

## **К вопросу о точности совмещения интерферометрических пар изображений**

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; ОАО “Российские космические системы” 127490, г. Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25; E-mail: [alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru](mailto:alexey.a.feoktistov@ntsomz.ru).

<sup>2</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН; 141190, Московская обл., г. Фрязино, [пл. Введенского, д. 1](#); E-mail: [aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru](mailto:aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru)

*Сообщается о результатах первого цикла интерферометрической обработки данных PCA COSMO-SkyMed и ALOS/PALSAR по территории России с использованием программных пакетов PHOTOMOD Radar 1.2.3 и SARscape 4.3. Особое внимание уделено вопросу точности совмещения интерферометрических пар изображений.*

*The results of COSMO-SkyMed and ALOS/PALSAR data InSAR processing for Russian regions by means of PHOTOMOD Radar and SARscape software packages are presented. Coregistration accuracy is analyzed.*

В Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) ОАО “Российские космические системы” ведутся работы по созданию и отработке полного технологического цикла обработки данных перспективных российских радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) с использованием данных зарубежных космических РСА. Основное внимание в рамках проводимых работ уделяется вопросам интерферометрической и дифференциальной интерферометрической обработки.

В докладе представлены результаты первого цикла интерферометрической обработки данных: (1) РСА COSMO-SkyMed (Италия), работающего в коротковолновом X-диапазоне (3,1 см) и (2) РСА ALOS/PALSAR (Япония), работающего в длинноволновом L-диапазоне (23,6 см) - т.е. и самого коротковолнового, и самого длинноволнового диапазонов длин волн, используемых в современных космических РСА [1,2]. Особое внимание уделено вопросу точности совмещения интерферометрических пар изображений.

Программно-алгоритмическую основу обработки данных составили: (1) программный пакет SARscape 4.3, созданный фирмой Sarmap s.a., Швейцария и (2) российский программный пакет Photomod Radar 1.2.3, созданный фирмой РАКУРС, Москва, который должен быть использован в качестве базового программного средства обработки данных перспективных российских РСА.

При проведении обработки данных РСА COSMO-SkyMed использовались серии из четырех изображений по территории Астраханской области, трех изображений по территории Краснодарского края (Черноморское побережье в районе г. Сочи) и 15 изображений по территории Амурской области (вблизи города Шимановск), по которой были получены наиболее интересные результаты, которые и представлены в данном докладе.

При проведении обработки данных РСА ALOS/PALSAR использовалась серия из четырех изображений по территории полигона Тверской в Тверской области.

Для количественной оценки качества совмещения использовались средние по площади изображений значения когерентности. Процедура расчета значений когерентности выполнялась после операции усреднения (Multilooking); значения коэффициентов по дальности и азимуту, равнялись, соответственно, 4 и 5 для данных РСА COSMO-SkyMed и 2 и 5 для данных РСА ALOS/PALSAR. 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).

Процедура совмещения выполнялась в автоматическом режиме.

**1. Основные результаты обработки, полученные с использованием изображений PCA COSMO-SkyMed по территории Амурской области.** Данные PCA COSMO-SkyMed по территории Амурской области были получены 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>. С использованием 15 изображений были сформированы три серии интерферометрических пар изображений. Общие принципы формирования каждой серии - первое из изображений серии выбиралось в качестве основного; далее в качестве вспомогательных изображений интерферометрических пар поочередно выбирались последующие по времени съемки изображения. Серия прерывалась после того, как совмещение изображений оказывалось невозможным для 2-3 следующих друг за другом изображений (по времени съемки) [1,2].

Полученные результаты представлены на рис. 1. По оси абсцисс отложены значения временного интервала между съемками основного и вспомогательного изображений каждой интерферометрической пары, а по оси ординат - средние по площади изображений значения когерентности.

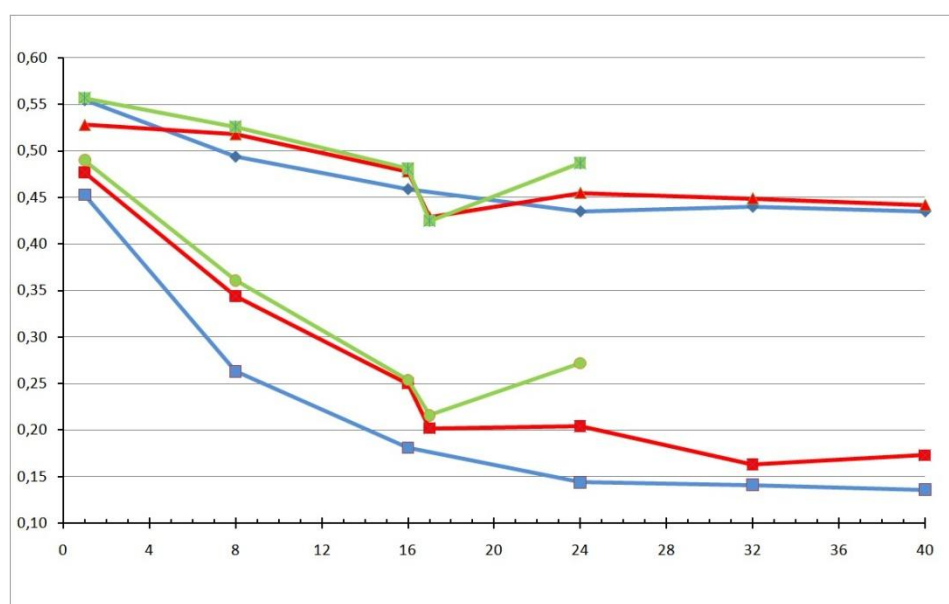


Рис. 1. Результаты обработки данных PCA COSMO-SkyMed.

В верхней части рис. 1 - зависимости для 3 серий изображений, полученные с помощью пакета PHOTOMOD Radar, в нижней – с помощью SARscape. Совмещение удалось выполнить для серий 1 и 2 с временными интервалами между съемками основного и вспомогательных изображений от 1 до 40 суток и для серии 3 с интервалами от 1 до 24 суток. С увеличением временного интервала средние значения когерентности по данным PHOTOMOD Radar падают примерно на 20%. Все значения, полученные с помощью пакета SARscape, существенно ниже. При временном интервале в 1 сутки различия между PHOTOMOD Radar и SARscape относительно невелики - примерно 20%. С ростом временного интервала различие достигает величин порядка 1,5 – 2, а в отдельных случаях и 3 раз.

**2. Основные результаты обработки, полученные с использованием изображений PCA ALOS/PALSAR по территории Тверской области.** Данные PCA ALOS/PALSAR были получены по территории тестового полигона Тверской в Тверской области в период времени с декабря 2006 г. по февраль 2008 г. в маршрутном режиме съемки FBS с пространственным разрешением 7 м и размером кадра 70x70 км<sup>2</sup>. Даты съемки четырех изображений - 24.12.2006; 08.02.2007; 27.12.2007 и 11.02.2008. С помощью этих изображений были сформированы шесть интерферометрических пар изображений (использовались все возможные комбинации) [2].

Полученные с помощью программных пакетов PHOTOMOD Radar и SARscape средние значения когерентности для этих интерферометрических пар представлены, соответственно, в третьем и четвертом столбцах таблицы 1 [2].

Таблица 1. Результаты совмещения изображений 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).

**3. Интерпретация полученных результатов.** Результаты совмещения в автоматическом режиме показали, что средние значения когерентности, полученные с использованием программного пакета PHOTOMOD Radar, выше аналогичных значений, полученных с использованием программного пакета SARscape – как в случае

данных PCA COSMO-SkyMed, так и данных PCA ALOS/PALSAR - в некоторых случаях многократно. Однако точностные характеристики конечных результатов интерферометрической обработки, ЦММ, построенных по данным PCA COSMO-SkyMed, оказались несколько выше у программного пакета SARscape [1,2], что вызывало определенные вопросы. В связи с этим разработчики пакета SARscape провели предварительный анализ и пришли к выводу, 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 [3], в связи с чем корректную интерпретацию следует проводить с учетом выводов, сделанных ранее в работе [4]. 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.

**4. Экспериментальная проверка.** Для проверки 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 [5].

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 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 [1]; 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; размер окна при расчете когерентности - 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 (Multilooking)

	Multilooking 1x1	Multilooking 4x5
PHOTOMOD Radar	0,477996	0,477994
SARscape	0,479293	0,250227

На основании представленных данных могут быть сделаны следующие выводы:

- 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.

- 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 (по окну 4x4) 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 4x4) по сравнению с исходным форматом (Multilooking 1x1) с 0,479 до 0,250 означает, что в пакете SARscape алгоритм учета усреднения работает более адекватно – расчет для усредненных данных (Multilooking 4x4) проводится заново, причем для увеличенных соответствующим образом размеров окна.

**5. Заключение.** Сообщается о результатах первого цикла интерферометрической обработки данных PCA COSMO-SkyMed и ALOS/PALSAR по территории России с использованием программных пакетов PHOTOMOD Radar 1.2.3 и SARscape 4.3. Особое внимание уделено вопросу точности совмещения интерферометрических пар изображений.

Показано, что более высокие значения когерентности, получаемые с помощью пакета PHOTOMOD Radar, свидетельствуют не о более высокой точности совмещения интерферометрических пар изображений, а том, что вычислительная процедура в этом пакете организована некорректно.

В целом накопленный в НИЦ ОМЗ опыт интерферометрической обработки данных PCA показал, что на сегодняшний день российский пакет PHOTOMOD Radar уступает по многим показателям пакету SARscape и для обеспечения его конкурентоспособности на рынке программной продукции необходима его существенная модернизация.

Данные PCA COSMO-SkyMed были получены ФГУП "Рособоронэкспорт" от итальянской компании "e-GEOS" и, далее, переданы в ОАО "Российские космические системы".

## 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. 20011. 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.. "Радиотехника". С. 90-91.
3. Pasquali P. and Cantone A. Private communication.
4. Touzi R., Lopes A., Bruniquel J., and Vachon P.W.. Coherence Estimation for SAR Imagery // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 37, No 1, January 1999, pp. 135-149.
5. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. Основные результаты интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой X и L диапазонов // Тезисы докладов Девятой открытой Всероссийской конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». ИКИ РАН Москва. 14-18 ноября 2011 г. М.: ИКИ РАН. 2011. С. 131.