

**АЭРОКОСМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ,
ПЛАНЕТ И ДРУГИХ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.
ГЕОЭКОЛОГИЯ И КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ПОИСКА И СПАСЕНИЯ**

УДК 621.396.962

**Экспериментальные исследования возможностей
метода малых базовых линий с использованием
данных PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS**

А. А. Феоктистов¹, А. И. Захаров², М. А. Гусев³, П. В. Денисов⁴

¹к. ф.-м. н., Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ)

АО «Российские космические системы»

²д. ф.-м. н., Фрязинский филиал ИПЭ им. В. А. Котельникова РАН

^{3,4}Научный центр оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ)

АО «Российские космические системы»

e-mail: denisov@ntsomz.ru

Аннотация. Представлено детальное описание ключевых моментов метода малых базовых линий. Отмечены основные особенности алгоритма, реализованного в модуле SBAS пакета SARscape. Сообщается о результатах экспериментальных исследований возможностей метода малых базовых линий, полученных при обработке длинных временных серий изображений PCA ASAR/ENVISAT, PCA PALSAR/ALOS и результатов подспутниковых GPS-измерений с помощью модуля SBAS программного пакета SARscape.

Ключевые слова: метод малых базовых линий, PCA, ASAR/ENVISAT, PALSAR/ALOS, SARscape, граф связи, атмосферный фазовый экран, ЦМР

**Experimental Studies of Small Baselines Technique
with Use of SAR ASAR/ENVISAT
and PALSAR/ALOS Data Set**

A. A. Feoktistov¹, A. I. Zakharov², M. A. Gusev³, P. V. Denisov⁴

¹candidate of physico-mathematical sciences, Research Center for Earth Operative Monitoring
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

²Sc.D., Institute of Radio-engineering and Electronics RAS; branch in Fryazino

^{3,4}Research Center for Earth Operative Monitoring,
Joint Stock Company "Russian Space Systems"

e-mail: denisov@ntsomz.ru

Abstract. Detailed description of small baseline technique is presented. Basic features of SBAS algorithm implementation in the SARscape software package are described. Results of experimental studies of small base lines technique are presented. SAR ASAR/ENVISAT and PALSAR/ALOS data set, GPS data set and SBAS module of SARscape software package were used.

Key words: small baseline technique, SBAS, SAR, ASAR/ENVISAT, PALSAR/ALOS, SARscape, connection graph, atmospheric phase screen, DEM

1. Введение

В Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) АО «Российские космические системы», ориентируясь на планы Роскосмоса по созданию перспективных российских радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), проводятся исследования и отработка технологий обработки радиолокационной информации. Известно, что возможности классических методов интерферометрической [1, 2] и дифференциальной интерферометрической [3, 4] обработки данных радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) при измерении рельефа и подвижек земной поверхности существенно ограничены эффектами атмосферных фазовых искажений и пространственной и временной декорреляции (т.е. потерей когерентности между интерферометрическими парами изображений).

Современные методы постоянных рассеивателей (PS) и малых базовых линий (SBAS), основанные на совместном использовании длинных временных серий изображений РСА (т.е. изображений высокой кратности, полученных в повторяющейся геометрии съемки), позволяют ослабить влияние эффектов пространственной и временной декорреляции и атмосферных искажений и повысить точность измерения рельефа и подвижек отражающей поверхности в создаваемых цифровых моделях рельефа (ЦМР) и цифровых картах смещений (ЦКС).

В рамках метода PS задача выявления подвижек отражающей поверхности и измерения рельефа решается для ограниченного набора пикселей с достаточно сильным устойчивым отраженным сигналом (постоянных рассеивателей), наблюдаемых в большом количестве на территориях типа городской застройки [5, 6]. В [7, 8] представлены результаты исследований возможностей метода на примере модуля PS программного пакета *SARscape* и тестового массива данных (длинная временная серия из 25 фрагментов изображений РСА *ASAR/ENVISAT* размером 16×17 км², полученных в период с 25.10.2002 по 27.01.2006 гг. по одному из районов вблизи Лас-Вегаса, США). Данные входят в комплект поставки пакета *SARscape*. В качестве опорной ЦМР при проведении обработки использована ЦМР *SRTM V4*. Ввиду отсутствия каких-либо результатов подспутниковых наземных

измерений основной акцент сделан на анализе относительных точностных характеристик выходных продуктов модуля PS пакета *SARscape*, включая средние значения и СКО рассчитанных скоростей смещений и остаточных высот.

2. Ключевые моменты метода малых базовых линий

Возможность формирования пространственно «плотных» выходных продуктов реализована в рамках метода SBAS. Ключевые моменты метода SBAS: 1) формирование наборов свернутых интерферограмм (временные и пространственные базовые линии интерферометрических пар изображений должны удовлетворять вводимым пороговым ограничениям); 2) развертка фазы свернутых интерферограмм; 3) матричная формулировка алгоритмов инверсии (оценки векторов смещений \mathbf{p} и остаточной топографии Δh по значениям фазы развернутых интерферограмм) для случаев одного и нескольких несвязанных SBAS-наборов (интерферограммы для пар изображений несвязанных наборов отсутствуют); 4) введение «гладкой» полиномиальной временной модели для изменения фазового сигнала смещений во времени; 5) коррекция атмосферных фазовых искажений с использованием разработанных в рамках метода PS процедур низкочастотной пространственной и высокочастотной временной фильтрации [9, 10].

Основные особенности алгоритма, реализованного в модуле SBAS пакета *SARscape*: 1) фильтрация свернутых интерферограмм с использованием одного из трех фильтров (*Adaptive*, *Boxcar*, *Goldstein*); 2) возможность выбора между методами 2D- и 3D-развертки; 3) дополнительное использование результатов развертки усредненных свернутых интерферограмм, имеющих более низкое пространственное разрешение (вводится специальный параметр — уровень декомпозиции); 4) коррекция орбитальных ошибок методами орбитальной коррекции (*Orbital refinement*) или коррекции остаточной фазы (*Residual Phase refinement*) с использованием опорных точек местности (ОТМ), выбираемых на развернутых интерферограммах; 5) разбиение процедуры инверсии на два этапа (первая

и вторая инверсии; атмосферная коррекция выполняется в рамках второй инверсии). Предусмотрено использование большого объема интерактивных процедур визуально-инструментального анализа промежуточных и конечных результатов обработки с целью обеспечения возможности коррекции сделанного ранее выбора алгоритмов и значений их параметров в ключевых процедурах обработки (с последующим повторным запуском процесса вычислений), а также удаления интерферограмм с высоким уровнем шумов и наличием неустраняемых артефактов [10–12].

3. Экспериментальные результаты

Комплексные экспериментальные исследования возможностей метода *SBAS* выполнены на примере модуля *SBAS* программного пакета *SARscape* и тестового массива (входит в комплект поставки пакета *SARscape*) в составе: 1) длинной временной серии из 34 фрагментов изображений PCA *ASAR/ENVISAT* (размером $16 \times 15,3$ км²), полученных в период с 04.09.2006 по 08.09.2010 гг.; 2) длинной временной серии из 23 фрагментов изображений PCA *PALSAR/ALOS* (размером также $16 \times 15,3$ км²), полученных в период с 26.08.2006 по 22.10.2010 гг. и 3) результатов подспутниковых *GPS*-измерений для одной точки, находящейся в пределах области «покрытия земной поверхности изображениями PCA. Территория съемки — префектура Чибя (*Chiba*), Япония, на которой расположено несколько участков с проседанием и подъемом почвы. Смещения земной поверхности вызваны добычей газа и закачкой воды [11, 12].

При проведении анализа свернутых интерферограмм выявлялись интерферограммы, характеризующиеся: 1) наличием параллельных интерференционных полос из-за значительных погрешностей в орбитальных параметрах; 2) «размытостью» в направлении наклонной дальности вследствие недостаточно корректной процедуры совмещения для этого направления; 3) низким уровнем когерентности из-за слишком большой временной и/или пространственной базовой линии; 4) наличием характерных признаков атмосферных фазовых искажений. Дополнительно выполнен предварительный поиск зон смещений земной поверхности.

При проведении анализа развернутых интерферограмм выявлялись «плохо развернутые» интерферограммы, характеризующиеся наличием фрагментов с кратными 2π скачками фазы («острова»). Пороговое значение когерентности при проведении развертки фазы интерферограмм равно 0,35. Уровень декомпозиции установлен равным единице.

Коррекция орбитальных ошибок проводилась методом *Residual Phase refinement* с использованием более 40 опорных точек местности (ОТМ), выбранных на файлах развернутой фазы вне зоны деформации земной поверхности.

Предварительная оценка векторов смещений \mathbf{p} и остаточной топографии Δh (первая инверсия) проведена в рамках линейной модели изменения фазового сигнала смещений во времени. Повторно выполнены развертка фазы (уровень декомпозиции увеличен до двух) и анализ развернутых интерферограмм. В общей сложности по результатам анализа удалено 26 *ASAR/ENVISAT*-интерферограмм и 5 *PALSAR/ALOS*-интерферограмм.

После выполнения атмосферной коррекции с использованием процедур низкочастотной пространственной и высокочастотной временной фильтрации рассчитаны уточненные значения векторов смещений \mathbf{p} и временные серии накопленной деформации $d(t_i, x, r)$ (вторая инверсия). Модель изменения фазового сигнала смещений во времени оставлена линейной.

Для всех результатов, полученных в рамках этапов первой и второй инверсии, выполнена процедура орторектификации; размер ячейки для обеих временных серий PCA-изображений установлен равным 25 м. Вектора смещений \mathbf{p} и серии накопленной деформации $d(t_i, x, r)$ спроектированы на вертикальное направление.

На рис. 1, а отображены цифровые карты средней скорости смещения, рассчитанные по данным PCA *PALSAR/ALOS*; на рис. 1, б — по данным PCA *ASAR/ENVISAT*. Среднее значение разности скорости смещения по данным PCA *ASAR/ENVISAT* и PCA *PALSAR/ALOS* (после усреднения по площади изображений) оказалось равным 0,62 мм/год; стандартное отклонение равно 2,8 мм/год. Следует особо подчеркнуть, что рассчитанные цифровые карты были построены с использованием данных разных диапазонов спектра, причем съемки

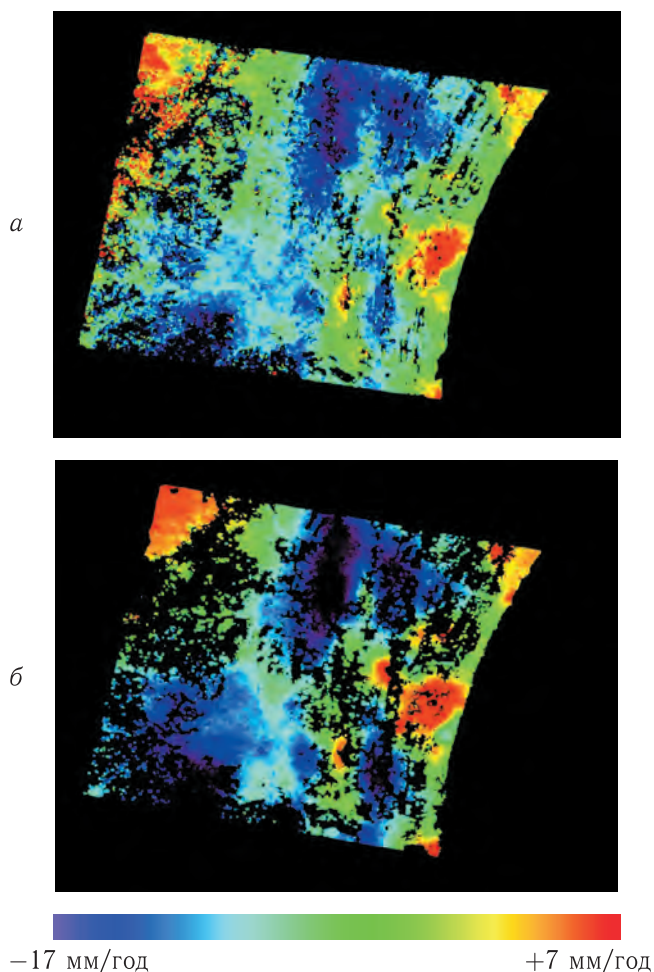


Рис. 1. Средние скорости смещения по данным PCA PALSAR/ALOS(a) и PCA ASAR/ENVISAT (б)

каждым из PCA проводились в разные даты, т.е. при заведомо различающихся атмосферных условиях наблюдения. Это позволяет утверждать, что полученные оценки — достаточно объективная характеристика точности самого метода SBAS.

На рис. 2, а демонстрируются результаты расчетов на основе распределения хи-квадрат (по данным PCA ASAR/ENVISAT), позволяющие проводить анализ результатов не только в терминах величины средней скорости смещения, но также и в терминах типов смещений. Сине-зеленые цвета соответствуют территории с квазилинейным типом смещений; красным цветом выделены два фрагмента с существенно нелинейным типом. В качестве примера на рис. 2, б представлены графики для временных серий накопленной деформации D (в мм)

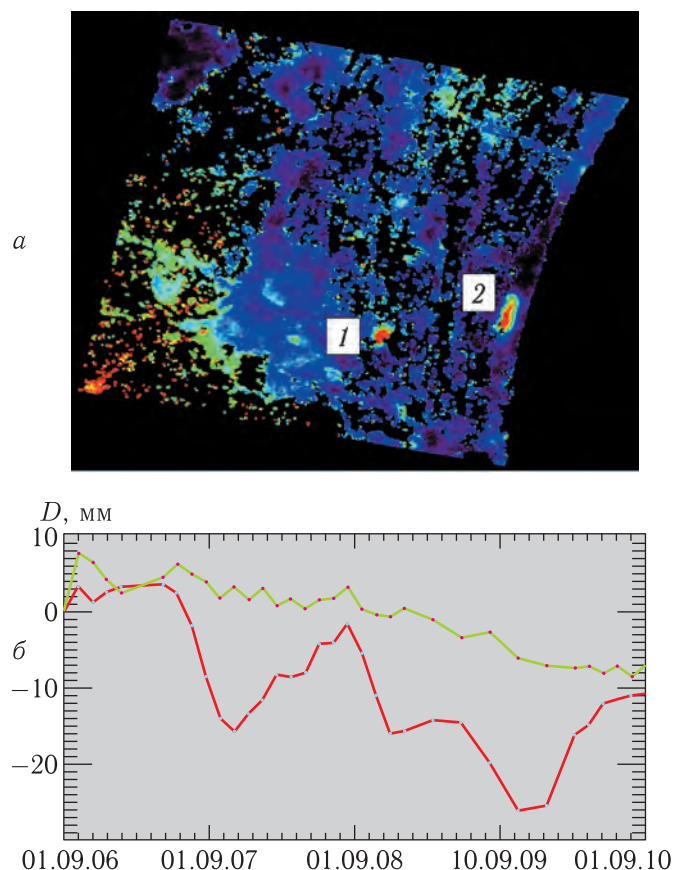


Рис. 2. Два участка с сильной нелинейностью (а) и временные серии накопленной деформации для двух точек с резко различающимися типами движений (б)

для двух точек (из зеленой и красной областей изображений соответственно).

При сопоставлении результатов SBAS-обработки спутниковой информации с результатами наземных GPS-измерений использовались данные единственной доступной GPS-точки, находящейся в пределах области «покрытия» земной поверхности изображениями PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS. На рис. 3, а показаны временные серии накопленной деформации D по данным PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS; на рис. 3, б — по данным PCA ASAR/ENVISAT и GPS1; на рис. 3, в — по данным PCA PALSAR/ALOS и GPS2 (GPS1 и GPS2 — временные серии накопленной деформации по данным GPS на несовпадающие даты съемок длинных временных серий изображений ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS соответственно). Использованы следующие цвета: синий —

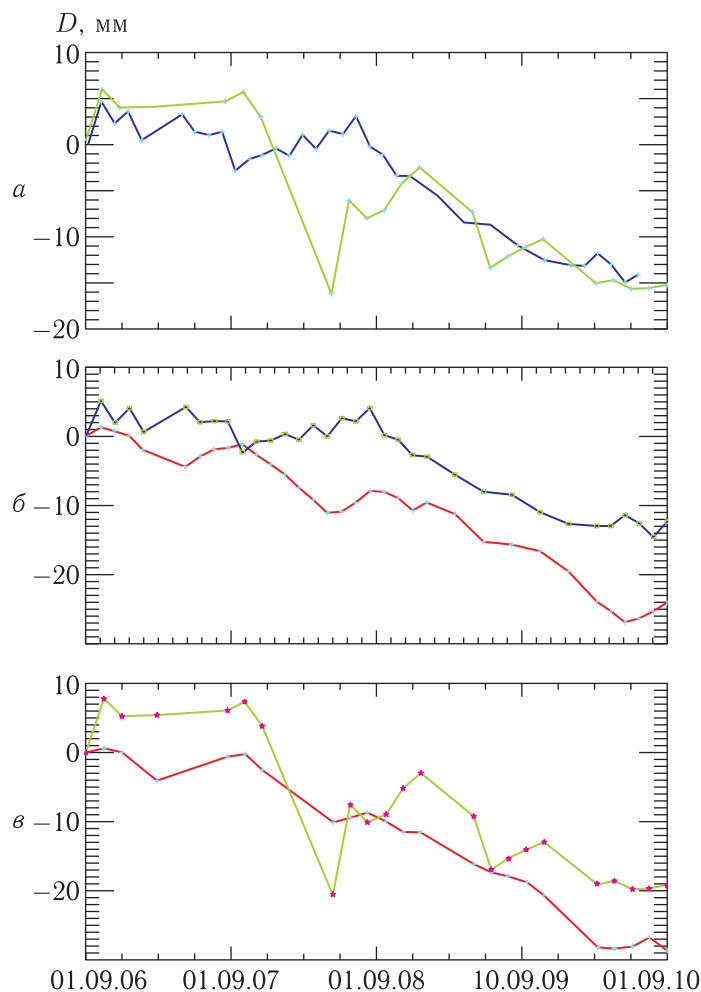


Рис. 3. Временные серии накопленной деформации по данным PCA ASAR/ENVISAT, PCA PALSAR/ALOS, GPS1 и GPS2

для PCA ASAR/ENVISAT; зеленый — для PCA PALSAR/ALOS; красный — для GPS1 и GPS2.

В табл. 1 приведены значения разности средней скорости смещения по данным PCA ASAR/ENVISAT, PCA PALSAR/ALOS, GPS1 и GPS2, которые варьируют между 0,5 и 3 мм/год, что в целом достаточно близко к зафиксированной ранее величине стандартного отклонения

Таблица 1. Значения разности средней скорости смещения

ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS	1,0 мм/год
ASAR/ENVISAT и GPS1	2,8 мм/год
PALSAR/ALOS и GPS2	2,3 мм/год
GPS1 и GPS2	0,5 мм/год

между значениями скорости смещения по данным ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS (равной 2,8 мм/год) (рис. 1).

4. Заключение

Представлены результаты комплексных экспериментальных исследований метода малых базовых линий, в рамках которого реализуется возможность формирования пространственно «плотных» выходных продуктов. Необходимо отметить исключительно высокий программно-алгоритмический уровень реализации современных методов интерферометрии, вследствие чего возникают жесткие требования к профессиональной подготовке оператора, который на основе анализа характеристик входного массива и выявленных артефактов должен делать корректный выбор как алгоритмов обработки, так и значений их ключевых параметров. Программный комплекс должен обеспечивать удобный сервис для проведения: 1) визуально-инструментального анализа промежуточных и конечных результатов обработки, 2) корректировки сделанного ранее выбора алгоритмов и значений основных параметров, 3) повторного запуска процесса обработки, а также 4) удаления интерферограмм с высоким уровнем шумов и наличием неустраняемых артефактов.

Список литературы

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: Сб. науч. ст. М.: ООО «ДоМира», 2011. Т. 8, № 2. С. 310–317.
2. 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 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. М.: ООО «ДоМира», 2012. Т. 9, № 2. С. 106–110.

3. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. Анализ предельных возможностей оценки деформации земной поверхности в зоне землетрясения в Японии 11.03.2011 г. по данным PCA ASAR/ENVISAT с использованием программного пакета *SARscape* // Материалы V Всероссийской научной конференции «Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред». Муром, 26–28 июня 2012 г. (CD-ROM). С. 258–263.
4. Феоктистов А.А., Денисов П.В., Гусев М.А. Практический опыт интерферометрической и дифференциальной интерферометрической обработки данных PCA COSMO-SkyMed, *PALSAR/ALOS* и *ASAR/ENVISAT* // Материалы IX научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». Геленджик, 17–21 сентября 2012 г. М.: МНТОРЭС им. А.С. Попова, филиал ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-ПРОГРЕСС”». НПП «ОПТЭК», 2012. С. 240–244.
5. Ferretti A., Prati C. and Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38, p. 2202–2212.
6. Ferretti A., Prati C. and Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39, p. 8–20.
7. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 1. Ключевые моменты метода постоянных рассеивателей // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, 2014, № 12. <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/5/text.html>
8. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование зависимости результатов обработки радиолокационных данных ДЗЗ от параметров обработки. Часть 2. Экспериментальные результаты // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, 2014, № 12. <http://jre.cplire.ru/jre/dec14/6/text.html>
9. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., and Sansosti E. 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, p. 2375–2383.
10. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля *SBAS* программного пакета *SARscape* и данных PCA *ASAR/ENVISAT* и *PALSAR/ALOS*. Часть 1. Ключевые моменты метода // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, 2015. В печати.
11. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Исследование возможностей метода малых базовых линий на примере модуля *SBAS* программного пакета *SARscape* и данных PCA *ASAR/ENVISAT* и *PALSAR/ALOS*. Часть 2. Экспериментальные результаты // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал, 2015. В печати.
12. *SBAS workflow*, 2013 // *SBAS tutorial*. Ver. 2.0. ITT Visual Information Solutions. Pearl East Circle. Boulder CO, p. 92.