, building 25, Dekabristov St., Moscow, 127490, Russia  
E-mail: alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru*

<sup>2</sup>*Fryazino branch of Kotelnikov' IRE RAS  
bldg. 1, Vvedensky square, Fryazino, 141190, Russia  
E-mail: aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru*

The results of SAR ALOS/PALSAR interferometric pairs coregistration precision analysis by means of PHOTOMOD Radar and SARscape software packages are presented. It was shown, that, as well as in case of SAR COSMO-SkyMed data, mean coherence values, received by means of PHOTOMOD Radar software package, are higher than the similar values received by means of SARscape software package.

Results of additional special experimental researches are discussed. It was shown: the cause of difference between mean coherence values is connected by that in software package PHOTOMOD Radar at coherence value calculation for multilooked images the initial images data are used, that is incorrect.

**Keywords:** SAR, interferometric processing, coregistration precision, coherence, DEM, COSMO-SkyMed, ALOS/PALSAR, PHOTOMOD Radar, SARscape.