

## Перспективы разработки комплекса интерферометрической и дифференциально-интерферометрической обработки данных российских космических радиолокаторов с синтезированной апертурой

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 приводятся основные результаты первого цикла интерферометрической обработки данных PCA COSMO-SkyMed по территории трех регионов России с использованием программных пакетов PHOTOMOD Radar 1.2.3 и SARscape 4.3. Результаты обработки трех серий интерферометрических пар изображений по территории Амурской области показали, что средние значения когерентности при временном интервале между съемками основного и вспомогательного изображений в одни сутки лежат на уровне 0,528 - 0,557; при увеличении временного интервала до 40 суток имело место падение средних значений когерентности примерно на 20%. Отработаны процедуры построения ЦММ; проведена оценка точности конечных результатов интерферометрической обработки.

**Ключевые слова:** PCA, ЦММ, COSMO-SkyMed, PHOTOMOD Radar, SARscape, интерферометрическая обработка, совмещение изображений, коррекция нормального компонента базовой линии.

### 1. Введение

В Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) ОАО “Российские космические системы” начаты работы по созданию и отработке полного технологического цикла обработки данных перспективных российских радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА); основное внимание в рамках проводимых работ уделяется вопросам интерферометрической и дифференциально-интерферометрической обработки. Исследуются практические возможности использования данных разных диапазонов для построения цифровых моделей местности (ЦММ) и цифровых карт смещений (ЦКС) подстилающей поверхности для разных регионов Российской Федерации и выбора оптимальных алгоритмов совмещения, фильтрации и развертки фазы для различных типов подстилающей поверхности.

В данной статье представлены основные результаты первого цикла интерферометрической обработки данных PCA COSMO-SkyMed (Италия), 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>. Данные были получены ФГУП «Рособоронэкспорт» от итальянской компании «e-GEOS» и далее переданы в ОАО «Российские космические системы». **Поскольку официальное разрешение на демонстрацию самих изображений PCA COSMO-SkyMed предоставлено не было, в данной статье полученные результаты будут представлены исключительно в табличном виде.**

РСА COSMO-SkyMed функционирует в коротковолновом X-диапазоне с длиной волны зондирующего сигнала 3,1 см, поэтому его данные могут использоваться для обработки технологии обработки данных перспективного отечественного космического РСА X-диапазона ЭЛСАР-2, который будет установлен на борту КА МЕТЕОР-М № 3.

При проведении обработки параллельно использовались: (1) отечественный программный пакет Photomod Radar 1.2.3, созданный фирмой РАКУРС, Москва, и (2) один из самых известных в России зарубежный программный пакет SARscape 4.3, созданный фирмой Sarmap s.a., Швейцария.

На основании полученных результатов будут подготовлены предложения по повышению эффективности и производительности программного пакета Photomod Radar, поскольку планируется, что этот программный пакет будет использован в качестве базового программного средства обработки данных перспективных отечественных РСА.

## **2. Основные результаты, полученные на этапе совмещения изображений**

В качестве количественного критерия оценки качества совмещения основного и вспомогательного изображений интерферометрических пар использовались средние по площади изображений значения когерентности. Процедура совмещения выполнялась в автоматическом режиме со значениями параметров, заданными по умолчанию.

### *2.1. Программный пакет PHOTOMOD Radar*

При проведении совмещения изображений использовалась модифицированная версия программы PHOTOMOD Radar, в которой: (1) была дополнительно включена процедура предварительного расчета величин относительных сдвигов основного и вспомогательного изображений интерферометрической пары с использованием орбитальных данных и (2) для поиска и обнаружения корреляционно-экстремальным методом хорошо опознаваемых фрагментов была реализована специальная схема сканирования по площади каждого из 9 сегментов, автоматически выделяемых программой на площади основного изображения. Используемые по умолчанию параметры - размер фрагментов 100\*100 пикселей; порог по когерентности 0,45; пороговое значение СКО (между положением ОТМ на основном изображении и положением, предсказываемым аффинным преобразованием для положения этих ОТМ на вспомогательном изображении) равно 0,2 от размера пикселя.

При проведении обработки использовались четыре изображения РСА COSMO-SkyMed по территории Астраханской области, три изображения по территории Краснодарского края (Черноморское побережье в районе г. Сочи) и 15 изображений по территории Амурской области (вблизи города Шимановск).

По территории Астраханской области были сформированы 3 интерферометрические пары изображений с временными интервалами между съемками основного и вспомогательного изображений в 1, 8 и 16 суток, соответственно. Было выявлено, что с увеличением временного интервала имело место падение средних значений когерентности, которые равнялись, соответственно, 0,595; 0,559 и 0,482.

По территории Краснодарского края сформированы две интерферометрические пары изображений с временными интервалами между съемками основного и вспомогательного

изображений в 16 и 32 суток. В данном случае ситуация существенно усложнилась в связи с тем, что около половины площади изображений было занято изображением морской поверхности. Тем не менее, процедура совмещения была успешно завершена, хотя это и потребовало заметно больше машинного времени. Средние значения когерентности составили, соответственно, 0,421 и 0,410.

Наиболее интересные результаты были получены по Амурской области. При проведении обработки использовались 15 изображений PCA COSMO-SkyMed со сроками проведения съемки с 11 ноября 2009 г. по 22 января 2010 г. (с общим временным интервалом в 72 суток). В это время в Амурской области стояли достаточно сильные морозы. С использованием данных 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).

Полученные с помощью программного пакета PHOTOMOD Radar результаты для трех серий интерферометрических пар изображений представлены, соответственно, в Таблицах 1-3.

В качестве основного изображения первой серии использовалось изображение, полученное 11.11.2009 г. Совмещение удалось выполнить для 6 пар изображений с общим временным интервалом до 40 суток; в первой строке Таблицы 1 значения временного интервала между съемками основного и вспомогательного изображений каждой пары; во второй строке - средние значения когерентности. Как следует из представленных данных, с увеличением временного интервала между съемками с 1 до 40 суток средние значения когерентности монотонно (за единственным исключением) падают с 0,555 до 0,435.

Таблица 1. Результаты совмещения первой серии изображений по территории Амурской области

Временной интервал между съемками, сутки	1	8	16	24	32	40
Средние значения когерентности, PHOTOMOD Radar	0,555	0,494	0,459	0,435	0,440	0,435
Средние значения когерентности, SARscape	0,453	0,263	0,181	0,144	0,141	0,136

Для второй серии в качестве основного изображения использовалось изображение, полученное 13.12.2009 г. В данном случае совмещение удалось выполнить для 7 пар изображений; общий временной интервал, как и в первом случае - 40 суток. В первой строке Таблицы 2 значения временного интервала между съемками изображений каждой пары; во второй строке - средние значения когерентности. Как следует из представленных данных, с увеличением временного интервала между съемками с 1 до 40 суток средние значения когерентности монотонно (также за единственным исключением) падают с 0,528 до 0,442.

Таблица 2. Результаты совмещения второй серии изображений по территории Амурской области

Временной интервал между съемками, сутки	1	8	16	17	24	32	40
Средние значения когерентности, PHOTOMOD Radar	0,528	0,518	0,478	0,429	0,455	0,449	0,442
Средние значения когерентности, SARscape	0,344	0,250	0,201	0,203	0,163	0,172	0,344

И, наконец, третья серия изображений. В качестве основного использовалось изображение, полученное 29.12.2009 г. Совмещение удалось выполнить для всех оставшихся 5 пар изображений с общим временным интервалом в 24 суток. При этом при увеличении временного интервала между съемками с 1 до 17 суток средние значения когерентности падают с 0,557 до 0,425, а затем возрастают до 0,487.

Таблица 3. Результаты совмещения третьей серии изображений по территории Амурской области

Временной интервал между съемками, сутки	1	8	16	17	24
Средние значения когерентности, PHOTOMOD Radar	0,557	0,526	0,481	0,425	0,487
Средние значения когерентности, SARscape	0,490	0,361	0,254	0,216	0,272

## 2.2. SARscape

Аналогичный цикл обработки был выполнен далее с использованием программного пакета SARscape, в котором процедура совмещения выполняется в 3 этапа: (1) первоначальная оценка величины общего сдвига основного и вспомогательного изображений на основе орбитальной информации; (2) расчет сдвига методом кросс-корреляции для набора фрагментов основного и вспомогательного изображений (амплитудных) в узлах регулярной сетки; по умолчанию - размер сетки 6\*9, размеры фрагментов 256\*512 пикселей (первые цифры - по дальности, вторые - по азимуту) и порог по кросс-корреляции, равный 0,25; (3) уточнение сдвига с использованием корреляционно-экстремального метода по критерию максимума средней когерентности для набора фрагментов основного и вспомогательного изображений (комплексных, т.е. с учетом фазы) в узлах регулярной сетки; по умолчанию - размер сетки 20\*20, размеры фрагментов 32\*32 пикселя и пороговое значение для отношения сигнал/шум, равное 2.8.

Полученные по территории Амурской области результаты представлены в третьих строках Таблиц 1-3. Сопоставление средних значений когерентности для одних и тех же интерферометрических пар изображений позволяет сделать однозначный вывод о том, что все значения, полученные с помощью пакета SARscape, меньше аналогичных значений, полученных с использованием программного пакета PHOTOMOD Radar. Причем, если при временном интервале в 1 сутки (и относительно высоком уровне значений когерентности) отличия составляют несколько десятков процентов, то по мере увеличения временного интервала (и соответствующего уменьшения уровня когерентности) различие достигает величин порядка 1,5 – 2, а в отдельных случаях и 3 раз.

Необходимо отметить, что примерно те же соотношения были получены и при проведении сравнительного анализа результатов обработки по территории Астраханской области и Краснодарского края.

## 3. Основные результаты, полученные на этапе анализа ЦММ

В качестве количественных характеристик при проведении оценки точности конечных результатов интерферометрической обработки использовались усредненные по площади изображений значения разности значений высоты и их СКО. Указанные значения рас-

считывались между отдельными реализациями ЦММ, полученными с использованием наборов интерферометрических пар изображений по одной и той же территории. Кроме того, оценивались различия между отдельными реализациями ЦММ и опорной ЦММ SRTM V4.

При проведении обработки использовались три интерферометрические пары изображений, полученные по территории Амурской области с временными интервалами между съемками основного и вспомогательного изображений в 1 сутки (первые пары изображений каждой из трех серий интерферометрических пар изображений, см. раздел 2.1). Даты съемок основного и вспомогательного изображений указанных трех пар следующие: первая пара – 11.11.2009 и 12.11.2009; вторая пара – 13.12.2009 и 14.12.2009; третья пара – 29.12.2009 и 30.12.2009.

### 3.1. Программный пакет SARscape

При проведении обработки последовательно выполнялись следующие процедуры: (1) задание значений коэффициентов некогерентного накопления по дальности и азимуту, равных 5 и 4; размеры пикселя 9,40x9,63 м<sup>2</sup>; (2) расчет величины нормального компонента базовой линии и разницы между доплеровскими центроидами основного и вспомогательных изображений; (3) автоматическое совмещение основного и вспомогательного изображений интерферометрической пары с последующим созданием файла интерферограммы; (4) устранение набега фазы с использованием опорной ЦММ SRTM V4; (5) фильтрация интерферограммы по методу Голдстина и расчет карты когерентности; (6) развертка фазы методом растущих областей (Region Growing) с порогом когерентности 0,25; (7) создание файла с девятью ОТМ (фрагменты с высоким уровнем когерентности) с использованием файла развернутой фазы, карты когерентности и ЦММ SRTM V4; (8) уточнение величины нормального компонента базовой линии с использованием созданного файла ОТМ; (9) пересчет фазы в высоту с получением на выходе ЦММ с межпиксельным расстоянием 10 метров.

Анализ трех построенных ЦММ (ЦММ1, ЦММ2 и ЦММ3) осуществлялся следующим образом. После построения средней ЦММ (<ЦММ>) рассчитывались разности между каждой из трех ЦММ и средней ЦММ (ЦММ1 - <ЦММ>; ЦММ2 - <ЦММ>; ЦММ3 - <ЦММ>). Далее рассчитывались разности между импортированной опорной ЦММ SRTM V4 и средней ЦММ (ЦММ SRTM V4 - <ЦММ>), а также разности между импортированной опорной ЦММ SRTM V4 и каждой из трех ЦММ (ЦММ SRTM V4 - ЦММ1; ЦММ SRTM V4 - ЦММ2; ЦММ SRTM V4 - ЦММ3). Усредненные по площади изображений значения разности значений высоты и их СКО представлены в Таблице 4.

Таблица 4. Усредненные по площади изображений значения разности значений высоты и СКО (SARscape)

№ п/п	Разность ЦММ	Среднее значение высоты, м	СКО высоты, м
1	Средняя ЦММ < ЦММ >	287,94	23,11
2	Разность ЦММ1 - < ЦММ >	0,15	3,92
3	Разность ЦММ2 - < ЦММ >	0,69	2,40
4	Разность ЦММ3 - < ЦММ >	-0,83	2,39
5	Разность ЦММ SRTM V4 - <ЦММ>	0,45	4,08
6	Разность ЦММ SRTM V4 – ЦММ1	0,29	7,16
7	Разность ЦММ SRTM V4 – ЦММ2	-0,19	4,02
8	Разность ЦММ SRTM V4 – ЦММ3	1,29	3,04

Общая характеристика сцены размером 40\*40 км<sup>2</sup> по данным SARscape – среднее значение высоты и СКО по данным <ЦММ> - 287,94 м и 23,11 м, соответственно, (см. строку 1 Таблицы 4). Средние значения разности высот между каждой из трех построенных ЦММ и средней ЦММ (строки с 2 по 4) меньше одного метра, что свидетельствует об отсутствии сколько-нибудь значительных “перекосов”, и что, в свою очередь, свидетельствует о высоком качестве результатов работы процедуры коррекции значений нормального компонента базовой линии. Значения СКО меняются в пределах от 2,39 м до 3,92 м.

Средние значения разности высот между (1) импортированной опорной ЦММ SRTM V4 и (2) средней ЦММ (строка 5) и каждой из трех построенных ЦММ (строки с 6 по 8) практически также лежат в пределах одного метра, что еще раз свидетельствует о высоком качестве результатов работы процедуры коррекции значений нормального компонента базовой линии. Значения СКО для разности ЦММ SRTM V4 - <ЦММ> равно 4,08 м. Значения СКО для разности ЦММ SRTM V4 и трех построенных ЦММ меняются в пределах от 3,04 м до 7,16 м.

### 3.2. Программный пакет PHOTOMOD Radar

После выполнения процедуры автоматического совмещения каждой из трех интерферометрических пар последовательно выполнялись следующие операции: (1) как и в случае PHOTOMOD Radar, см. раздел 3.1, были заданы значения коэффициентов некогерентного накопления по дальности и азимуту, равные 5 и 4; (2) построение файлов когерентности и интерферограммы с компенсацией набега фазы по дальности; компенсация набега фазы по азимуту не проводилась; (3) фильтрация интерферограммы с использованием пространственно-адаптивного фильтра и фильтра импульсного шума; (4) развертка фазы весовым методом наименьших квадратов (сопряженные градиенты); (5) пересчет фазы в высоту с использованием девяти ОТМ (фрагменты с высоким уровнем когерентности); значения высоты брались из ЦММ SRTM V4; степень полинома, задающего порядок для поверхности, являющейся опорной для абсолютной фазы, была выбрана равной двум; (6) формирование ЦММ с межпиксельным расстоянием 10 метров.

Анализ трех ЦММ, построенных с помощью программного пакета PHOTOMOD Radar, проводился средствами программного пакета SARscape (с использованием процедур экспорта/импорта из внутреннего формата PHOTOMOD Radar во внутренний формат SARscape); результаты анализа представлены в Таблице 5.

Таблица 5. Усредненные по площади изображений значения разности значений высоты и СКО (PHOTOMOD Radar)

№ п/п	Разность ЦММ	Среднее значение высоты, м	СКО высоты, м
1	Средняя ЦММ < ЦММ >	289,77	23,09
2	Разность ЦММ1 - < ЦММ >	-0,63	5,07
3	Разность ЦММ2 - < ЦММ >	0,12	4,26
4	Разность ЦММ3 - < ЦММ >	0,51	4,13
5	Разность ЦММ SRTM V4 - <ЦММ>	1,37	6,39
6	Разность ЦММ SRTM V4 – ЦММ1	-0,78	9,11
7	Разность ЦММ SRTM V4 – ЦММ2	-1,11	8,36
8	Разность ЦММ SRTM V4 – ЦММ3	-1,76	6,37

Разность средних значений высоты сцены по данным SARscape и PHOTOMOD Radar оказалась равной 1,83 м, СКО - всего 2 см (см. строки 1 Таблицы 5, а также Таблицы 4). Средние значения разности высот между каждой из трех построенных ЦММ и средней ЦММ (строки с 2 по 4), как и в случае SARscape, меньше 1 м. Значения СКО несколько возросли - изменяются в пределах от 4,13 м до 5,07 м.

Средние значения разности высот между (1) импортированной опорной ЦММ SRTM V4 и (2) средней ЦММ (строка 5) и каждой из трех построенных ЦММ (строки с 6 по 8) изменяются в пределах от 0,78 м до 1,76. Значения СКО для разности ЦММ SRTM V4 и средней ЦММ (строка 5) и трех построенных ЦММ (строки 6-8) меняются в пределах от 6,37 м до 9,11 м.

Как следует из представленных данных, точностные характеристики результатов, полученных с помощью программного пакета SARscape, оказались несколько выше, чем в случае программного пакета PHOTOMOD Radar - в среднем различие порядка 1,5 раз.

#### 4. Заключение

1. Сообщается об основных результатах первого цикла интерферометрической обработки данных PCA COSMO-SkyMed, 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>.

2. Результаты обработки в автоматическом режиме с использованием программного пакета PHOTOMOD Radar трех серий интерферометрических пар изображений по территории Амурской области показали, что средние значения когерентности при временном интервале между съемками основного и вспомогательного изображений в одни сутки лежат на уровне 0,528 - 0,557. Возможность совмещения сохранялась вплоть до значений временного интервала между съемками основного и вспомогательного изображений в 40 суток; при этом имело место падение средних значений когерентности примерно на 20%.

3. Показано, что средние значения когерентности, полученные с использованием программного пакета SARscape, меньше аналогичных значений, полученных с использованием программного пакета PHOTOMOD Radar. Причем, если при временном интервале в 1 сутки отличия составляют несколько десятков процентов, то по мере увеличения временного интервала различие достигает величин порядка 1,5 – 2, а в отдельных случаях и 3 раз. Возможная причина состоит в том, что в отличие от пакета SARscape, в котором при совмещении используются наборы фрагментов основного изображения в узлах фиксированной эквидистантной сетки (см. п. 2.2), в пакете PHOTOMOD Radar реализована специальная схема сканирования (см. п. 2.1), которая оказалась более эффективной в случаях относительно более низких значений средней когерентности.

4. Отработаны процедуры построения ЦММ; проведена оценка точности конечных результатов интерферометрической обработки с использованием усредненных по площади изображений значений разности высоты и их СКО для ЦММ, построенных по трем интерферометрическим парам изображений и опорной ЦММ SRTM V4. Показано, что точностные характеристики результатов, полученных с помощью программного пакета SARscape, несколько выше, что, по-видимому, является следствием более высокой эффективности используемых в этом пакете алгоритмов уточнения орбитальных параметров, фильтрации интерферограммы и развертки фазы.

Использовавшиеся при проведении обработки данные PCA COSMO-SkyMed были получены от ФГУП «Рособоронэкспорт», который, в свою очередь, получил их от итальянской компании «e-GEOS».

## **INSAR and DINSAR data processing software development for Russian space SAR**

**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 COSMO-SkyMed InSAR data processing for three Russian regions by means of PHOTOMOD Radar and SARscape software packages are presented. An analysis of 3 time series of COSMO-SkyMed interferometric pairs for Amur region shows, that mean coherence is about 0,528 - 0,557 for pairs with one-day interval, it decreases by 20% for 40 days time interval. The technique of DEM generation was worked out and estimation of accuracy of final results of InSAR processing was done.

**Keywords:** SAR, DEM, COSMO-SkyMed, PHOTOMOD Radar, SARscape, InSAR processing, coregistration, baseline rectification.