РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ 2015, том 2, выпуск 3, с. 50–55

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

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 ИРЭ 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 PCA (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 РЅ 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 р 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

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ т. 2 вып. 3 2015

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 неустранимых 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 РСА 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 РСА. Территория съемки — префектура Чиба (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 (OTM), выбранных на файлах развернутой фазы вне зоны деформации земной поверхности.

Предварительная оценка векторов смещений **р** 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 РСА-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, δ — 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



-17 мм/год +7 мм/год

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 (*a*) 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 РСА ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS; на рис. 3, б по данным PCA ASAR/ENVISAT и GPS1; на рис. 3, β — 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 —

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ т. 2 вып. 3 2015



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) визуальноинструментального 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 неустранимых артефактов.

Список литературы

- 1. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Денисов П.В., Гусев М.А. Перспективы разработки комплекса интерферометрической и дифференциальноинтерферометрической 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 Х- и L-диапазонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. М.: ООО «ДоМира», 2012. Т. 9, № 2. С. 106–110.

РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ т. 2 вып. 3 2015

- 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 РСА 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 «ОПТЭКС», 2012. С. 240–244.
- 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.
- Ferretti A., Prati C. and Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39, p. 8–20.
- 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 ра-

диоэлектроники: 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
- 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.
- SBAS workflow, 2013 // SBAS tutorial. Ver. 2.0. ITT Visual Information Solutions. Pearl East Circle. Boulder CO, p. 92.